621.1
К45

В. А. КИТАЙЦЕВ, Р. М. ГУРВИЧ
И. В. КОРОЛЬКОВ

ТЕПЛОТЕХНИКА И ТЕПЛОВЫЕ УСТАНОВКИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

621.1
К45

В. А. КИТАЙЦЕВ, Р. М. ГУРВИЧ,
И. В. КОРОЛЬКОВ

ТЕПЛОТЕХНИКА И ТЕПЛОВЫЕ УСТАНОВКИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Третье издание,
переработанное и дополненное

Допущено Управлением учебными заведениями Министерства промышленности строительных материалов СССР в качестве учебника для техникумов

«С. ТОРАЙГЫРОВ АТЫНДАГЫ ПАВЛОДАР МЕМЛЕКЕТТІК УНИВЕРСИТЕТІ»
С. БЕЙСЕМБАЕВ АТЫНДАГЫ ҒЫЛЫМИ КІТАПХАНА
СИРЕК КІТАПТАР ҚОРЫ
ФОНД РЕДКИХ КНИГ
НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА ИМ. С. БЕЙСЕМБАЕВА
«ПАВЛОДАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ.С.ТОРАЙГЫРОВА»

250247

БИБЛИОТЕКА
Павлодарского
[illegible]ТУТА

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ЛИТЕРАТУРЫ ПО СТРОИТЕЛЬНЫМ МАТЕРИАЛАМ
МОСКВА—1954

672.2+673+677.3
К 45

Рецензент—докт. техн. наук проф. **Д. Б. Гинзбург.**

ПРЕДИСЛОВИЕ

Учебник предназначен для подготовки техников-технологов по производству цемента и других вяжущих веществ, изделий строительной керамики и стекла.

Все разделы учебника в третьем издании переработаны и дополнены новыми данными. Основная цель переработки состояла в наиболее полном отражении новой техники и передового опыта в области тепловой обработки строительных материалов, широко внедряемых в настоящее время в промышленность.

Авторы учли изменения, внесенные в учебные планы и программы со времени выхода в свет второго издания, а также пожелания преподавателей и учащихся по отдельным вопросам, изложенным в учебнике.

Ввиду отсутствия специального учебного пособия по теплотехническим расчетам для учащихся техникумов, в учебнике увеличено число примеров и типовых расчетов; в приложениях приведены справочные данные, необходимые для расчетов тепловых установок при курсовом и дипломном проектировании.

Введение, разделы I, II, V, VI, X, XI и XII написаны доцентом канд. техн. наук В. А. Китайцевым. Им же составлены приложения и осуществлено общее редактирование учебника; разделы III, IV, VII, VIII и две первые главы IX раздела написаны канд. техн. наук Р. М. Гурвичем; остальные главы IX раздела написаны инж. И. В. Корольковым.

Авторы выражают благодарность доктору техн. наук профессору Д. Б. Гинзбургу, лауреатам Сталинской премии доценту А. Н. Иванову и профессору М. Ю. Лурье за ценные указания, сделанные ими при рецензировании учебника.

ВВЕДЕНИЕ

Курс «Теплотехника в промышленности строительных материалов» представляет собой учебную дисциплину, в которой изучаются процессы и установки для тепловой обработки строительных материалов.

В промышленности строительных материалов применяют самые разнообразные тепловые установки: печи, сушилки, автоклавы и др. Тепло, нужное для производственных целей, получается преимущественно от сжигания топлива. Лишь в редких случаях применяют электронагрев.

Топливо, как источник получения тепла, имеет огромное значение для развития всей современной индустрии. В. И. Ленин говорил, что топливо является хлебом для промышленности[1].

Промышленность строительных материалов—один из крупнейших потребителей топлива в народном хозяйстве СССР. Помимо естественных видов топлива—дров, торфа, ископаемых углей—здесь широко применяют пылевидное и газообразное топливо.

Количество тепла, потребляемого печами и другими тепловыми установками в промышленности строительных материалов, весьма значительно. Например, потребность в тепле ванной стекловаренной печи в переводе на топливо составляет около 4 *т* каменного угля в час. Высокопроизводительная вращающаяся печь для обжига цементного клинкера потребляет 5—6 *т* каменного угля в час.

Затраты на топливо и другие расходы на тепловую обработку строительных материалов составляют значительную часть общих затрат на их производство. Например, при обжиге цемента они достигают 25—30% себестоимости продукции.

Тепловая обработка приводит к превращениям в самом веществе материала, благодаря чему последний приобретает новые физико-химические свойства. При производстве большинства строительных материалов применяются следующие виды тепловой обработки: сушка, обжиг, варка и пропаривание.

---

[1] В. И. Ленин. Соч., т. 33, стр. 139.

Сушка заключается в удалении из материалов влаги путем ее испарения. Сушка применяется в производстве почти всех строительных материалов и ей подвергаются как сыпучие и комовые материалы (песок, глина и др.), так и сформованные изделия (керамические, гипсовые и др.).

Обжиг состоит в нагревании материалов до такой температуры, при которой они приобретают новые свойства, позволяющие использовать их в строительстве.

Обжиг является важнейшей стадией технологии строительной керамики и вяжущих веществ. При обжиге в керамических изделиях, под влиянием высоких температур, происходят сложные физико-химические превращения: протекают реакции дегидратации; легкоплавкие компоненты расплавляются и образуют сложные соединения; в твердых нерасплавившихся частицах происходит перестройка кристаллических решеток. В результате всех этих процессов обожженные изделия приобретают прочность, водостойкость, морозостойкость и другие свойства.

В производстве вяжущих веществ задачей обжига является изменение химического состава сырья для получения продуктов, обладающих новыми качествами. Так, при обжиге известняка, не обладающего вяжущими свойствами, происходит его разложение на углекислый газ и окись кальция, представляющую собой вяжущее вещество—известь-кипелку.

В результате совместного обжига известняков и глин получаются химические соединения CaO с SiO_2, Al_2O_3 и Fe_2O_3, из которых состоит важнейший вяжущий материал—портландцемент.

При производстве вяжущих веществ особенно сильно проявляется зависимость свойств обожженного материала от условий его тепловой обработки, главным образом от температуры обжига. Так, высокие вяжущие свойства портландцемента приобретаются только при обжиге сырья до спекания при температуре 1400 — 1450°.

Зависимость свойств продуктов обжига от температуры наглядно проявляется при обжиге гипса. При нагреве гипсового камня в пределах 130—200° происходит отщепление от него части химически связанной воды и образование алебастра.

При обжиге гипсового камня выше 200° получается гипс, в основном состоящий из нерастворимого ангидрита, не способного затвердевать после размола и затворения водой. Если обжиг гипса вести в пределах 450—750° и к продукту обжига добавлять катализаторы (доменный шлак, кальцинированный доломит), то гипс вновь станет вяжущим веществом—ангидритовым цементом. При повышении температуры обжига до 800—1000° получается другое вяжущее вещество—эстрих-гипс. Таким образом, состав и свойства продуктов обжига гипса целиком зависят от температуры обжига.

Варка—основной вид тепловой обработки в производстве стекла. При 1400—1500° стекольная шихта, состоящая в боль-

шинстве случаев из кварцевого песка, известняка, соды и сульфата переходит в жидкий расплав, из которого затем вырабатываются листовое стекло и другие стекольные изделия.

Пропаривание, или тепловодяная обработка, применяется при производстве силикатного кирпича, глиняно-известкового кирпича, шлакоцементных блоков, железобетонных и других строительных изделий. Оно заключается в воздействии на обрабатываемые материалы водяного пара в автоклавах или пропарочных камерах.

В директивах XIX съезда Коммунистической партии Советского Союза по пятому пятилетнему плану развития СССР на 1951—1955 годы предусмотрено резкое увеличение производства основных строительных материалов.

Для выполнения этой задачи необходимо увеличить производительность существующих печей и сушилок и ввести в эксплуатацию новые высокопроизводительные тепловые установки.

Изучение курса «Теплотехника в промышленности строительных материалов» должно вооружить молодых специалистов теплотехническими знаниями и подготовить их к проектированию и эксплуатации сложного теплотехнического оборудования заводов строительных материалов.

* * *

Тепловой обработке строительных материалов всегда придавалось большое значение.

Памятники древнерусского зодчества в Москве, Киеве, Новгороде, Владимире и других городах СССР говорят об искусстве наших старинных мастеров, об их умении обжигать кирпич и известь, которые в течение многих веков сохранили свои высокие строительные качества.

Археологические раскопки свидетельствуют о вполне рациональном устройстве обжигательных печей, применявшихся в древности для этой цели[1].

Однако по научному подходить к тепловой обработке строительных материалов начали лишь в XVIII веке, когда были заложены основы современных физико-химических наук.

Великий русский ученый М. В. Ломоносов впервые установил правильный взгляд на природу теплоты, указав на ее кинетический характер. Этим он опроверг идеалистическое представление некоторых ученых того времени о существовании какого-то особого, нематериального «теплорода»—причины всех тепловых явлений.

В «Размышлениях о причине теплоты и холода» (1750 г.) М. В. Ломоносов писал, что теплота распространяется коловратным (т. е. вращательным) движением частиц—молекул[2].

---

[1] Б. А. Рыбаков. Ремесло древней Руси. Изд. АН СССР, 1948.

[2] М. В. Ломоносов. Полное собрание сочинений. Изд. АН СССР, т. II, 1951.

Михаил Васильевич
ЛОМОНОСОВ
(1711 — 1765)

Ломоносов доказал несостоятельность господствовавшей до него теории флогистона и научно объяснил сущность процессов окисления и горения.

В диссертации «О вольном движении воздуха, в рудниках примеченном» (1742 г.) М. В. Ломоносов выяснил причины движения теплого воздуха в рудниках и горячих дымовых газов в печах, заложив тем самым основу для научной разработки теории печей.

М. В. Ломоносов не только заложил научный фундамент для дальнейшего развития теплотехники, но сам занимался тепловой обработкой силикатов—варил стекло на построенном им стекольном заводе.

Русский профессор В. Е. Грум-Гржимайло, исходя из работы М. В. Ломоносова о причинах движения нагретых газов, разработал в начале этого века первую научную теорию, объяснявшую работу заводских печей и сушилок, которая в свое время сыграла прогрессивную роль в развитии печной теплотехники.

Гениальный русский химик Д. И. Менделеев высказал ряд идей и предложений в области изучения топлива. В частности, в 1877 г. он создал гипотезу о происхождении нефти; в 1882 г. первым в мире высказал мысль о возможности подземной газификации ископаемых углей; в 1897 г. предложил формулу для определения теплотворности топлива.

Д. И. Менделеев много сделал для развития топливной, в особенности нефтяной промышленности в России. Он придавал большое значение науке для практики. Научные заветы Д. И. Менделеева были претворены в жизнь лишь при советской власти[1].

После Великой Октябрьской социалистической революции теплотехника в промышленности строительных материалов стала развиваться быстрыми темпами. Производственные предприятия были оснащены новейшими типами печей, сушилок, газогенераторов, автоклавов и других тепловых установок.

Этим успехам способствовали достижения отечественной науки.

Благодаря заботам Коммунистической партии и Советского Правительства о развитии науки научно-исследовательские институты и отдельные ученые разработали наиболее передовые методы расчетов тепловых процессов и конструирования тепловых установок.

Большой вклад в развитие теплотехники внес академик М. В. Кирпичев, предложивший в 1923 г. метод моделирования тепловых процессов. Важные исследования по вопросам сушки были проведены во Всесоюзном теплотехническом институте имени Ф. Э. Дзержинского, а также профессорами Н. Н. Добро-

---

[1] Д. И. Менделеев. Соч. изд. АН СССР. М. 1949 т. XI—Топливо.

хотовым, А. В. Лыковым и другими учеными. Проектные организации—Росстромпроект, Гипроцемент, Стеклострой—спроектировали целый ряд высокопроизводительных тепловых установок, получивших распространение на заводах.

Достижения ученых и новаторов производства широко распространяются в промышленности строительных материалов.

Новаторы и передовые рабочие внедряют на заводах новые способы обжига и сушки строительных материалов. Так, мастер Воронежского кирпичного завода П. А. Дуванов разработал и внедрил скоростной способ обжига кирпича, резко повысивший производительность кольцевых печей. Мастер Краснодарского кирпичного завода И. Г. Картавцев предложил способ сушки кирпича в сушильных сараях, увеличивший выработку его. Машинисты вращающихся печей цементных заводов разработали скоростной обжиг цементного клинкера.

Наука должна чутко прислушиваться к голосу опыта, практики и смело прокладывать новые пути в производстве. Наука и практика неотделимы друг от друга при решении задач коммунистического строительства.

РАЗДЕЛ ПЕРВЫЙ

СВОЙСТВА И ВИДЫ ТОПЛИВА

Глава I

ОБЩИЕ СВОЙСТВА ТОПЛИВА

1. ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ТОПЛИВУ

Из всех требований, предъявляемых к топливу различных видов, общими являются следующие:

а) при сгорании топливо должно выделять значительное количество тепла на единицу своего веса или объема;

б) при сгорании топливо не должно выделять вредных газов, действующих на здоровье людей, а также на материалы топок и печей, главным образом на металлические их части;

в) топливо, по возможности, должно быть легко добываемым и дешевым;

г) топливо должно выдерживать длительное хранение на складах без существенного изменения своих свойств.

Горючие вещества, в большей или меньшей степени отвечающие этим требованиям, являются промышленными видами топлива.

Не все горючие или выделяющие тепло вещества могут служить промышленным топливом. Например, спирт, бензол, ацетон и тому подобные жидкости, хотя и представляют собой горючие вещества, однако вследствие их высокой стоимости не могут быть отнесены к промышленным видам топлива. По той же причине не считают топливом применяемые при сварке металлов термитные смеси, развивающие высокую температуру. Сера и ее соединения (пирит, марказит и др.) при горении выделяют тепло, но как топливо не используются, так как образующийся при их горении сернистый газ вредно влияет на здоровье людей и разрушающе действует на металлические детали тепловых установок.

2. ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ТОПЛИВО

Промышленное топливо по целевому назначению подразделяют на энергетическое и технологическое. Это деление условно, так как оно лишь отчасти основывается на технических свойствах топлива.

Топливо, сжигаемое в теплосиловых установках с целью получения энергии, называют энергетическим.

Технологическим топливом считают топливо, сжигаемое в заводских печах, топках сушилок и других установок для использования тепла в технологических процессах производства (для варки стекла, обжига извести, сушки кирпича и т. д.).

Выбор технологического топлива для какого-либо производства определяется особенностями его технологии и, главным образом, конструкцией тепловых установок. Например, топливо, пригодное для обжига цементного клинкера во вращающихся печах, может оказаться непригодным для обжига его в шахтных печах.

Основными видами технологического топлива, применяемыми в промышленности строительных материалов, являются местные виды топлива, т. е. такие, которые по своим свойствам экономически нецелесообразно перевозить на далекие расстояния. Местными видами топлива являются: дрова, торф, бурые угли и горючие сланцы.

Всемерное развитие добычи местного топлива и применение его в промышленности является задачей государственной важности, так как при этом сокращаются дальние перевозки топлива и эффективнее расходуются запасы наиболее ценных видов его, в частности высококачественных каменных углей и нефти.

3. КЛАССИФИКАЦИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВИДОВ ТОПЛИВА

По физическому состоянию различают топливо твердое, жидкое и газообразное.

По происхождению топливо делят на естественные и искусственные виды топлива, получающиеся в результате технологической переработки естественного топлива. При этом топливо изменяет состав и форму, а иногда и физическое состояние; например, из твердого состояния оно превращается в газообразное. Схема классификации основных видов промышленного топлива приведена в табл. 1.

4. СОСТАВ ТВЕРДОГО И ЖИДКОГО ТОПЛИВА

Топливо состоит из горючей и негорючей частей. К горючей части топлива относят углерод C, водород H, кислород O, азот N и серу S. Так как кислород и азот не горят, то включение их в состав горючей массы является условным. Горючая часть топлива поэтому называется условно горючей массой. Негорючая часть топлива, называемая балластом, состоит из влаги W и золы A. Органическую массу топлива составляют C, H, O и N.

Таблица 1

Схема классификации промышленных видов топлива

Происхождение топлива	Физическое состояние топлива		
	твердое	жидкое	газообразное
Естественное	Дрова Торф Бурые угли Каменные угли Антрациты Горючие сланцы	Нефть	Природный газ
Искусственное	Древесный уголь Кокс Топливные брикеты Пылевидное топливо	Мазут	Доменный газ Коксовый газ Нефтяной газ Генераторный газ: а) воздушный б) паровоздушный в) водяной

Топливо в том виде, в каком оно поступает в топки и печи для сжигания, носит название рабочего топлива. Ввиду того, что содержание влаги в нем может колебаться в больших пределах, состав топлива часто характеризуют его сухой массой.

Органическая масса топлива дает представление о топливе без примеси золы, серы и влаги и помогает выяснить характер исходного вещества, происхождение топлива, геологический возраст ископаемых видов топлива и т. п.

Условно горючая масса характеризует горючую часть топлива.

Состав сухого топлива (высушенного до постоянного веса при 105—110°) служит характеристикой топлива, независимо от содержания влаги, которое может колебаться для одного и того же состава сухого топлива в широких пределах.

Состав рабочего топлива является наиболее исчерпывающей характеристикой топлива в том состоянии, в котором оно поступает непосредственно для сжигания. Во всех теплотехнических расчетах состав топлива принимается в рабочем состоянии[1].

Для обозначения состава, к которому относится содержание того или иного элемента в топливе, применяют индексы *о*, *г*, *с* и *р*. Например,

C^o — содержание углерода в органической массе,
$S^г$ — „ серы в условно горючей массе,
A^c — „ золы в сухом топливе,
W^p — „ влаги в рабочем топливе.

[1] Составы главнейших видов топлива приведены в приложении 1.

Количественное содержание отдельных составных частей в топливе всегда выражается в процентах, отнесенных к весу топлива:

$\%C^o + \%H^o + \%O^o + \%N^o = 100\%$ — органическая масса,
$\%C^z + \%H^z + \%O^z + \%N^z + \%S^z = 100\%$ — условно горючая масса,
$\%C^c + \%H^c + \%O^c + \%N^c + \%S^c + \%A^c = 100\%$ — сухое топливо,
$\%C^p + \%H^p + \%O^p + \%N^p + \%S^p + \%A^p + \%W^p = 100\%$ — рабочее топливо.

Наглядное представление об отдельных характеристиках состава топлива можно получить из схемы, приведенной в табл. 2.

Таблица 2

Схема характеристик состава топлива

Индексы	Составные части топлива			
	C H O N	S	A	W
o	органическая масса			
г	условно горючая масса			
c	сухое топливо			
p	рабочее топливо			

Зная состав органической массы и содержание балласта в рабочем топливе, можно выразить состав рабочего топлива в процентах, пользуясь следующими формулами для пересчета:

$$C^p = C^o \frac{100 - Б}{100},$$

$$H^p = H^o \frac{100 - Б}{100}, \quad (2)$$

$$O^p = O^o \frac{100 - Б}{100}, \quad (3)$$

$$N^p = N^o \frac{100 - Б}{100}, \quad (4)$$

где $Б = \%A^p + \%W^z$.

При помощи аналогичных формул можно пересчитать состав топлива с условно горючей массы на сухое топливо, с сухого топлива на рабочее и т. д.

Например, определим рабочий состав подмосковного угля, если условно горючая масса его имеет следующий состав: $C^г=69,7\%$; $H^г=4,9\%$; $O^г=18,9\%$; $N^г=1,4\%$; $S^г=5,1\%$; $W^р=32,0\%$; $A^р=18,2\%$. Определяем сначала содержание $Б$ в подмосковном угле: $Б=W^р+A^р=32,0+18,2=50,2\%$.

Подставляя затем данные величины в вышеприведенные формулы, получим:

$$C^р=C^г\frac{100-Б}{100}=69,7\frac{100-50,2}{100}=34,8\%,$$

$$H^р=H^г\frac{100-Б}{100}=4,9\cdot0,498=2,4\%,$$

$$O^р=O^г\frac{100-Б}{100}=18,9\cdot0,498=9,4\%,$$

$$N^р=N^г\frac{100-Б}{100}=1,4\cdot0,498=0,7\%,$$

$$S^р=S^г\frac{100-Б}{100}=5,1\cdot0,498=2,5\%,$$

$W^р=32,0\%$

$A^р=18,2\%$

Итого 100,0%

5. СОСТАВ ГАЗООБРАЗНОГО ТОПЛИВА

Газообразное топливо представляет собой смесь различных горючих и негорючих газов. В его состав могут входить следующие газы:

а) горючие—окись углерода CO, водород H_2, метан CH_4, этилен C_2H_4, этан C_2H_6, бутан C_4H_{10}, сероводород H_2S и другие;

б) негорючие — азот N_2 и углекислый газ CO_2.

В отличие от твердого и жидкого топлива состав газообразного топлива выражается в процентах по объему, а не по весу.

Газообразное топливо обычно содержит некоторые количества водяных паров и смолы, которые выражаются в граммах на 1 $м^3$ сухого газа.

Влажность газообразного топлива, например, генераторного газа из дров или торфа, может быть очень большой. Поэтому следует различать состав влажного и сухого газа. Так как влажность газа является весьма колеблющейся величиной, то наиболее постоянной характеристикой газообразного топлива служит состав сухого газа.

6. ТЕПЛОТВОРНОСТЬ ТОПЛИВА

Теплотворностью топлива[1] называется количество тепла, выделяющееся при полном сгорании единицы веса или объема топлива. При этом теплотворность твердого и жидкого топлива относят к 1 *кг*, а газообразного топлива—к 1 $м^3$.

Так как единицей измерения тепла в технике служит одна большая калория или килокалория, сокращенно обозначаемая *ккал*, то теплотворность твердого или жидкого топлива имеет размерность *ккал/кг*, а газообразного топлива—*ккал/м*^{3}.

Теплотворность отдельных видов топлива различна и находится обычно в пределах от 2 000 до 10 000 *ккал/кг*. Так, теплотворность горючих сланцев—около 2 000, дров—до 3 000, каменных углей—5 000—7 000, нефти—10 000 *ккал/кг*.

Для одного и того же вида топлива теплотворность может колебаться в широких пределах в зависимости от его влажности, зольности и других свойств. Например, теплотворность дров с влажностью 45% составляет около 2 000 *ккал/кг*, но при высыхании их до влажности 25% она возрастает до 3 000 *ккал/кг*.

Теплотворность обозначают буквой Q.

Теплотворность может быть отнесена к органической, горючей или рабочей массе топлива, ввиду чего к букве Q добавляется соответствующий индекс: *о*, *г*, *с* или *р*. Например: $Q^г$—теплотворность горючей массы, $Q^р$—теплотворность рабочего топлива и т. д.

Образующаяся при горении топлива влага может учитываться в продуктах горения в виде жидкости или пара, в связи с чем различают верхний и нижний пределы теплотворности топлива.

Если влага учитывается в виде жидкости, то получается верхний предел теплотворности; при учете же влаги в продуктах горения в виде пара получается нижний предел теплотворности, так как превращение воды в пар, требуя затраты тепла, снижает теплотворность топлива.

При испарении 1 *кг* влаги необходимо затратить 595 *ккал* (или, округляя, 600 *ккал*) на скрытую теплоту парообразования.

Если в топливе содержится H *кг* водорода, то при горении его образуется $9H$ *кг* H_2O, что потребует затраты $600 \times 9H$ *ккал* тепла.

Для испарения влаги W, содержащейся в топливе, также требуется затрата тепла.

Между верхним и нижним пределами теплотворности, обозначаемыми соответственно через $Q_в$ и $Q_н$, существует следующая зависимость:

$$\boxed{Q_н = Q_в - 600\,\frac{9H + W}{100}.} \qquad (5)$$

[1] Принятые ранее выражения—теплотворная способность и калорийность топлива в настоящее время не рекомендуются.

В теплотехнических расчетах обыкновенно применяется $Q_н$, так как в условиях обычного сжигания топлива влага уносится из топок и печей в виде водяного пара.

Теплотворность топлива может быть определена или вычислением на основании химического состава топлива, или экспериментально—путем сжигания небольшого количества топлива и пересчета выделенного количества тепла на 1 *кг* или на 1 $м^3$ данного топлива.

Определение теплотворности топлива расчетным путем

Наиболее распространенные формулы для определения теплотворности топлива по его химическому составу имеют следующий вид:

$$Q=\frac{q_C C+q_H H+q_S S}{100},$$

где: Q—теплотворность топлива в *ккал/кг*;

q_H, q_C и q_S —теплота горения 1 *кг* углерода, водорода и серы в *ккал*, с учетом эмпирических поправок на связанное, а не свободное состояние этих элементов в топливе;

C, H и S—содержание этих элементов в топливе в процентах.

Ввиду того, что форма химических связей между отдельными элементами в составе разных видов топлива неодинакова, эти формулы можно применять только для определения теплотворности тех видов топлива, к которым они относятся. Лишь некоторые формулы могут применяться с достаточной точностью для ряда топлив.

Для определения теплотворности твердого и жидкого топлива наиболее часто применяют формулу Д. И. Менделеева:

$$Q=81C+300H+26S-26O.$$

Коэффициенты 81, 300 и 26, стоящие перед C, H и S, выражают собой величину теплоты горения соответствующих элементов, деленную на 100.

Коэффициент 26, стоящий перед O, представляет собой так называемый «кислородный потенциал», т. е. число, учитывающее, по данным Д. И. Менделеева, насколько уменьшает теплотворность каждый процент содержащегося в топливе кислорода, находящегося в связанном состоянии с горючими элементами топлива.

Обычно формула Менделеева имеет следующий вид:

а) для верхнего предела теплотворности:

$$Q_в=81C+300H-26(O-S);$$

б) для нижнего предела теплотворности:

$$Q_н=81C+300H-26(O-S)-6(9H+W)$$

или после преобразования:

$$Q_н = 81C + 246\,H - 26\,(O - S) - 6\,W \text{ ккал/кг.} \qquad (6)$$

Пример. Определить по формуле Менделеева теплотворность каменного угля следующего состава: $C^p = 76{,}5\%$, $H^p = 4{,}4\%$, $O^p = 6{,}1\%$, $N^p = 1{,}0\%$, $S^p = 2{,}0\%$, $A^p = 5{,}0\%$, $W^p = 5{,}0\%$. $Q_н^p = 81 \cdot 76{,}5 + 246 \cdot 4{,}4 - 26\,(6{,}1 - 2{,}0) - 6 \cdot 5{,}0 = 7100$ *ккал/кг.*

Определение теплотворности топлива калориметрическим способом

Для определения теплотворности твердого и жидкого топлива служит так называемая калориметрическая бомба, представляющая собой цилиндрический толстостенный стакан из кислотоупорной стали емкостью около 300 *см*³ с герметически завинчиваемой стальной крышкой.

Определение теплотворности топлива состоит в том, что брикетированную навеску топлива, предварительно измельченного в порошок, весом 1,0—1,3 *г* помещают в калориметрическую бомбу, наполняют ее кислородом под давлением 20—25 *ат*, погружают в калориметр с водой и зажигают навеску при помощи электрического тока напряжением 12—15 *в*. Измеряя температуру воды калориметра перед зажиганием навески и по окончании опыта, вычисляют количество тепла, выделенного при сгорании навески топлива (рис. 1 и 2).

Подробное описание определения теплотворности в калориметрической бомбе излагается в руководствах по техно-химическому анализу топлива.

Теплотворность газообразного топлива может быть определена расчетным путем по формулам или непосредственно при помощи газового калориметра.

Горючими компонентами газообразного топлива являются CO, H_2, CH_4, C_2H_4, H_2S и др. Теплота горения, т. е. количество тепла, получаемого при сгорании 1 *м*³ этих газов:

CO	3020	*ккал/м*³
H_2	2580	»
CH_4	8550	»
C_2H_4	14100	»
H_2S	5530	»

Теплотворность газообразного топлива равна сумме теплоты горения отдельных составных частей его, умноженных на соответствующие количества их.

Для определения нижнего предела теплотворности газообразного топлива служит формула:

$$Q_н = \frac{3020CO + 2580H_2 + 8550CH_4 + 14100C_2H_4 + 5530H_2S}{100} \text{ ккал/м}^3, \quad (7)$$

где CO, H_2, CH_4, C_2H_4 и H_2S обозначают процентное содержание соответствующих горючих газов в газообразном топливе.

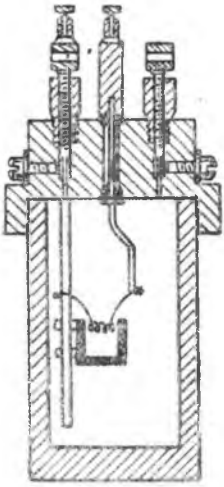


Рис. 1. Калориметрическая бомба.

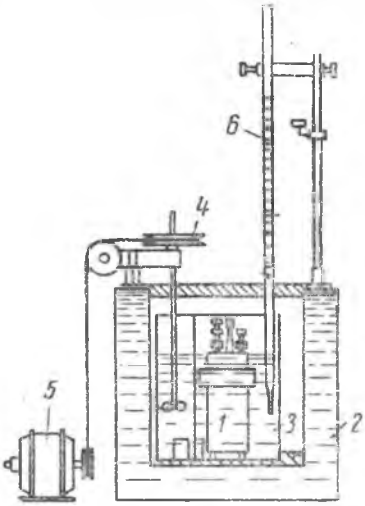


Рис. 2. Калориметрическая установка: *1*—калориметрическая бомба; *2*—калориметр; *3*—сосуд с водой; *4*—мешалка для перемешивания воды; *5*—электродвигатель для привода мешалки; *6*—термометр для измерения температуры воды.

Дрова, торф, каменный уголь, горючие сланцы, кокс, мазут, генераторный газ и другие виды естественного и искусственного топлива называют **натуральным топливом**. Для удобства сравнения теплотворности отдельных видов натурального топлива введено понятие об условном топливе.

Условным топливом называют такое топливо, при полном сжигании которого выделяется 7000 *ккал/кг* для твердого и жидкого топлива или 7000 *ккал/м*³ для газообразного топлива. Количество в 7000 *ккал/кг* принято потому, что важнейшие виды промышленного топлива, многие каменные угли и антрациты имеют теплотворность, близкую к 7000 *ккал/кг*.

Условное топливо является, таким образом, как бы эталоном, с которым сравнивают теплотворность любого натурального топлива.

БИБЛИОТЕКА Ленинградского 250247

Отношение теплотворности какого-либо натурального топлива к условному топливу представляет собой так называемый калорийный эквивалент.

Например, калорийный эквивалент для дров при $W^p = 25\%$ и $Q_н^p = 2920$ *ккал/кг* равен $\frac{2920}{7000} = 0{,}42$; калорийный эквивалент для генераторного газа из торфа при $Q_н^p = 1550$ *ккал/м*^{3} равен $\frac{1550}{7000} = 0{,}22$, и т. д.

7. РАЗЛОЖЕНИЕ ТОПЛИВА ПРИ НАГРЕВАНИИ

Если нагревать твердое топливо без доступа воздуха, то под действием температуры оно разлагается на летучие вещества (пары и газы) и твердый остаток (кокс).

Летучие вещества состоят из CO_2, CO, H_2, CH_4, других углеводородов, летучей серы и органических соединений со сложным молекулярным строением (смолы).

Кокс состоит, в основном, из углерода и незначительного количества прочих элементов топлива: H, O и N. Кроме того, в кокс переходит часть серы и зола топлива. Количество кокса, получающегося при разложении топлива (так называемый выход кокса), находится в обратной зависимости от количества выделившихся летучих веществ: чем больше летучих веществ выделяется при разложении топлива, тем меньше выход кокса, и наоборот.

Количество летучих веществ и выход кокса выражаются в процентах, составляя в сумме 100. Количество летучих обозначается $Л^г$, что выражает содержание горючих летучих веществ в топливе. Количество летучих горючих $Л^г$ является одной из важнейших характеристик топлива.

От содержания в топливе летучих веществ и выделения их при горении зависит характер горения топлива: топливо, содержащее много летучих, горит длинным пламенем; топливо с малым содержанием летучих, например, антрацит, является короткопламенным топливом.

Глава II

ВИДЫ ТОПЛИВА

1. ДРОВА

Советский Союз обладает огромными лесными богатствами. В ряде областей, особенно на севере, дрова служат топливом для промышленных и бытовых целей. Однако в топливном ба-

лансе страны в целом значение древесного топлива с каждым годом снижается за счет все возрастающей добычи торфа и ископаемых углей. Лес используется, главным образом, как строительный материал, а также как сырье для промышленной переработки.

В зависимости от породы деревьев различают дрова:

а) хвойные—сосновые, еловые;

б) лиственные—дубовые, березовые, ольховые, осиновые, буковые;

в) смешанные—хвойные и лиственные породы.

Химический состав всех древесных пород примерно одинаков, поскольку все древесные породы состоят в основном из клетчатки $(C_6H_{10}O_5)_x$.

Для теплотехнических расчетов можно принимать следующий средний состав условно горючей массы дров: $C^г = 50,\%$; $H^г = 6,3\%$; $O^г + N^г = 43,7\%$.

Содержание азота в дровах приводится обычно суммарно с кислородом, причем на долю азота приходится не более 1%.

Теплотворность горючей массы дров в среднем равна 4440 *ккал/кг*, а рабочей массы—2700—32 000 *ккал/кг* при влажности 25—35%.

Основными свойствами дров являются:

1) малое содержание золы и относительно высокая температура плавления ее;

2) сравнительно большая влажность;

3) отсутствие серы;

4) легкая воспламеняемость (около 300°).

Дрова являются длиннопламенным топливом, содержащим 80—85% летучих веществ, считая на органическую массу дров.

Зольность дров обычно не превышает 1,5—2%, причем зольность дров из ствола дерева меньше зольности ветвей, достигающей иногда 3—4%.

На зольность дров влияет способ их доставки—сплавные дрова имеют бо́льшую зольность, так как поры дерева засорены илом, песком и другими минеральными веществами.

Температура плавления золы дров выше 1200°. При сжигании зола дров не шлакуется.

Влажность дров значительна; она сильно влияет на их теплотворность.

Влажность дров колеблется в широких пределах, в зависимости от продолжительности хранения на лесосеках или складах и способа доставки. Сплавные дрова имеют более высокую влажность, чем дрова, доставляемые железнодорожным транспортом.

По ГОСТ 3243—46 на дрова, содержание влаги в дровах может выражаться в процентах абсолютной или относительной влажности (формулы для определения абсолютной и относи-

тельной влажности, а также для пересчета абсолютной влажности в относительную и обратно см. на стр. 208—210).

Дрова с влажностью (абсолютной) до 25% называются воздушно-сухими, так как содержание влаги в них при естественной сушке на складах обычно не уменьшается ниже этого предела; дрова с влажностью до 50% считаются полусухими, а с влажностью более 50%—сырыми.

В отличие от всех остальных видов твердого топлива дрова измеряются по объему, а не по весу, так как вес дров зависит от влажности, которая непостоянна. Вес 1 $м^3$ дров одинаковой влажности и укладки различен и зависит от породы дерева.

Абсолютно сухие дрова из различных древесных пород при нормальной плотности кладки весят: дубовые—400, березовые—350, сосновые—290, осиновые—270, еловые—250 $кг/м^3$.

Из сравнения веса 1 $м^3$ дров разных пород становится понятным, почему березовые, осиновые, еловые и другие дрова, обладающие почти одинаковой теплотворностью, расцениваются различно.

Так как теплотворность относится к 1 *кг*, а дрова измеряются по объему (причем вес 1 $м^3$ дров различен), количество тепла, заключенное в 1 $м^3$ различных пород дров, будет тем больше, чем больше вес 1 $м^3$ дров данной породы.

Зная вес 1 $м^3$ абсолютно сухих дров, можно вычислить вес 1 $м^3$ дров любой влажности по формуле:

$$G_x = G_0 \frac{100}{100 - W_x}, \qquad (8)$$

где: G_x—вес 1 $м^3$ дров с влажностью W_x в *кг*;
G_0 —вес 1 $м^3$ дров в абсолютно сухом состоянии в *кг*;
W_x—влажность дров в процентах.

Пример. Определить вес 1 $м^3$ березовых дров при влажности 30%.

Применяя формулу (8), получаем:

$$G_x = 350 \frac{100}{100 - 30} = 500 \text{ кг}.$$

Помимо дров, в качестве древесного топлива могут быть использованы различные отходы деревообрабатывающих производств и строительства: опилки, стружки, щепа, рейка и т. п. Все виды древесных отходов представляют собой технологическое топливо для сжигания в топках печей и сушилок на кирпичных, известковых и других заводах промышленности строительных материалов.

Состав древесных отходов при теплотехнических расчетах можно принимать таким же, как и для дров.

2. ТОРФ

По запасам торфа Советский Союз занимает первое место среди других стран мира. Торф залегает во многих районах средней и северной полосы Союза (на Урале, в Белоруссии, в Ивановской, Ярославской, Горьковской и других областях). Развитие торфяной промышленности у нас началось лишь после Великой Октябрьской социалистической революции.

Торф представляет собой продукт разложения различных растительных остатков во влажных условиях без доступа воздуха. Различают торф более раннего происхождения, называемый старым или зрелым торфом, и торф более позднего образования—молодой торф.

В зависимости от состава исходного растительного материала и условий образования торф делится на верховой (моховой) и низинный. Верховой торф образуется из различных мхов, главным образом из мха-сфагнума, в тех местностях, где гидрогеологические условия и рельеф местности благоприятствуют заболачиванию суши. Низинный торф образуется из болотных растений (осоки, камыша и т. п.) путем заторфовывания водоемов со стоячей водой. Верховой и низинный торфы несколько отличаются по своим свойствам один от другого.

Состав органической массы торфа зависит от степени его разложения: чем сильнее разложение, тем больше содержится в торфе углерода и меньше кислорода (табл. 3).

Таблица 3

Зависимость состава органической массы торфа (в %) и ее теплотворности от степени разложения торфа

Возраст торфа	C^o	H^o	O^o+N^o	Q^o, *ккал/кг*
Молодой	52	6	42	4800
Средний	58	6	36	5200
Старый	62	6	32	5800

Балласт торфа характеризуется значительной влажностью, что является наиболее отрицательным свойством торфа как топлива. Воздушно-сухому состоянию торфа отвечает содержание влаги 25—35%. Иногда приходится сжигать торф с влажностью до 50%.

Торф с большим трудом отдает влагу. Это объясняется наличием в нем коллоидов, способных поглощать большие количества воды и не отдавать ее при сушке.

Зольность торфа сравнительно невелика, в большинстве случаев она составляет от 5 до 10%. Зола верховых торфов относится преимущественно к среднеплавким (температура де-

формации от 1000 до 1200°), а зола низинных торфов—к легкоплавким (температура деформации до 1000°).

Содержание серы в торфе выражается десятыми долями процента. Практически можно считать, что торф—бессернистое топливо.

Теплотворность торфа в рабочем состоянии колеблется в пределах от 2500 до 3500 *ккал/кг*, в зависимости, главным образом, от влажности, зольности и степени разложения (рис. 3).

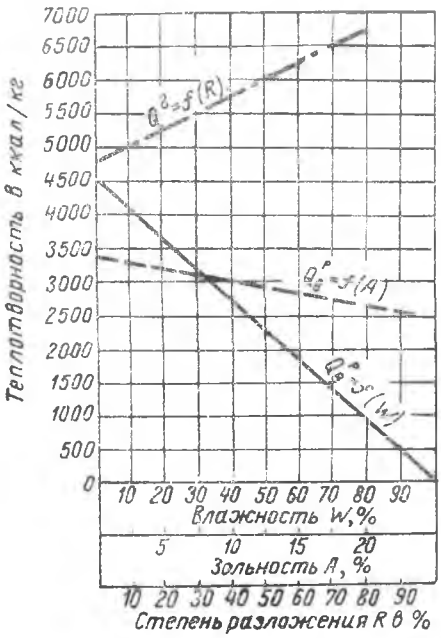


Рис. 3. Зависимость теплотворности торфа от влажности, зольности и степени разложения.

Торф — длиннопламенное топливо; он выделяет при горении до 75% летучих веществ, считая на органическую массу его.

Состав и теплотворность торфа для расчетов следует принимать по приложению I.

Торф делится на кусковой, состоящий из кусков размерами 300 × 100 × ×100 *мм*, и фрезерный, представляющий собой торфяную крошку.

Свойства торфа, главным образом его плотность, зависят от способа добычи. В настоящее время в СССР применяются лишь механизированные способы добычи торфа: гидравлический (гидроторф), фрезерный и машинно-формовочный. Первые два способа, наиболее совершенные, были разработаны у нас.

В. И. Ленин придавал особенное значение внедрению в торфяную промышленность новых способов торфодобычи и, в частности, гидроспособа. Сущность гидравлического способа, предложенного русским инженером Р. Э. Классоном во время первой мировой войны, состоит в следующем. Торфяную залежь размывают сильной струей воды под давлением в 25 *ат*. Образующуюся при этом жидкую гидромассу перекачивают особыми центробежными насосами, так называемыми торфососами, на поля сушки, где разливают по отдельным секциям—картам. После того как масса подсохнет и уплотнится, ее режут на отдельные торфины при помощи тракторов, имеющих на гусеничном ходу специальные формы; торфины укладывают в штабели, в которых они подвергаются дальнейшей сушке.

Фрезерный способ получения торфа разработан у нас в годы первой пятилетки. Он состоит в следующем. С осушенной поверхности торфяной залежи при помощи специальных машин, снабженных ножами—фрезами, снимают торфяную крошку. Ее оставляют на некоторое время на поле торфяника для естественной сушки, а затем собирают в штабели. Ввиду полной механизации процессов фрезерования, ворошения (для ускорения сушки), сгребания и штабелевки торфяной крошки, фрезерный способ добычи торфа является весьма экономичным.

Машинно-формовочный способ состоит в разработке торфяной залежи специальными машинами, напоминающими скребковые транспортеры, и формовке торфа в прессах, похожих по своему устройству на ленточные кирпичеделательные прессы. Машинно-формовочный способ в настоящее время имеет ограниченное применение вследствие большей трудоемкости по сравнению с гидравлическим и фрезерным способами добычи торфа.

Торф является местным топливом. Вследствие большого содержания балласта, малой прочности кусков и небольшого насыпного веса он не выдерживает дальних перевозок.

Торф широко используется в промышленности строительных материалов: фрезерный торф применяется при обжиге кирпича в кольцевых печах, кусковой торф—в топках полного и неполного горения, а также в газогенераторах.

3. ИСКОПАЕМЫЕ УГЛИ

Ископаемые угли являются главнейшим видом промышленного топлива. Значение угля для индустриального развития страны огромно.

Слово «уголь» служит синонимом энергии: гидравлическую энергию водопадов часто называют «белым углем», используемую энергию ветра—«голубым углем».

По запасам ископаемых углей Советский Союз занимает первое место в мире среди других государств. Важнейшим угольным бассейном страны является Донецкий, который содержит разнообразные по свойствам каменные угли и антрациты. Второе по значению место принадлежит Кузнецкому бассейну. По величине запасов—это первый каменноугольный бассейн в СССР и второй в мире. Третьей общесоюзной угольной базой является Карагандинский бассейн в Казахстане. Возрастает роль Печорского угольного бассейна. По своей близости к центральному промышленному району выделяется Подмосковный угольный бассейн[1].

---

[1] Подробнее о топливных ресурсах см. Н. Н. Баранский. Экономическая география СССР. Изд. 15. Учпедгиз, 1954.

В годы пятилеток разведано и освоено много новых угольных месторождений. Из года в год повышается добыча угля.

Для облегчения труда шахтеров и увеличения производительности труда проведена полная механизация подземных горных работ по добыче угля путем применения пневматических отбойных молотков, врубовых машин, угольных комбайнов, транспортеров и т. д.

Ископаемые угли—органического происхождения.

По современным представлениям в образовании земной коры большая роль принадлежала некоторым горючим горным породам, так называемым каустобиолитам[1], к которым относятся ископаемые угли, горючие сланцы и битумы. По виду исходного вещества каустобиолиты делятся на сапропелевые и гумусовые.

Сапропели образовались в отдаленные от нашей эпохи геологические периоды (каменноугольный и другие периоды Палеозойской эры) в результате отложения больших масс отживших простейших органических веществ, представлявших собой среднее между растительными и низшими животными организмами. Гумусовые вещества—продукты особого распада растительного материала.

Таким образом, исходными веществами при образовании каустобиолитов служили углеводы растительного происхождения и некоторые белковые и жировые вещества животного происхождения.

Изучение ископаемых углей под микроскопом позволяет видеть остатки растительной структуры этого вида горючего. Иногда даже простым глазом можно различить в угле отпечатки стеблей, листьев и других частей растений.

В зависимости от длительности пребывания в земле и условий образования залежи, степень разложения растительного остатка различна, чем в значительной мере и определяются свойства углей. Разложение характеризуется, в частности, содержанием углерода в составе углей: чем разложение сильнее, тем больше в угле углерода и тем меньше в нем кислорода. В зависимости от этого ископаемые угли делятся на три большие группы: бурые угли, каменные угли и антрациты.

Бурые угли. По времени образования бурые угли являются самыми молодыми из всех видов ископаемых углей. По содержанию углерода они занимают среднее место между торфом и каменными углями. Это видно из сопоставления содержания углерода и кислорода в органической массе этих видов топлива (табл. 4).

---

[1] Название каустобиолиты происходит от древнегреческих слов; kaustos—горючий, bios—жизнь и lithos—камень.

Таблица 4

Содержание углерода и кислорода в торфе, буром и каменном углях

Вид топлива	Содержание в %	
	C^o	C^o
Торф	55—60	35—40
Бурый уголь	65—75	17—28
Каменный уголь	75—90	5—15

В большинстве случаев бурые угли имеют землистый вид.

Отличия бурых углей от каменных следующие:

1) бурые угли дают на неглазурованной фарфоровой пластинке бурую (коричневую) черту, а каменные угли — черную;

2) при кипячении в слабом растворе щелочей бурые угли частично растворяются, окрашивая раствор.

Угли, не имеющие резкого различия в свойствах, называют переходными.

Бурые угли различных месторождений СССР имеют много общих свойств и обычно характеризуются:

а) высоким содержанием балласта: влаги, золы, а иногда и серы;

б) большим количеством летучих (свыше 40%);

в) склонностью к самовозгоранию при продолжительном хранении на складах;

г) способностью растрескиваться при долгом лежании на воздухе и крошится на мелкие куски.

Характерная особенность бурых углей—разница между теплотворностью горючей массы и рабочего топлива вследствие высокого содержания балласта. Например, для подмосковного угля $Q_н^г$=6300 *ккал/кг*, а $Q_н^р$ =3000 *ккал/кг*.

К бурым углям в СССР относятся: подмосковный, челябинский, богословский, барзасский и др.

В зависимости от величины кусков бурые угли делятся на следующие марки:

бурый крупный (БК) . . . >50 *мм*,
бурый орех (БО) . . 20—50 *мм*,
бурый мелкий (БМ) . . . <20 *мм*,
бурый рядовой (БР) . . . не сортированный

Бурые угли, в частности подмосковный и челябинский, широко применяются при производстве различных строительных материалов: при обжиге кирпича в кольцевых и других печах, для сжигания в пылевидном состоянии во вращающихся печах на цементных заводах и для газификации в газогенераторах.

Каменные угли. Состав и свойства каменных углей колеблются в широких пределах. В одном и том же каменноугольном

бассейне часто встречаются угли, резко отличающиеся по своим свойствам друг от друга. Общей классификации, охватывающей все каменные угли, не существует.

Наиболее хорошо изучены угли Донецкого каменноугольного бассейна (табл. 5). В основу их классификации положены выход летучих и кокса, а также его свойства.

Таблица 5

Классификация (маркировка) донецких каменных углей

Наименование угля	Марка	$Л^г$ в %	Свойства кокса
Длиннопламенный . . .	Д	42—47	Неспекшийся, порошкообразный или слипшийся
Газовый	Г	35—44	Спекшийся, сплавленный, иногда вспученный, плотный
Паровично-жирный . . .	ПЖ	26—35	Спекшийся, сплавленный, плотный или умеренно плотный
Коксовый	К	18—23	Спекшийся, плотный
Паровично-спекающийся	ПС	12—18	Спекшийся, сплавленный от плотного до умеренно плотного
Тощий	Т	< 17	Неспекшийся, порошкообразный или слипшийся

К маркам Д и Г относятся каменные угли с большим количеством летучих и малым выходом кокса. Угли марок ПЖ, К и ПС имеют меньшее количество летучих и дают больше кокса. Угли, принадлежащие к марке Т, по своим свойствам близки к антрацитам.

Название марок отражает либо поведение углей при горении (длиннопламенный, спекающийся), либо их целевое назначение (газовый, коксовый). Условные обозначения углей представляют собой начальные буквы наименования марок: Д—длиннопламенный, Г—газовый и т. д.

Для отнесения каменного угля к той или иной марке необходимо определить выход летучих и характер кокса. По этим данным можно установить марку угля и тем самым определить его пригодность для сжигания в различных печах и топках.

Характеристика углей отдельных месторождений СССР приведена в приложении I, составленном по данным Всесоюзного теплотехнического института имени Ф. Э. Дзержинского.

Антрациты представляют собой ископаемые угли с наибольшим содержанием углерода. Состав горючей массы донецких антрацитов достаточно постоянен и может быть выражен следующими величинами: $C^г = 93—97\%$; $H^г = 2—3\%$; $O^г + N^г = 2—4\%$; $S^г = 1,5—2,5\%$.

Состав рабочего топлива содержит: $W^р = 3—6\%$, $A^р = 4—17\%$.

Антрациты горят коротким пламенем, выделяя при сгорании мало летучих веществ: $Л^{г}$=3,5—7,0%. Антрациты не коксуются. Теплотворность их в рабочем состоянии близка к условному топливу: $Q^{р}_{н}$=6000—7000 *ккал/кг*.

Антрациты отличаются от каменных углей большей плотностью и блестящей поверхностью темносерого или черного цвета. Ввиду постоянства состава органической массы, классификация донецких антрацитов основана только на размерах кусков (табл. 6).

Таблица 6

Классификация (маркировка) донецких антрацитов

Наименование антрацитов	Марка	Величина кусков в *мм*
Антрацит плиточный	АП	>100
„ кулак	АК	50—100
„ орех	АО	25—50
„ мелкий	АМ	13—25
„ семечко	АС	6—13
„ штыб	АШ	<6
„ рядовой со штыбом (без плиты)	АРШ	<100

Донецкие антрациты можно длительное время хранить на складах, так как они не склонны к самовозгоранию; это объясняется их составом и плотностью.

В промышленности строительных материалов антрациты как короткопламенное топливо сжигаются, например, при пересыпном способе сжигания в шахтных известково-обжигательных печах, при обжиге кирпича в кольцевых печах, в пылевидном состоянии, в смеси с длиннопламенными углями—во вращающихся печах цементных заводов.

Антрациты применяются также для получения генераторного газа в газогенераторах.

4. ГОРЮЧИЕ СЛАНЦЫ

Горючие сланцы образовались путем пропитывания глинистых, мергелистых, известняковых и других горных пород продуктами разложения некоторых видов сапропелей и родственных им органических веществ.

Сланцы—многозольное топливо: в них содержится от 40 до 60% золы. Влажность сланцев невелика—4—5%.

Сланцы—длиннопламенное топливо. Содержание летучих в них достигает 70% и выше.

Состав горючей массы сланцев выражается в среднем следующими цифрами: $C^г = 65—75\%$; $H^г = 8—10\%$; $O^г = 15—20\%$; $N^г = 0,5—1,5\%$; $S^г = 1,5—4,5\%$.

Теплотворность горючей массы сланцев 6500—8000 *ккал/кг*, но теплотворность рабочего топлива вследствие огромного содержания золы равна лишь 1500—2000 *ккал/кг*.

Ввиду высокой зольности горючие сланцы являются местным топливом; они должны сжигаться или перерабатываться на сланцеперегонных заводах для получения жидкого искусственного топлива и горючих газов непосредственно в районах их добычи.

Горючие сланцы добываются, главным образом, в Среднем Поволжье, Ленинградской области и Эстонской ССР.

Горючие сланцы могут найти применение в качестве пылевидного топлива для отопления вращающихся печей в цементной промышленности, так как органическая часть сланцев используется здесь как топливо, а минеральная часть—зола—как добавка к обжигаемому в печах цементному клинкеру.

Горючие сланцы могут сжигаться также и в неразмолотом виде при обжиге кирпича в кольцевых печах.

5. ТОПОЧНЫЕ ШЛАКИ

Помимо описанных выше видов твердого топлива, в промышленности местных строительных материалов могут использоваться топливные отходы, в частности, котельный шлак, паровозная изгарь и другие, содержащие много несгоревшего углерода.

Содержание горючего вещества в шлаке может достигать 40%. Теплотворность шлака—от 2000 до 4000 *ккал/кг*. Такой шлак является достаточно хорошим топливом для обжига кирпича в кольцевых печах, где он сжигается в смеси с каким-либо длиннопламенным топливом, преимущественно с фрезерным торфом. Перед употреблением шлак дробится и просеивается.

Паровозная изгарь сжигается обычно в смеси с углями марок ПС, ПЖ и т. п.

6. ЖИДКОЕ ТОПЛИВО

Основными видами жидкого промышленного топлива служат продукты переработки нефти.

СССР является самой богатой нефтью страной на земном шаре. Главнейшие месторождения нефти в Советском Союзе находятся в Азербайджанской ССР, на Северном Кавказе, в районе городов Грозного и Майкопа, между Волгой и Уралом («Второе Баку»), в Западной Украине, Среднеазиатских республиках и других местах.

Дмитрий Иванович
МЕНДЕЛЕЕВ
(1834 — 1907)

В отличие от ископаемых углей, органическое происхождение которых научно доказано, на образование нефти нет еще общепринятого взгляда.

Теория происхождения нефти, предложенная Д. И. Менделеевым в 1877 г., заключается в следующем. Исходя из среднего удельного веса Земли, равного, примерно, 5,2, Д. И. Менделеев сделал вывод, что внутренние слои Земли, так называемая барисфера, состоят из расплавленных металлов (преимущественно железа), содержащих некоторое количество углерода, т. е. карбидов. При образовании горных хребтов морская вода по трещинам в земной коре (литосфере) проникала вглубь Земли и в результате взаимодействия с карбидами давала окислы металлов (руды), а также углеводороды, из которых и состоит нефть.

Газообразные углеводороды могли затем сгущаться в различных пустотах земной коры и образовывать нефтеносные пласты.

В настоящее время наибольшее признание имеет сапропелевая теория происхождения нефти, предложенная советскими учеными И. М. Губкиным, Г. Л. Стадниковым и др. По этой теории исходным веществом для образования нефти являлся сапропель — ил смешанного растительно-животного происхождения, образовавшийся из планктона[1] на дне водоемов и подвергшийся после своего отложения непрерывному процессу изменения, в результате которого сапропелевое вещество превратилось в нефть.

Однако все предложенные до сих пор теории происхождения нефти являются лишь более или менее вероятными гипотезами и не объясняют всех случаев образования нефти и различия в свойствах нефти отдельных месторождений.

Состав и свойства нефти. Нефть представляет собой смесь парафиновых (C_nH_{2n+2}), нафтеновых (C_nH_{2n}) и ароматических (C_nH_{2n-6}) углеводородов, которые могут находиться в различных соотношениях, отчего состав нефти не может быть выражен одной химической формулой. Кроме того, в нефти содержатся примеси кислородных, сернистых и азотистых соединений.

Элементарный химический состав нефти для большинства нефтяных месторождений, однако, довольно постоянен и при теплотехнических расчетах может быть принят следующим: C=83—87%; H=11—14%, O+N=0,5—3%.

Зольность нефтяного топлива ничтожно мала, так как минеральные вещества не растворяются в нефти; зольность нефтяного топлива, выражаемая долями процента (до 0,3%), вызывается загрязнением его механическими примесями при добыче, хранении и транспортировании.

Влажность нефтяного топлива тоже незначительна, так как нефть и продукты ее переработки не смешиваются с водой.

Сернистые примеси содержатся в нефти обычно также в малых количествах.

---

[1] Планктоном называют скопления простейших животных и растительных организмов, находящихся в водной среде во взвешенном состоянии.

Общее содержание балласта в нефтяном топливе не превышает 1%.

Теплотворность нефти—около 10 000 *ккал/кг* и выше.

Сырая нефть представляет собой весьма ценное сырье для получения ряда нефтепродуктов, применяемых для сжигания в двигателях самолетов, автомобилей и тракторов, для получения смазочных масел и других веществ. Д. И. Менделеев, много сделавший для развития нефтяной промышленности в России, говорил, что сжигать нефть целиком нельзя: «топить нефтью—топить ассигнациями[1]». Остающиеся после извлечения из нефти вышеуказанных веществ нефтяные остатки, называемые мазутом, используются как промышленное топливо.

Мазут. По внешнему виду мазут представляет собой черно-бурую жидкость с зеленоватым оттенком. В зависимости от содержания предельных или непредельных углеводородов, мазут делится на парафинистый и непарафинистый.

Элементарный химический состав мазута и его теплотворность мало отличаются от состава и теплотворности сырой нефти и для теплотехнических расчетов могут быть приняты такими же.

Для различных видов нефтепродуктов, в том числе и мазута, показателями свойств являются: удельный вес, вязкость, температура вспышки паров и температура застывания.

Удельный вес нефтепродуктов зависит от температуры кипения: чем выше температура кипения, тем больше удельный вес (табл. 7).

Таблица 7

Характеристика нефтепродуктов

Вид нефтепродукта	Температура кипения в град.	Удельный вес
Бензин	До 200	0,7
Керосин	250—300	0,8
Мазут	Свыше 300	0,9

Вязкость характеризуется отношением времени истечения известного количества нефтепродукта ко времени истечения воды в тех же условиях.

Температура вспышки паров представляет собой температуру, при которой пары горючей жидкости, находящиеся над ее поверхностью, вспыхивают от поднесения к ним открытого пламени, но сама жидкость при этом не воспламеняется. Эта температура является важной характеристикой нефтепродуктов в пожарном отношении.

Температура застывания—температура, при которой мазут вследствие увеличения вязкости при охлаждении те-

[1] Люди русской науки. Т. I. Гос изд. технико-теоретич. литер. 1948. стр. 307.

ряет способность изменять положение своей поверхности при наклонении сосуда, в котором он находится.

Температура застывания мазута имеет большое практическое значение: застывший мазут нельзя транспортировать по трубопроводам и наполнять им цистерны и резервуары.

Температура застывания мазута тем выше, чем больше в нем парафиновых, т. е. предельных углеводородов (табл. 8).

Таблица 8

Показатели свойств топливного мазута (по ГОСТ 1501—52)

Показатели	Марка мазута				
	20	40	60	80	100
Вязкость (условная) при 80°, в пределах	2,5—5,0	5,0—8,0	8,0—11,0	11,0—13,0	13,0—15,5
Температура вспышки паров, определяемая в открытом тигле в град., не ниже	80	100	110	120	125
Температура застывания в град., не выше	+5	+10	+15	+20	+25
Содержание серы в %, не более:					
а) в малосернистом мазуте	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
б) в сернистом „	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
в) в высокосернистом мазуте	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5

Описание методов испытания нефтепродуктов и приборов для этого приводится в руководствах по техно-химическому анализу топлива.

Возрастающая потребность в нефтяном, главным образом, легком моторном топливе и необходимость рационального использования имеющихся нефтяных запасов заставляют заменять нефтяное топливо в промышленности другими видами топлива. Заменителями нефтяного топлива являются пылевидное и газообразное топливо.

В последнее время освоено получение искусственного жидкого топлива из каменных углей путем гидрирования их (т. е. присоединения водорода к углероду) и непосредственного синтеза так называемого синтина (синтетического бензина) из водяного генераторного газа.

Применение нефтяного топлива в промышленности строительных материалов ограничивается лишь несколькими цементными заводами, где оно сжигается во вращающихся печах. В остальных случаях применение нефтяного топлива носит временный характер, так как в недалеком будущем все отапливаемые нефтяным топливом печи подлежат переводу на пылевидное или газообразное топливо.

7. ПЫЛЕВИДНОЕ ТОПЛИВО

Пылевидное топливо—главнейший вид топлива в цементной промышленности, где оно в конце прошлого столетия впервые было применено для сжигания во вращающихся печах. В настоящее время пылевидное топливо в больших количествах сжигается также в топках паровых котлов электрических станций.

Пылевидное топливо получается путем размола ископаемых углей или горючих сланцев.

Сжигание топлива в виде пыли имеет следующие преимущества перед сжиганием его в виде кусков:

1) быстрое и полное сгорание вследствие хорошего перемешивания пылевидного топлива с воздухом;

2) высокую температуру горения благодаря малому избытку воздуха, обеспечивающего полноту сгорания;

3) удобство обслуживания топок и печей вследствие легкости регулирования процесса горения;

4) возможность наиболее эффективного использования низкосортных видов топлива (многозольные угли, горючие сланцы).

Пылинки угля имеют различные размеры и форму. Величина отдельных пылинок не превышает обычно 300 микрон, т. е. 0,3 *мм*. Размеры большинства пылинок лежат в пределах от 20 до 50 микрон.

Пылевидное топливо имеет огромную суммарную поверхность. Приближенное представление об увеличении суммарной поверхности частиц угля при размоле может дать следующий пример. Если взять частицу угля в форме куба с ребром, равным 1 *см*, и подвергнуть ее измельчению так, чтобы эта частица постепенно превращалась в меньшие частицы, но той же формы, то легко вычислить, что количество частиц и суммарная поверхность их будут возрастать в такой зависимости:

Размер частиц в *см*	Число частиц	Суммарная поверхность частиц в $см^2$
1	1	6
0,1	1 000	60
0,01	1 000 000	600
0,001	1 000 000 000	6000

В действительности увеличение суммарной поверхности при измельчении происходит в еще большей степени, так как пылинки обладают неправильной, часто продолговатой формой, при которой отношение поверхности к объему всегда больше, чем у частиц кубической формы. Кроме того, частицы угля имеют поры, что еще больше увеличивает их общую поверхность.

Из курса химии известно, что чем больше поверхность соприкосновения реагирующих веществ в химических реакциях,

тем больше скорость этих реакций при прочих равных условиях. Быстрота сгорания топлива в пылевидном состоянии объясняется именно широко развитой суммарной поверхностью его частиц.

Тонкость размола угля характеризуется обычно остатком его на сите, через которое его просеивают. Размер сита выражается наибольшей величиной частиц угля в микронах, проходящих через сито, или же числом отверстий в 1 $см^2$ сита. Например, сито № 200 соответствует величине частиц до 200 микрон, сито № 90 пропускает частицы размером до 90 микрон.

Тонкость размола зависит от количества горючих летучих веществ и золы в угле; угли с небольшим содержанием летучих, т. е. короткопламенные, должны подвергаться более тонкому размолу, чем длиннопламенные.

Многозольные угли требуют большей тонкости размола. Тонкость размола принимается в 12—15% остатка на сите № 90 для топлива с большим количеством летучих и малой зольностью и в 5—7% остатка на том же сите для многозольного топлива (сланцы).

Приготовление угольной пыли состоит из дробления, сушки и размола угля. Для получения угольной пыли на заводах применяются две системы пылеприготовления:

а) центральная и

б) индивидуальная.

При центральной системе угольная пыль приготовляется для всех печей в одном месте и затем подается к отдельным печам—потребителям пылевидного топлива.

Индивидуальная система пылеприготовления состоит в установке углеразмольных мельниц непосредственно у каждой печи в отдельности. Индивидуальные установки пылеприготовления могут работать с замкнутым или разомкнутым циклом.

Индивидуальные установки с замкнутым циклом пылеприготовления эффективно применять для размола углей с влажностью не выше 10—15%. При большой влажности углей производительность индивидуальных мельниц резко падает, а условия сжигания пыли в топках и печах ухудшаются вследствие недостаточного количества и высокой влажности вдуваемой в печь пылевоздушной смеси.

Поэтому для углей с влажностью более 15% следует отдавать предпочтение углеразмольным установкам с разомкнутым циклом.

На большинстве существующих цементных заводов применяется центральная система пылеприготовления, а на вновь строящихся заводах преимущественно предусматриваются индивидуальные размольные установки для угля. В установках этого типа происходит совместно размол и сушка угля в мельнице, благодаря чему процесс пылеприготовления делается более простым и экономичным.

Централькая система пылеприготовления. Получение угольной пыли на цементных заводах при центральной системе пылеприготовления производится в специальных цехах, расположенных обычно в отдельных зданиях и оборудованных установками для дробления, сушки и размола угля.

Предварительное грубое измельчение необходимо в тех случаях, когда уголь имеет размер кусков больше 20 *мм*.

Дробление угля производится в вальцовых или молотковых дробилках. Вальцовая дробилка с зубчатыми вальцами представлена на рис. 4. Раздвигая вальцы, можно изменять степень измельчения угля.

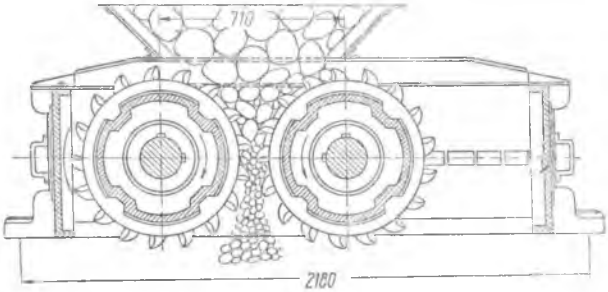


Рис. 4. Вальцовая дробилка для измельчения угля.

Перед размолом топливо подсушивается до влажности 2—5%; при большей влажности топливо плохо поддается размолу, забивая отверстия сит мельницы.

Для сушки угля применяют сушильные барабаны, обогреваемые дымовыми газами и работающие по принципу прямотока, заключающегося в том, что горячие газы поступают в барабан с той же стороны, что и уголь и движутся внутри барабана параллельно (подробнее о сушильных барабанах см. раздел VII «Сушка и сушилки»).

Применение противоточных сушильных барабанов, в которых горячие газы и уголь движутся в противоположных друг другу направлениях, для сушки угля нежелательно. В этих барабанах газы с наиболее высокой температурой встречаются с подсушенным уже углем, вследствие чего возможно выделение из него летучих.

Предварительная сушка угля, помимо улучшения условий размола, увеличивает также теплотворность его за счет испарения влаги и тем самым повышает температуру горения угольной пыли в печах.

Размол высушенного угля производится в мельницах разных конструкций. Выбор типа углеразмольных мельниц зависит от физико-механических свойств топлива и потребности печей в пы-

левидном топливе. Основными условиями, определяющими выбор типа углеразмольной мельницы, являются производительность, тонкость размола угля, простота эксплуатации и ремонта, удельный расход электроэнергии, возможность подсушки угля в процессе размола.

Наибольшее распространение имеют шаровые мельницы, как наиболее универсальные и надежные агрегаты. Вместе с этим шаровые мельницы характеризуются большим удельным расходом электроэнергии на размол угля и большими габаритными размерами сравнительно с мельницами других типов. Они предназначены, главным образом, для размола твердых углей.

Барабанно-шаровая мельница состоит из цилиндрического барабана, выложенного внутри стальными плитами и заполненного приблизительно на $^1/_4$—$^1/_3$ своего объема стальными шарами диаметром 100—150 *мм*. Мельница делает 21—25 оборотов в минуту. Загрузка мельницы углем и выгрузка из нее угольной пыли производятся непрерывно с противоположных сторон через полые цапфы.

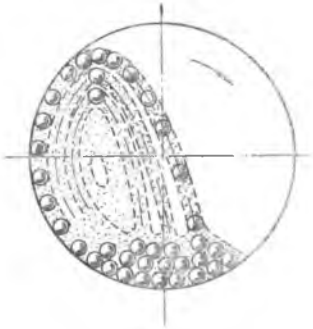


Рис. 5. Движение шаров в шаровой мельнице.

Размол угля в шаровой мельнице (рис. 5) происходит следующим образом. При вращении мельницы шары поднимаются на некоторую высоту, а затем под действием силы тяжести падают вниз, разбивая при этом куски угля. Уголь измельчается главным образом под ударами падающих шаров. Шаровые мельницы относятся к тихоходным. При увеличении их числа оборотов сверх указанного, шары и уголь вследствие большой центробежной силы будут полностью вращаться вокруг оси мельницы, и размола не произойдет.

В зависимости от необходимой тонкости размола и производительности применяются одно-, двух- и трехкамерные шаровые мельницы. В последних двух типах барабан мельницы делится по его длине поперечными дырчатыми перегородками на две или три камеры. В некоторых мельницах наряду с размолом происходит и сушка угля. На рис. 6 показана шаровая мельница, применяемая для размола и сушки угля.

Кроме шаровых мельниц для размола угля могут применяться аэробильные и другие быстроходные мельницы.

Полученная угольная пыль транспортируется к печам для сжигания при помощи пыленасосов (рис. 7), которые работают следующим образом. Через загрузочную воронку пыль попадает в быстро вращающийся шнек (750—1450 об/мин), который продвигает пыль, одновременно уплотняя ее. При выходе из насоса пыль смешивается со сжатым до 20 *ат* воздухом, который

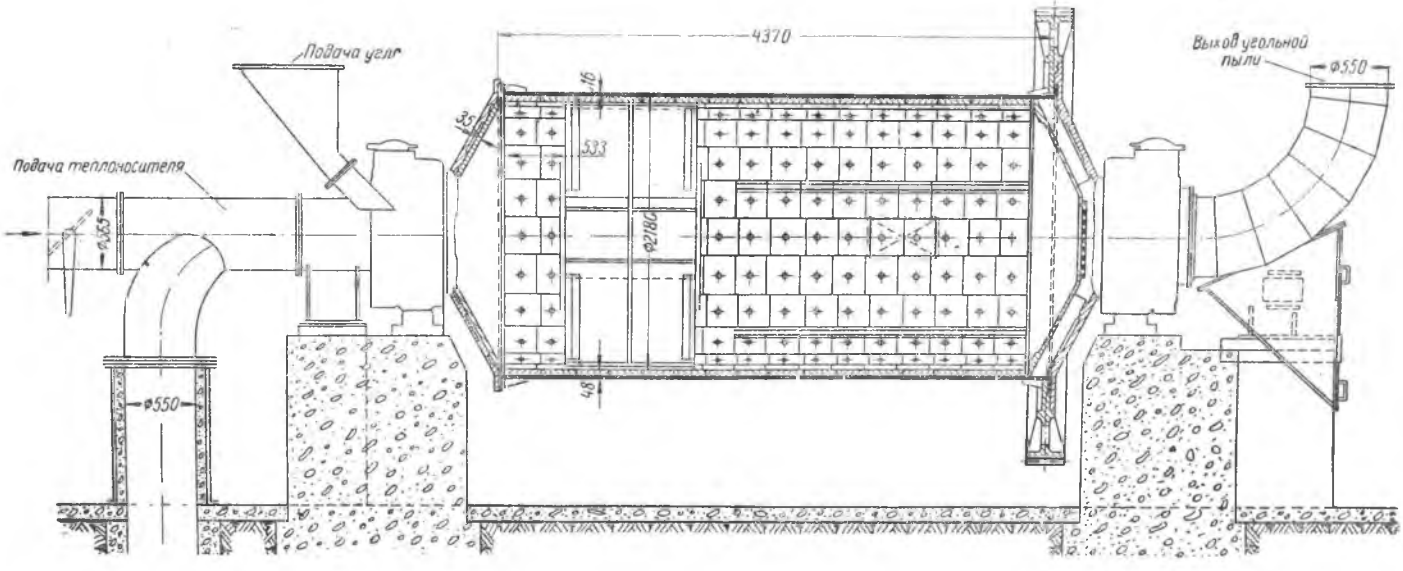


Рис. 6. Шаровая мельница для сушки и размола угля.

поступает через отверстия, расположенные по окружности корпуса шнека. При смешении угольной пыли с воздухом пылевоздушная смесь приобретает свойство текучести, благодаря чему может передаваться по трубопроводам.

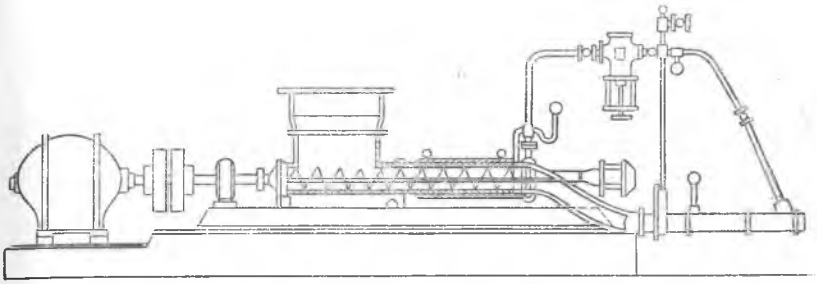


Рис. 7. Пыленасос для подачи угольной пыли к печам.

Для образования некоторого запаса пыли перед печами обычно устанавливают бункеры.

На рис. 8 приведена схема пылеприготовления с раздельным размолом и сушкой угля.

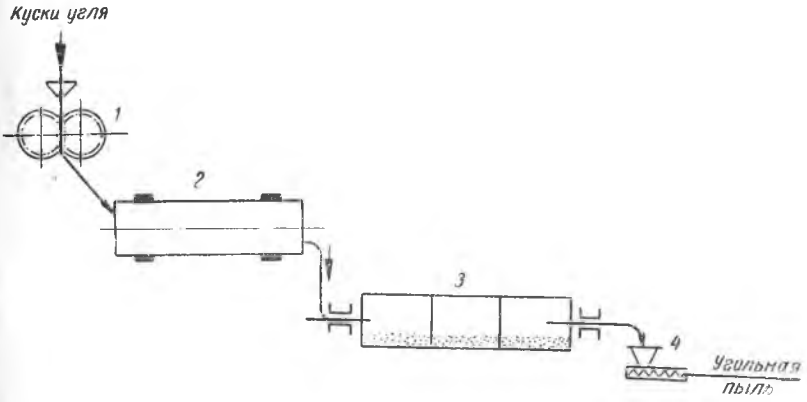


Рис. 8. Схема пылеприготовления с раздельным размолом и сушкой угля: *1*—вальцовая дробилка; *2*—барабанная сушилка; *3*—шаровая мельница; *4*—пыленасос.

Индивидуальная система пылеприготовления. Основным агрегатом такой системы является мельница, в которой одновременно с размолом происходит и сушка угля. Для этого используется горячий воздух, отбираемый из вращающейся печи, или дымовые газы, получаемые в специальной топке.

На рис. 9 представлена схема индивидуальной пылеприготовительной установки. Горячий воздух из вращающейся печи *1* поступает в шаровую мельницу *2*, куда подается уголь. В мельнице происходит сушка и размол угля. Угольная пыль уносится из мельницы воздушным потоком за счет разрежения, создаваемого вентилятором *3*. Для добавки в систему свежего воздуха служит дроссель *4*. Пылевоздушная смесь поступает в пылеотделитель-циклон *5*, в котором из нее выделяется угольная пыль.

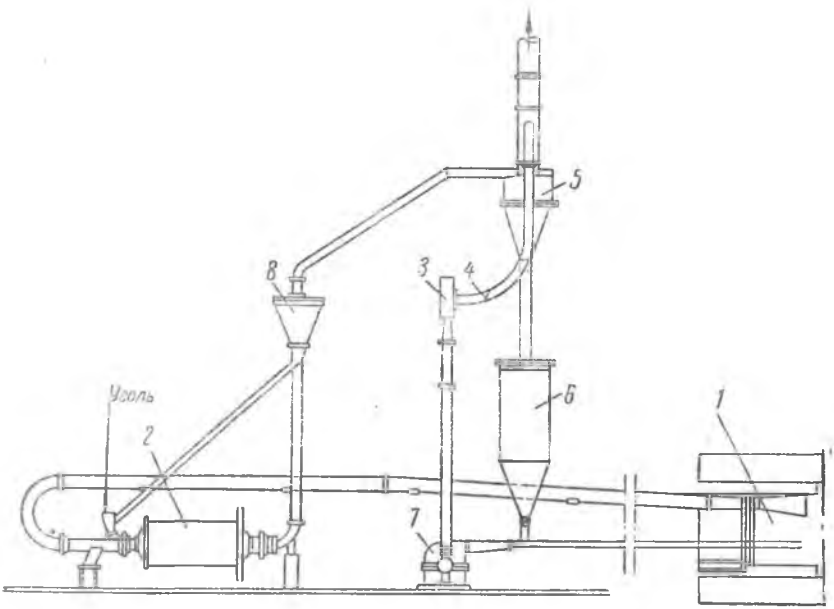


Рис. 9. Схема пылеуглеприготовительной установки для вращающейся печи.

Из циклона пыль попадает в бункер *6* и вентилятором *7* вдувается во вращающуюся печь для сжигания. Сепаратор *8* служит для улавливания крупной пыли и возвращения ее на повторный размол в мельницу.

Угольная пыль при некоторых условиях взрывоопасна, поэтому при эксплуатации пылеприготовительных установок необходимо соблюдать предохранительные меры против взрывов пыли.

В холодном состоянии угольная пыль, смешанная с воздухом, не взрывается от искры при ударе металлических частей в мельнице друг о друга (например, при ударе шаров о броневые плиты мельницы). Взрыв может произойти, если в мельнице, пылеугольных бункерах или пылепроводах образуются по ка-

кой-либо причине продукты разложения угля, т. е. газовоздушная смесь, которая может взрываться при определенной концентрации и температуре. Чтобы обеспечить безопасность работы, необходимо соблюдать установленную температуру, очищать пылепроводы от отложений пыли. Кроме того, пылеприготовительные установки должны иметь предохранительные клапаны против взрывов (рис. 10).

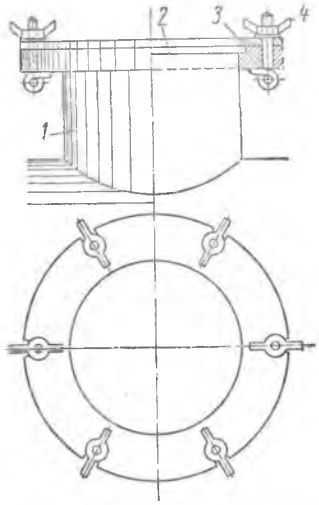


Рис. 10. Предохранительный клапан от взрывов пыли: *1*—штуцер; *2*—металлическая диафрагма; *3*—шайба; *4*—барашки.

8. ТОПЛИВНЫЕ БРИКЕТЫ

Одним из способов использования некоторых топливных отходов является брикетирование их и сжигание в виде брикетов.

Брикетирование производится путем прессования топливной мелочи в гидравлических прессах при давлении до 100 *ат* и выше с добавкой каменноугольного пека (или другого связующего вещества) или без добавки.

Брикеты имеют вид небольших кирпичиков, чаще всего овальной формы. Брикеты из бурых углей могут долго храниться, не подвергаясь разрушению.

Брикетированию могут подвергаться угольная и торфяная мелочь, древесные опилки, хвоя и тому подобные вещества.

Другим способом и с иной целью осуществляется брикетирование в цементной промышленности. Обжиг клинкера в шахтных печах производится в виде так называемого черного брикета, который получается путем совместного размола и прессования пылевидного угля и сырьевой смеси.

Топливом при изготовлении черного брикета являются обычно антрацит или тощие сорта углей. Содержание топлива в брикетах составляет 10—15%.

При использовании черного брикета обжиг становится более равномерным и повышается качество цементного клинкера.

9. ГАЗООБРАЗНОЕ ТОПЛИВО

Газообразное топливо, по сравнению с твердым, имеет следующие преимущества:

а) не содержит золы, благодаря чему не загрязняет золой обжигаемый материал при непосредственном соприкосновении его с топливом;

б) легко сжигается, поэтому на обслуживание газовых топок затрачивается меньше труда, чем на обслуживание топок для сжигания твердого топлива;

в) при сжигании создается более высокая температура благодаря меньшему количеству воздуха, необходимого для полноты горения, и лучшему смешению с воздухом, (см. раздел II, стр. 52);

г) легко транспортируется по трубам.

По происхождению газообразное топливо делится на естественное (природный газ) и искусственное (генераторный, доменный, коксовый и другие горючие газы).

Природный газ. В некоторых пластах земной коры, преимущественно вблизи нефтяных месторождений, образуются значительные количества горючего газа, называемого природным или естественным.

В СССР природный газ встречается на Кавказе, в Саратовской области, в Западной Украине, в Коми АССР и других районах.

Природный газ может использоваться непосредственно в местах его выделения из недр земли или передаваться по трубопроводам на большие расстояния. Например, газопровод Саратов—Москва, сооруженный в 1945—1946 гг., имеет длину около 850 *км* и состоит из труб диаметром 300 *мм*. Компрессорные станции, перекачивающие газ, повышают его давление до 50 *ат*. Газопровод Дашава—Киев имеет длину свыше 500 *км*.

Природный газ представляет собой высококалорийное и вместе с тем очень дешевое газовое топливо. Он состоит в основном из метана (CH_4), содержание которого в большинстве случаев достигает 90% и выше. Теплотворность природного газа составляет 7500—9000 *ккал/м*^{3}.

Природный саратовский газ имеет следующий средний состав: CH_4—93,0—94,0%; C_mH_n—3,0%; CO_2—0,2—0,3%; N_2—3,0—3,5%. Его теплотворность равна 8400—8500 *ккал/м*^{3}.

Природный газ сжигается в топках паровых котлов, промышленных печах, а также применяется для бытовых целей.

В промышленности строительных материалов природный газ применяется на стекольном заводе «Дагестанские огни», Бакинском цементном заводе и других предприятиях для отопления заводских печей.

Искусственные горючие газы. Из всех видов газообразного топлива наибольшее значение для промышленности строительных материалов имеет генераторный газ.

Процесс получения генераторного газа из твердого топлива (дров, торфа или ископаемых углей) называется газификацией топлива. Сущность процесса газификации состоит в неполном сжигании кускового топлива при недостатке воздуха. Газификация твердого топлива производится в особых установках—газогенераторах.

Распространенность генераторного газа объясняется тем, что его можно получать непосредственно на тех заводах, где он необходим, тогда как доменный, коксовый и прочие горючие газы, являющиеся побочными продуктами других производств, могут быть получены лишь от металлургических, коксовых или иных заводов.

Генераторный газ имеет ряд разновидностей: воздушный, паровоздушный (смешанный), водяной и двойной газы (последние два газа имеют специальное назначение).

Помимо газификации в газогенераторах, превращение угля в горючий газ возможно в угольных пластах, залегающих в недрах земли.

Идея подземной газификации угля была выдвинута Д. И. Менделеевым в конце прошлого столетия: «... пробурив в пласту несколько отверстий,—писал Менделеев,—одно из них должно назначить для введения—даже вдувания воздуха, другие для выхода—даже вытягивания горючих газов, которые затем легко перевести даже на далекие расстояния к печам»[1].

В. И. Ленин в статье «Одна из великих побед техники», опубликованной в 1913 г. в «Правде», писал, что подземная газификация угля должна произвести огромный переворот в промышленности[2].

Однако в капиталистических условиях решение этой проблемы оказалось непосильной задачей. Лишь в СССР в годы первой пятилетки была впервые практически осуществлена подземная газификация угля.

Средний состав газа при подземной газификации угля (в %):

$$CO_2=8,\ CO=18,$$
$$CH_4=4,\ H_2=18,$$
$$N_2=52,\ Q_н^р=1400\ ккал/м^3.$$

Ввиду широкого применения генераторного газа в промышленности строительных материалов, вопросам газификации топлива в газогенераторах в этой книге посвящен особый (VI) раздел.

Доменный, коксовый и другие искусственные горючие газы имеют значительно меньшее значение для промышленности строительных материалов, чем генераторный газ. Доменный газ образуется при выплавке чугуна из руды в доменных печах. Коксовый газ получается при коксовании каменных углей.

Теплотворность доменного газа 800—1000 *ккал/м*^{3}, коксового газа—4000—4500 *ккал/м*^{3}.

---

[1] Д. И. Менделеев. Соч. Изд. АН СССР, т. XII, 1949, стр. 542.
[2] В. И. Ленин. Соч., т. 19, стр. 41—42.

Глава III

ХРАНЕНИЕ ТОПЛИВА

Топливо хранится на заводах строительных материалов на специально устроенных складах.

При устройстве складов топлива надо исходить из необходимого для завода запаса топлива и рационального размещения его на складе в целях удобства погрузочно-разгрузочных работ, а также соблюдения противопожарных требований. Запасы топлива на складах делаются обычно на 1—2 месяца работы завода.

В зависимости от географических условий, времени года и способа доставки запасы топлива могут быть увеличены, чтобы обеспечить бесперебойное снабжение производства топливом. Например, в местностях, где зимой бывают продолжительные метели и снежные заносы, запасы торфа на складах делают на 3—4 месяца. При сплавном способе доставки дров их запас может достигать годовой потребности.

Дровяные склады. Дрова на складах укладывают в поленницы и штабели. Плотность кладки, т. е. количество древесной массы в поленницах, должна быть равной примерно $^2/_3$ объема кладки.

Плотность кладки дров зависит от: толщины поленьев—чем толще поленья, тем больше древесины содержится в кладке; длины поленьев—короткие дрова можно уложить плотнее, чем длинные; чистоты обрубки сучьев и ветвей; способа укладки.

Две или несколько поленниц, уложенных рядом, составляют дровяной штабель. Дровяные штабели не должны быть выше 2—3 *м*, длина штабелей не должна превышать 20 *м*. Между штабелями дров надо оставлять проходы шириной не менее 1 *м* и пожарные проезды.

По отношению к рельсовым подъездным путям штабели дров располагаются перпендикулярно. Это облегчает работу на складе.

Склады торфа. Торф хранится на складах также в штабелях; укладка производится вручную или при помощи штабелевочных машин.

Во избежание самовозгорания торфа не допускается совместное хранение в штабеле кускового и фрезерного торфа, а также сухого торфа с плохо подсушенным.

Угольные склады. Угольные штабели имеют форму усеченной пирамиды с прямоугольным основанием. Размеры штабелей различны и зависят, в основном, от количества угля, находящегося на складе, и склонности его к самовозгоранию; чем меньше эта склонность, тем выше могут быть штабели (табл. 9).

По степени пожарной опасности ископаемые угли делятся на две категории:

А — опасные в отношении самовозгорания (бурые и каменные угли, за исключением тощих) и

Б — устойчивые в отношении самовозгорания (тощие каменные угли и антрациты).

Таблица 9

Допускаемая высота угольных штабелей на заводских складах

Категория угля	Наименование угля	Высота штабелей в *м* при хранении сроком	
		до 2 месяцев	свыше 2 месяцев
А	Бурые угли	2,0—2,5	1,5—2,0
А	Каменные угли, кроме тощих	2,5—3,5	2,0—2,5
Б	Тощие каменные угли	3,5	2,5
Б	Антрациты	Не ограничивается	

Транспортирование углей по железным дорогам производится обычно в саморазгружающихся вагонах, позволяющих легко и быстро выгружать из них уголь.

Для облегчения штабелевания угольные склады оборудуются транспортерами, грейферами и другими подъемно-транспортными механизмами.

В ряде случаев на складах топлива производится сортировка (грохочение) рядовых, преимущественно бурых углей для отсеивания мелочи.

Противопожарные мероприятия на складах топлива[1]. Склады топлива должны устраиваться и содержаться согласно требованиям противопожарной охраны, главнейшими из которых являются:

а) соблюдение установленных размеров штабелей и разрывов между ними;

б) систематический контроль за температурой штабелеванных углей и торфа;

в) устройство на складе противопожарного водопровода и электрической сигнализации, автоматически действующей при повышении температуры в штабелях выше допустимого предела.

ЗАДАЧИ К ПЕРВОМУ РАЗДЕЛУ

1. Определить состав рабочей массы дров, если состав органической массы и балласта выражается следующими величинами: $C^o = 50\%$; $H^o = 6\%$; $O^o + N^o = 44\%$; $A^p = 1{,}5\%$; $W^p = 30\%$.

2. Пересчитать состав сухой массы торфа на рабочее топливо, если влажность торфа составляет 40%, а состав сухой массы: $C^c = 54{,}4\%$ $H^c = 5{,}4\%$; $O^c = 28{,}8\%$; $N^c = 1{,}8\%$; $A^c = 10\%$.

3. Пересчитать состав донецкого антрацита с горючей массы на рабочее топливо: $C^z = 93{,}80\%$; $H^z = 1{,}95\%$; $N^z = 1{,}20\%$; $S^z = 2\%$; $O^z = 1{,}05\%$. Балласт: $A^p = 9{,}2\%$; $W^p = 5{,}5\%$.

[1] Подробнее о мерах пожарной безопасности на складах топлива см. К. Н. Архипов и А. А. Белоус. Пожарная безопасность на предприятиях промышленности строительных материалов. М., Промстройиздат, 1953.

4. Определить A^p торфа, если $A^c = 10\%$, а $W^p = 35\%$.

5. Построить график зависимости теплотворности торфа от изменения его влажности для значений W^p: 20%, 30%, 40%, 50%, если состав торфа: $C^z = 58{,}3\%$; $H^z = 5{,}8\%$; $O^z = 33\%$; $N^z = 2{,}6\%$; $S^z = 0{,}3\%$; $A^c = 8{,}5\%$.

6. Сравнить значения теплотворности горючей, сухой и рабочей масс кузнецкого каменного угля следующего состава: $C^z = 79{,}1\%$; $H^z = 5{,}6\%$; $O^z = 12{,}9\%$; $N^z = 2{,}1\%$; $S^z = 0{,}3\%$; $A^p = 8{,}2\%$; $W^p = 9\%$.

7. Определить теплотворность мазута, если $C = 86{,}6\%$; $H = 13\%$; $O + N = 0{,}4\%$.

8. Определить низшую теплотворность рабочей массы челябинского угля, если теплотворность горючей массы 7100 *ккал/кг*; $H^p = 5{,}2\%$; $A^p = 15{,}6\%$; $W^p = 19\%$.

9. Определить теплотворность генераторного газа из торфа следующего состава: $CO_2 = 7{,}29\%$; $CO = 28{,}05\%$; $CH_4 = 2{,}77\%$; $C_2H_4 = 0{,}38\%$; $H_2 = 17{,}44\%$; $N_2 = 43{,}73\%$; $O_2 = 0{,}34\%$.

10. Определить теплотворность природного газа следующего состава, применяемого на стекольном заводе «Дагестанские огни» для отопления печей: $CH_4 = 87{,}6\%$; $C_2H_4 = 3{,}8\%$; $CO_2 = 7{,}9\%$; $N_2 = 0{,}6\%$; $O_2 = 0{,}1\%$.

11. Определить составы органической, условно горючей и сухой массы для данного состава рабочего топлива и привести их в табличной форме. Состав рабочего топлива: $C^p = 70{,}34\%$; $H^p = 3{,}91\%$; $O^p = 5{,}48\%$; $N^p = 1{,}42\%$; $S^p = 4{,}02\%$; $A^p = 10{,}01\%$; $W^p = 4{,}82\%$.

12. Рассчитать высшую и низшую теплотворность подмосковного угля и определить разницу между ними (состав угля принять по приложению 1).

13. Каменный уголь имеет влажность $W^p = 8\%$ и зольность $A^p = 6\%$. Определить процентное содержание золы в угле, если он будет подсушен (перед размолом в пылевидное состояние) до влажности 2%.

14. Определить вес 1 $м^3$ березовых дров нормальной кладки, если $W^p = 45\%$.

15. Часовой расход топлива полугазовой топки составляет в условном топливе 900 *кг*.

Определить часовой расход натурального топлива—подмосковного угля с теплотворностью $Q^p_н = 2980$ *ккал/кг*.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОВТОРЕНИЯ К ПЕРВОМУ РАЗДЕЛУ

1. Из каких химических элементов состоит органическая масса топлива?
2. Почему горючая масса топлива называется условно горючей массой?
3. Из чего состоит зола топлива?
4. Почему золу и влагу относят к балласту топлива?
5. В чем различие между верхним и нижним пределами теплотворности топлива?
6. Объясните значения коэффициентов в формуле Д. И. Менделеева для определения теплотворности топлива.
7. Как определяется теплотворность твердого топлива в калориметрической бомбе?
8. Что такое условное топливо?
9. Что называется калорийным эквивалентом топлива?
10. Какие виды топлива являются местными в области (крае, республике), где вы живете?
11. Какое топливо называется длиннопламенным (короткопламенным)?
12. Назовите известные вам виды длиннопламенного и короткопламенного топлива.
13. Назовите главнейшие каменноугольные бассейны СССР.
14. Назовите главнейшие нефтяные районы СССР.
15. Назовите известные вам виды газообразного топлива.
16. В чем состоят основные достоинства газообразного топлива?
17. Какие предохранительные меры против взрывов на углеразмольных установках вам известны?

РАЗДЕЛ ВТОРОЙ

РАСЧЕТЫ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ

Глава I

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ

Горение топлива—сложный физико-химический процесс. В химическом отношении оно представляет собой окисление горючих элементов топлива кислородом воздуха. В результате процесса горения образуются газообразные продукты горения и выделяется тепло.

Большинство реакций горения топлива — экзотермические, они происходят с выделением тепла. В процессах горения протекают также и некоторые эндотермические реакции, происходящие с поглощением тепла.

Подвергаясь нагреванию, топливо при 105—110° теряет свою влагу. Примерно с температуры 150—180° начинается разложение топлива на летучие вещества и твердый остаток—кокс. Таким образом, горение топлива представляет собой не просто процесс окисления его горючих элементов в исходном состоянии, а раздельное горение газообразных и твердых продуктов разложения, т. е. летучих горючих веществ и кокса.

При дальнейшем нагреве топливо воспламеняется и начинается горение.

Температура воспламенения топлива зависит не только от его химического состава, но и от условий горения. Так как условия горения топлива весьма разнообразны, то температура воспламенения не является вполне определенной величиной, характеризующей топливо, как, например, теплотворность.

Приближенно можно принять следующие температуры воспламенения твердого топлива:

Торф	225°
Дрова	300°
Бурый уголь	370—450°
Каменный уголь	470—500°
Антрацит	600—700°
Кокс	700°

Как правило, чем больше летучих горючих веществ выделяется при разложении топлива от нагревания, тем ниже температура его воспламенения.

Горючие газы, из которых состоит газообразное топливо, тоже имеют различные температуры воспламенения, зависящие от свойств самого газа и от условий его сжигания:

CO	650°
H_2	580°
CH_4	700°

Взаимодействие между горючими элементами топлива и кислородом воздуха начинается гораздо раньше воспламенения топлива, но процесс окисления идет с незначительной скоростью и количество выделяемого тепла недостаточно для поддержания окисления без подвода тепла извне. С повышением температуры за счет подвода тепла от какого-либо внешнего источника скорость реакций окисления увеличивается, процесс охватывает все большую массу топлива, и с некоторого момента скорость реакций возрастает настолько, что количество выделяемого реакциями тепла становится достаточным для того, чтобы процесс горения протекал уже без внешнего подвода тепла.

Этот момент называется воспламенением топлива, а температура, при которой происходит воспламенение, — температурой воспламенения.

Большую роль в процессах горения играет скорость реакций, под которой понимают количество вещества, вступающего в реакцию (или образующегося в результате реакции) в единицу времени (секунду, час).

По известному из курса химии закону действующих масс, скорость химической реакции, т. е. количество получающегося вещества в единицу времени, пропорциональна произведению концентрации реагирующих веществ:

$$v = K \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3,$$

где: v — скорость реакции;

K — коэффициент, зависящий от характера реагирующих веществ;

C_1, C_2, C_3 — концентрации реагирующих веществ.

Применяя этот закон к процессу горения, видим, что скорость горения тем больше, чем выше концентрация горючих элементов и кислорода, участвующих в процессе горения.

Вторым фактором, определяющим скорость горения, является температура.

Для протекания самих реакций окисления в процессе горения необходим непрерывный подвод воздуха к горящему топливу.

Таким образом, процесс горения топлива определяется химическими и физическими факторами, значение которых в различных температурных условиях неодинаково.

При относительно невысоких температурах продолжительность собственно химических реакций значительно больше времени, нужного для подвода кислорода к горючим элементам

топлива (диффузия молекул кислорода через оболочку окружающих топливо газообразных продуктов горения). Полное время горения в данном случае определяется, в основном, кинетикой химических реакций, т. е. химической активностью горючих элементов топлива по отношению к кислороду, упомянутой уже выше концентрацией реагирующих веществ и т. п.

С повышением температуры скорость реакций горения увеличивается в столь значительной степени, что полное время горения определяется уже, преимущественно, физическими факторами: а) временем, нужным для интенсивного смешения горючих элементов топлива с кислородом воздуха в случае горения газообразного топлива или летучих горючих и продуктов неполного горения твердого топлива; б) временем, нужным для подвода кислорода к поверхности кусков топлива, отгона от них оболочки образовавшихся продуктов горения и т. д., в случае горения кусков кокса. В этих условиях особое значение приобретают степень смешения реагирующих в процессе горения веществ, скорости подвода воздуха к зоне горения, отвода из нее продуктов горения и другие физические условия.

Скорость горения в низкотемпературной кинетической области быстро возрастает с увеличением температуры, но не зависит от скорости подвода воздуха. В высокотемпературной диффузионной области скорость горения будет зависеть не только от температуры, но и от скорости подвода воздуха. Влияние температуры в диффузионной области горения сказывается менее, чем в кинетической.

При дальнейшем повышении температуры влияние ее начинает сказываться на возникновении и протекании восстановительных реакций.

Реакции горения топлива являются обратимыми. Они могут протекать в двух направлениях. Например:

$$C + O_2 \rightarrow CO_2 + Q \text{ — прямая реакция;}$$
$$CO_2 \rightarrow C + O_2 - Q \text{ — обратная реакция.}$$

Если прямая реакция протекает с выделением тепла (Q), то обратная—с поглощением его.

Степень диссоциации CO_2 в процентах при различных давлениях и температурах приведена в табл. 10.

Таблица 10

Диссоциация CO_2 (в %)

Температура в град.	Давление в *ат*		
	0,1	1,0	10,0
1000	0,13	0,06	0,03
1500	1,70	0,80	0,40
2000	8,00	4,00	3,00
2500	60,00	19,00	9,00

Из табл. 10 видно, что при обычных условиях горения топлива в печах, т. е. при температуре 1000—1500°, диссоциация CO_2 будет незначительна; степень разложения водяного пара будет еще меньше. Поэтому в расчетах горения влияние диссоциации не учитывается.

Глава II

РАСЧЕТ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ

Расчеты горения топлива обычно состоят из определения:

а) расхода воздуха, необходимого для горения топлива;

б) состава газообразных продуктов, получающихся при горении топлива (дымовых газов);

в) температуры, развиваемой при горении топлива.

1. УРАВНЕНИЯ РЕАКЦИЙ ГОРЕНИЯ

Процессы горения отдельных элементов топлива могут быть выражены обычными химическими уравнениями. Зная атомные и молекулярные веса веществ, участвующих в реакциях горения, можно определить количества кислорода и воздуха, необходимые для горения, а также количества получающихся продуктов горения, пользуясь уравнениями этих реакций:

$$C + O_2 = CO_2;$$

$$12\ кг\ C + 32\ кг\ O_2 = 44\ кг\ CO_2;$$

$$\boxed{1\ кг\ C + 2{,}67\ кг\ O_2 = 3{,}67\ кг\ CO_2;} \qquad (8')$$

$$H_2 + \frac{1}{2}\ O_2 = H_2O;$$

$$\boxed{1\ кг\ H_2 + 8\ кг\ O_2 = 9\ кг\ H_2O;} \qquad (8'')$$

$$S + O_2 = SO_2;$$

$$32\ кг\ S + 32\ кг\ O_2 = 64\ кг\ SO_2;$$

$$\boxed{1\ кг\ S + 1\ кг\ O_2 = 2\ кг\ SO_2.} \qquad (8''')$$

Количества веществ, участвующих в реакциях горения, выражаются в весовых (*кг*) или сбъемных единицах ($м^3$). Обычно расчет процессов горения твердого и жидкого топлива производится в килограммах, а расчет процессов горения газообразного топлива—в куб. метрах.

Расчеты процесса горения в объемных единицах основаны на следствии из закона Авогадро, по которому килограммолекула любого вещества, находящегося в газообразном состоянии, занимает объем 22,4 $м^3$.

Уравнение горения CO (в молекулярных объемах):

$$CO + \frac{1}{2} O_2 = CO_2;$$

$$1\ мо\ CO + \frac{1}{2}\ мо\ O_2 \rightarrow 1\ мо\ CO_2,$$

или в $м^3$: 22,4 $м^3$ CO + 11,2 $м^3$ O_2 → 22,4 $м^3$ CO_2;

$$\boxed{1\ м^3\ CO + \frac{1}{2}\ м^3\ O_2 \rightarrow 1\ м^3\ CO_2.} \qquad (9)$$

Легко видеть, что горение H_2 в молекулярных объемах выражается следующим образом:

$$H_2 + \frac{1}{2} O_2 = H_2O;$$

$$1\ мо\ H_2 + \frac{1}{2}\ мо\ O_2 \rightarrow 1\ мо H_2O,$$

или в $м^3$: $$\boxed{1\ м^3 H_2 + \frac{1}{2}\ м^3\ O_2 \rightarrow 1\ м^3\ H_2O.} \qquad (10)$$

Горение CH_4, C_2H_4 и H_2S рассматривается так, что они сначала как бы распадаются на составляющие их элементы:

$$C \text{ и } 2H_2;\ 2C \text{ и } 2H_2;\ H_2 \text{ и } S,$$

а затем уже происходит горение отдельных горючих элементов.

Горение CH_4:

$$C + O_2 = CO_2$$
$$2H_2 + O_2 = 2H_2O$$
$$CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O$$

$$1\ мо\ CH_4 + 2\ мо\ O_2 \rightarrow 1\ мо\ CO_2 + 2\ мо\ H_2O$$

или в $м^3$:

$$\boxed{1\ м^3\ CH_4 + 2\ м^3\ O_2 \rightarrow 1\ м^3\ CO_2 + 2\ м^3\ H_2O.} \qquad (11)$$

Горение C_2H_4:

$$2C + 2O_2 = 2CO_2$$
$$2H_2 + O_2 = 2H_2O$$
$$C_2H_4 + 3O_2 = 2CO_2 + 2H_2O$$

или в $м^3$:

$$1\ м^3\ C_2H_4 + 3\ м^3\ O_2 \rightarrow 2\ м^3\ CO_2 + 2\ м^3 H_2O. \qquad (12)$$

Горение H_2S:

$$H_2 + \frac{1}{2} O_2 = H_2O,$$
$$S + O_2 = SO_2$$
$$H_2S + 1\frac{1}{2} O_2 = H_2O + SO_2$$

или в $м^3$:

$$1\ м^3\ H_2S + 1\frac{1}{2}\ м^3\ O_2 \rightarrow 1\ м^3\ H_2O + 1\ м^3\ SO_2. \qquad (13)$$

Так как объемы газов изменяются с изменением температуры и давления, то в теплотехнических расчетах их обычно выражают в куб. метрах ($м^3$), приведенных, для удобства сопоставления, к нормальным условиям, т. е. 0° и 1 *атм* давления. Такие $м^3$ принято называть нормальными $м^3$ и обозначать $нм^3$.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДА ВОЗДУХА, НЕОБХОДИМОГО ДЛЯ ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА

Теоретическое количество воздуха

Воздух состоит из кислорода, азота и небольшого количества углекислого газа, водяных паров и других примесей.

Для расчетов горения принимается следующий состав воздуха (в %):

	По весу	По объему
Кислород	23,0	21,0
Азот	77,0	79,0

Количество воздуха L, необходимое для горения, определяют при помощи обычных уравнений реакций горения, из которых может быть получена формула:

$$L_m = \frac{2{,}67C + 8H + S - O}{0{,}23 \cdot 100}\ кг/кг, \qquad (14)$$

где: C, H, S и O — процентные содержания соответствующих элементов в топливе.

Коэффициенты перед C, H и S представляют собой количество кислорода, необходимое для сгорания 1 *кг* этих элементов.

Количество воздуха в куб. метрах может быть определено делением весового количества воздуха на его объемный вес.

Количество воздуха, подсчитанное по уравнениям химических реакций, называется теоретическим количеством воздуха L_m.

Так как объемный вес воздуха равен 1,293 *кг/м*³, то, подставляя значение его в формулу (14), получаем выражение ее для определения теоретического количества воздуха по объему V_m):

$$V_m = \frac{2{,}67C + 8H + S - O}{0{,}23 \cdot 100 \cdot 1{,}293} \ м^3/кг. \qquad (15)$$

Формулы (14) и (15), если в них произвести арифметические действия с числовыми величинами, примут вид:

$$L_m = 0{,}115\,C + 0{,}345\,H + 0{,}043\,(S - O) \ кг/кг, \qquad (14^1)$$

$$V_m = 0{,}089\,C + 0{,}267\,H + 0{,}033\,(S - O) \ м^3/кг. \qquad (15^1)$$

Пример. Определить теоретическое количество воздуха (по весу и объему), необходимое для сжигания мазута состава: C=86%; H=11,5%; O=1,5%; N=1%.

Применим формулу (14):

$$L_m = \frac{2{,}67C + 8H + S - O}{0{,}23 \cdot 100} = \frac{2{,}67 \cdot 86 + 8 \cdot 11{,}5 - 1{,}5}{0{,}23 \cdot 100} = 13{,}9 \ кг/кг$$

или в *м*³:

$$V_m = \frac{13{,}9}{1{,}293} = 10{,}8 \ м^3/кг,$$

где 1,293 — объемный вес воздуха в *кг/м*³.

Действительное количество воздуха

Теоретическое количество воздуха является тем минимумом, который необходим для полного окисления горючих элементов топлива. В действительности при сжигании топлива вводится всегда большее количество воздуха, чем необходимо теоретически. Объяснить это можно условиями сжигания топлива, главным образом недостаточным смешиванием его с воздухом в процессе горения.

Для каждого вида топлива практически установлен необходимый расход воздуха, который, в отличие от теоретического, носит название практического, или действительного, количества воздуха — $L_д$.

Разность $L_д - L_m$ называется **избытком воздуха** и выражается в процентах по отношению к L_m (L_m принимается за 100%).

Отношение $L_д$ к L_m называется **коэффициентом избытка воздуха** (табл. 11) и обозначается греческой буквой α (альфа):

$$\alpha = \frac{L_д}{L_m},$$

откуда действительное количество воздуха:

$$\boxed{L_д = \alpha \cdot L_m.} \qquad (16)$$

Таблица 11

Значение избытка воздуха при сжигании разных видов топлива

Виды топлива	Избыток воздуха в %	Коэффициент избытка воздуха
Твердое кусковое	30—100	1,30—2,00
Пылевидное	20—25	1,20—1,25
Жидкое	15—25	1,15—1,25
Газообразное	5—20	1,05—1,20

Пример. Определить $L_д$ для условий вышеприведенного примера, если $\alpha = 1{,}25$.

Применяем формулу (16). По весу: $L_д = \alpha \cdot L_m = 1{,}25 \cdot 13{,}9 = 17{,}4$ *кг/кг*. По объему: $V_д = \alpha \cdot V_m = 1{,}25 \cdot 10{,}8 = 13{,}5$ *м³/кг*.

Из табл. 11 следует, что для полного сгорания топлива жидкого, сжигаемого в распыленном состоянии, газообразного и пылевидного значения коэффициента избытка воздуха меньше, чем для твердого кускового топлива. Это объясняется лучшим смешиванием этих видов топлива с воздухом при сжигании их в топках и печах.

Избыток воздуха оказывает огромное влияние на процесс горения топлива. Увеличение избытка воздуха свыше теоретически необходимого количества будет полезным только до тех пор, пока не наступит полное горение топлива. Дальнейшее увеличение будет не только бесполезным, но даже вредным, так как, хотя количество выделяющегося при горении тепла будет оставаться постоянным, температура горения будет снижаться за счет большего объема дымовых газов, на которые должно распределяться выделенное при горении тепло.

Определение избытка воздуха по составу продуктов горения

При проектировании тепловых установок в расчетах горения топлива для определения расхода воздуха значение коэффициента избытка его α обычно принимают из таблиц.

При контроле процесса горения в работающих тепловых установках коэффициент избытка воздуха может быть определен анализом газообразных продуктов горения. Определив при помощи газоанализатора[1] состав продуктов горения, можно вычислить коэффициент избытка воздуха следующим образом.

Заменяя в выражении $\alpha = \frac{L_\partial}{L_m}$ отношение $\frac{L_\partial}{L_m}$ отношением $\frac{N_\partial}{N_m}$, где N_∂ и N_m — содержание азота в действительном и теоретическом количествах воздуха, получим $\alpha = \frac{N_\partial}{N_m}$.

Содержание азота в теоретическом количестве воздуха N_m может быть представлено как разность $N_\partial - N_u$, где N_u — азот избытка воздуха. Выражая этот последний через кислород избытка воздуха, получим:

$$N_m = N_\partial - \frac{79}{21} O_u.$$

Подставив выраженное таким образом значение N_m в формулу $\alpha = \frac{N_\partial}{N_m}$, получим:

$$\alpha = \frac{N_\partial}{N_\partial - \frac{79}{21} O_u}.$$

Разделив числитель и знаменатель этого выражения на N_∂ и сделав преобразование, получаем формулу:

$$\boxed{\alpha = \frac{21}{21 - 79 \frac{O_2}{N_2}},} \qquad (17)$$

где: O_2 и N_2 — содержание кислорода и азота в продуктах горения в процентах.

Формула (17) пригодна для определения коэффициента избытка воздуха, по данным анализа дымовых газов, в случаях горения твердого и жидкого топлива.

---

[1] Устройство и работа газоанализаторов описаны в разделе XII—«Теплотехнический контроль и автоматическое управление тепловыми процессами».

Определяя состав продуктов горения при помощи газоанализаторов, мы получаем обычно процентное содержание CO_2 и O_2 в сухих газах. Количество азота не определяется непосредственно анализом и вычисляется по разности:

$$\%N_2 = 100 - (\%CO_2 + \%O_2).$$

Пример. Определить коэффициент избытка воздуха, если по данным газового анализа в дымовых газах содержится 14,8% CO_2 и 5,2% O_2.

Зная содержание CO_2 и O_2, находим по разности количество N_2:

$$N_2 = 100 - (14{,}8 + 5{,}2) = 80\%.$$

Подставляя цифровые значения в формулу (17), получим:

$$\alpha = \frac{21}{21 - 79\dfrac{5{,}2}{80{,}0}} = 1{,}32.$$

При неполном горении топлива в дымовых газах находится CO, а иногда H_2 и CH_4. В таких случаях коэффициент избытка воздуха может быть вычислен по следующим формулам:

$$\boxed{\alpha = \frac{21}{21 - 79\dfrac{O_2 - \dfrac{CO}{2}}{N_2}},} \qquad (18)$$

$$\boxed{\alpha = \frac{21}{21 - 79\dfrac{O_2 - [(CO + H_2) : 2] - 2CH_4}{N_2}}.} \qquad (19)$$

Пример. Определить избыток воздуха в процентах, если по анализу продуктов горения в них содержится 14,3% CO_2, 5,1% O_2 и 1,4% CO.

Зная содержание CO_2, O_2 и CO, находим по разности количество N_2:

$$N_2 = 100 - (14{,}3 + 5{,}1 + 1{,}4) = 79{,}2\%.$$

Подставляя значения величин CO_2, O_2, CO и N_2 в формулу (18), определяем α:

$$\alpha = \frac{21}{21 - 79\cdot\dfrac{5{,}1 - \dfrac{1{,}4}{2}}{79{,}2}} = 1{,}28.$$

Избыток воздуха при этом значении α равен 28%.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТАВА ПРОДУКТОВ ГОРЕНИЯ

В состав продуктов полного горения топлива входят следующие газы: CO_2, H_2O, SO_2, N_2 и O_2.

Продукты горения топлива при недостатке воздуха будут содержать (помимо вышеуказанных компонентов) еще CO и иногда H_2 и CH_4, выделившиеся из топлива, но не окисленные кислородом воздуха до CO_2 и H_2O.

Зная состав топлива и вычислив предварительно расход воздуха, необходимого для горения, можно рассчитать состав продуктов горения.

Пример: Определить состав продуктов горения каменного угля следующего состава: $C^p = 76{,}3\%$; $H^p = 4\%$; $O^p = 3{,}7\%$; $N^p = 1{,}8\%$; $S^p = 3{,}2\%$; $W^p = 4\%$; $A^p = 7\%$; горение происходит при избытке воздуха 50%.

Определяем сначала теоретическое количество воздуха по формуле (14):

$$L_m = \frac{2{,}67C + 8H + S - O}{0{,}23 \cdot 100} = \frac{2{,}67 \cdot 76{,}3 + 8 \cdot 4 + 3{,}2 - 3{,}7}{0{,}23 \cdot 100} = 10{,}2 \text{ кг/кг}.$$

Действительное количество воздуха определяется по формуле (16):

$$L_д = \alpha \cdot L_m = 1{,}5 \cdot 10{,}2 = 15{,}3 \text{ кг/кг}$$

или на 100 *кг* топлива 1530 *кг*.

После определения необходимого количества воздуха определяем состав продуктов горения, применяя уравнения основных реакций горения для 100 *кг* топлива.

По уравнению (8′) при сгорании 1 *кг* C образуется 3,67 *кг* CO_2. Следовательно, в данном случае:

$$CO_2 = 3{,}67 \cdot 76{,}3 = 280 \text{ кг}.$$

H_2O в продуктах горения получается от сгорания H по уравнению (8″) и от испарения влаги топлива W *кг*[1], т. е.

$$H_2O = 9H^p + W^p = 9 \cdot 4 + 4 = 40 \text{ кг}.$$

По уравнению (8‴) при сгорании 1 *кг* S образуется 2 *кг* SO_2:

$$SO_2 = 2 \cdot 3{,}2 = 6{,}4 \text{ кг}.$$

$N_{п.г}$ — азот в продуктах горения получается за счет азота топлива N_m и, главным образом, за счет азота воздуха $N_в$, поступающего для горения в количестве 0,77 $L_д$:

$$N_{п.\,г.} = N_m + N_в = 1{,}8 + 0{,}77 \cdot 1530 = 1179{,}9 \text{ кг};$$

---

[1] При более точных расчетах следует учитывать еще влажность воздуха, участвующего в горении.

$O_{ост}$ — оставшееся свободным количество кислорода определяется следующим образом:

$$O_{ост} = 0{,}23\,(L_д - L_т) = 0{,}23\,(1530 - 1020) = 117{,}3 \text{ кг},$$

где: 0,23 — содержание кислорода в единице веса воздуха.

Состав продуктов горения по объему в куб. метрах определяется путем деления весовых количеств на объемные веса газов, которые могут быть взяты из справочных таблиц или определены, исходя из закона Авогадро.

Объемный вес, как известно, равен весу вещества, деленному на объем. Следовательно, разделив килограммолекулярный вес газа на объем, занимаемый одной килограммолекулой, т. е. на 22,4, получим объемный вес этого газа в *кг/м*³. Например, объемный вес CO_2 будет известен при делении килограммолекулярного веса CO_2, равного 44 *кг*, на килограммолекулярный объем, равный 22,4 *м*³, т. е.:

$$\gamma_{CO_2} = \frac{44}{22{,}4} = 1{,}97 \text{ кг/м}^3.$$

Объемные веса других продуктов горения имеют следующие значения:

$$\gamma_{H_2O} = 0{,}80 \text{ кг/м}^3,$$
$$\gamma_{N_2} = 1{,}25 \text{ кг/м}^3,$$
$$\gamma_{SO_2} = 2{,}86 \text{ кг/м}^3,$$
$$\gamma_{O_2} = 1{,}43 \text{ кг/м}^3.$$

Состав продуктов горения по объему в данном примере выражается следующими величинами:

$$CO_2 = \frac{280{,}0}{1{,}97} = 142{,}1 \text{ нм}^3, \text{ или } 11{,}7\%,$$

$$H_2O = \frac{40{,}0}{0{,}80} = 49{,}8 \text{ нм}^3, \text{ или } 4{,}1\%,$$

$$SO_2 = \frac{6{,}4}{2{,}86} = 2{,}2 \text{ нм}^3, \text{ или } 0{,}2\%,$$

$$N_2 = \frac{1179{,}9}{1{,}25} = 943{,}9 \text{ нм}^3, \text{ или } 77{,}3\%,$$

$$O_2 = \frac{117{,}3}{1{,}43} = 82{,}0 \text{ нм}^3, \text{ или } 6{,}7\%.$$

$$1220 \text{ нм}^3, \text{ или } 100{,}0\%$$

Для удобства пользования результаты расчета состава продуктов горения следует сводить в таблицы, имеющие следующую форму (табл. 12).

Таблица 12

Состав продуктов горения

Составные части	% по весу	Состав продуктов горения									
		CO_2		H_2O		SO_2		N_2		O_2	
		кг	*нм*³	*кг*	*нм*³	*кг*	*нм*³	*кг*	*нм*³	*кг*	*нм*³
Топливо:											
C^p	76,3	280	142,1	—	—	—	—	—	—	—	—
H^p	4,0	—	—	36	49,8	—	—	—	—	—	—
O^p	3,7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
N^p	1,8	—	—	—	—	—	—	1,8	1,4	—	—
S^p	3,2	—	—	—	—	6,4	2,2	—	—	—	—
W^p	4,0	—	—	4	—	—	—	—	—	—	—
A^p	7,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Итого . . .	100,0	280	142,1	40	49,8	6,4	2,2	1,8	1,4	—	—
Воздух:											
O_2	23,0	—	—	—	—	—	—	—	—	117,3	82
N_2	77,0	—	—	—	—	—	—	1178,1	942,5	—	—
Всего . . .	—	280	142,1	40	49,8	6,4	2,2	1179,9	943,9	117,3	82

4. МАТЕРИАЛЬНЫЙ БАЛАНС ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ

Определив состав продуктов горения, необходимо проверить правильность расчета. Согласно закону сохранения веса вещества, вес веществ, взятых до реакции, равен весу веществ, полученных после реакции. Применяя этот закон к процессам горения топлива, можно считать, что вес топлива и воздуха равен весу газообразных продуктов горения и золы:

$$G_m + G_в = G\,(CO_2 + H_2O + SO_2 + N_2 + O_2) + A.$$

В левую часть уравнения входят весовые количества топлива G_m и воздуха $G_в$, израсходованных на горение, а в правую часть — сумма весов газообразных продуктов горения и золы A.

Приведенное уравнение выражает собой материальный баланс процесса горения, т. е. сопоставление количеств веса веществ или материалов (отсюда и название баланс) как участвующих в процессе горения, так и образующихся в результате его. Левую часть баланса называют приходом, а правую—расходом. Обе части, как всегда в балансах, равны друг другу.

Материальные балансы обычно приводят в форме таблиц. Для вышеприведенного примера материальный баланс может быть представлен так:

Материальный баланс процесса горения 100 *кг* каменного угля

Приход			Расход		
Наименование статей прихода	Количество		Наименование статей расхода	Количество	
	в *кг*	в %		в *кг*	в %
Топливо — каменный уголь . . .	100,0	6,2	Продукты горения — дымовые газы	1623,6	99,6
Воздух, израсходованный на горение	1530,0	93,8	Зола топлива . .	7,0	0,4
Итого в приходе . .	1630,0	100,0	Итого в расходе . .	1630,6	100,0

Расхождение в данном случае между приходом и расходом в 0,6 *кг* вполне допустимо и объясняется округлением некоторых величин при подсчетах.

Материальные балансы составляют не только для процессов горения, но и для других теплотехнических процессов, например, для газификации топлива в газогенераторах, сушильных процессов и т. п.

Материальные балансы служат основой для составления тепловых балансов, о чем будет сказано ниже.

5. ПРИБЛИЖЕННЫЙ РАСЧЕТ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ

Помимо вышеизложенного метода расчета процесса горения, основанного на применении уравнений реакций горения, подсчеты расхода воздуха и выхода продуктов горения могут производиться при помощи эмпирических формул. При этом получаются менее точные результаты, но зато сокращается необходимое для вычислений время.

Эмпирические, т. е. полученные опытным путем, формулы для определения количества воздуха и продуктов горения основаны на линейной зависимости между величиной низшей теплотворности топлива и теоретическим количеством воздуха (табл. 13).

Пример. Определить теоретическое и действительное количество воздуха, необходимое для горения донецкого антрацита, и количество получающихся при этом продуктов горения.

Состав антрацита (в %):	Горючая масса	Балласт
	$C^г=93,80$	$W^р=5,5$
	$H^г=1,95$	$A^р=9,2$
	$S^г=2,00$	
	$O^г=1,05$	$Б=14,7$
	$N^г=1,20$	
	Итого . . 100,00	

$\alpha=1,4$

1. Определение состава рабочего топлива антрацита (в %) производится по формулам (1):

$$C^р=C^г\cdot\frac{100-Б}{100}$$

и т. д.

Коэффициент пересчета:

$$\frac{100-Б}{100}=\frac{100-14,7}{100}=0,853.$$

$$\begin{aligned}
C^р&=0,853\cdot 93,80=80,00\\
H^р&=0,853\cdot 1,95=1,67\\
S^р&=0,853\cdot 2,00=1,71\\
O^р&=0,853\cdot 1,05=0,89\\
N^р&=0,853\cdot 1,20=1,03\\
W^р&=5,50\\
A^р&=9,20\\
\text{Итого . .}&\ 100,00
\end{aligned}$$

2. Определение теплотворности антрацита по формуле Менделеева (6):

$$Q^р_н=81C^р+246H^р-26(O^р-S^р)-6W^р=81\cdot 80+$$
$$+246\cdot 1,67-26(0,89-1,71)-6\cdot 5,5=6940\ \textit{ккал/кг}.$$

Таблица 13

Формулы для приближенного определения расхода воздуха и количества продуктов горения

Виды топлива	Единица измерения	Расход воздуха		Выход продуктов горения	
		при $\alpha = 1$	при $\alpha > 1$	при $\alpha = 1$	при $\alpha > 1$
Твердое	$м^3/кг$	$1{,}01 \frac{Q_н^р}{1000} + 0{,}5$	$V_в^д = \alpha \cdot V_в^т$	$0{,}89 \frac{Q_н^р}{1000} + 1{,}65$	$V_{п.г.}^д = \alpha \cdot V_{п.г.}^т$
Жидкое	»	$0{,}85 \frac{Q_н^р}{1000} + 2{,}0$		$1{,}11 \frac{Q_н^р}{1000}$	
Газообразное[1] низкокалорийное	$м^3/м^3$	$0{,}875 \frac{Q_н^р}{1000}$		$0{,}725 \frac{Q_н^р}{1000} + 1{,}0$	
Высококалорийное . . .	»	$1{,}09 \frac{Q_н^р}{1000} + 0{,}25$		$1{,}14 \frac{Q_н^р}{1000} + 0{,}25$	

[1] Низкокалорийным газообразным топливом считается горючий газ с $Q_н^р < 3000$ *ккал/м³*, высококалорийным — с $Q_н^р > 3000$ *ккал/м³*.

3. Определение теоретического расхода воздуха по эмпирической формуле из табл. 13:

$$V_в^т = \frac{1,01}{1000} Q_н^р + 0,5 = 1,01 \frac{6940}{1000} + 0,5 = 7,5 \text{ нм}^3/\text{кг}.$$

4. Определение действительного расхода воздуха по формуле из табл. 13:

$$V_в^д = \alpha \cdot V_в^т = 1,4 \cdot 7,5 = 10,5 \text{ нм}^3/\text{кг}.$$

5. Определение выхода продуктов горения при $\alpha = 1$ по формуле из табл. 13:

$$V_{пг} = \frac{0,89}{1000} Q_н^р + 1,65 = \frac{0,89}{1000} 6940 + 1,65 = 7,83 \text{ нм}^3/\text{кг}.$$

6. Определение выхода продуктов горения при $\alpha = 1,4$ по формуле из табл. 13:

$$V_{пг}^д = \alpha \cdot V_{пг}^т = 1,4 \cdot 7,83 = 10,98 \text{ нм}^3/\text{кг}.$$

Глава III

РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ ГОРЕНИЯ

1. ТЕМПЕРАТУРА ГОРЕНИЯ

При горении топлива газообразные продукты горения нагреваются до высокой температуры.

В теплотехнике существуют следующие понятия температуры горения:

а) калориметрическая максимальная;
б) калориметрическая;
в) теоретическая;
г) практическая.

Калориметрической максимальной температурой горения называют такую температуру, которую приобрели бы продукты полного сгорания топлива при теоретическом количестве воздуха (т. е. при $\alpha = 1$) и при условии, что все тепло, выделенное топливом, израсходовано лишь на нагрев продуктов горения.

Д. И. Менделеев называл такую температуру жаропроизводительностью топлива и считал ее одной из характеристик топлива.

Калориметрической температурой горения называют такую температуру, которую приобрели бы продукты горения топлива тоже при полном сгорании его без потерь, но при любом значении α, большем единицы.

Теоретическая температура горения отличается от калориметрической тем, что при ее определении следует учитывать влияние эндотермических реакций диссоциации CO_2 и H_2O в продуктах горения. Это имеет место при высоких температурах.

Как уже отмечалось, при обычно достигаемых в печах температурах степень диссоциации CO_2 и H_2O очень невелика. Потому и снижение температуры незначительно. Ввиду этого при расчетах горения влияние диссоциации этих газов не учитывают и определяют обычно теоретическую температуру горения, которая совпадает в таких случаях с калориметрической температурой горения.

Все три вышеприведенных понятия температуры горения относятся к адиабатным условиям.

При сжигании топлива в топках и печах, теоретическая температура не может быть достигнута, так как часть тепла, выделяемого при горении, расходуется на нагревание окружающей среды.

Достигаемая практически при горении топлива температура называется практической температурой горения. Практическая температура в большинстве промышленных топок и печей находится в пределах от 900 до 1600°.

Отношение практической температуры горения к теоретической носит название пирометрического коэффициента горения. Обычно его принимают равным 0,6—0,7.

Измерение практической температуры горения производится при помощи пирометров (см. раздел XII книги), а определение теоретической температуры горения—расчетным путем.

2. РАСЧЕТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ГОРЕНИЯ

Теоретическая температура горения, согласно вышеприведенному определению, может быть вычислена, исходя из теплового баланса процесса горения в адиабатных условиях, т. е. без потерь тепла во внешнюю среду.

Приход тепла в этом случае представляет собой теплотворность топлива, а расход тепла—теплосодержание газообразных продуктов горения 1 *кг* (или 1 $м^3$) топлива.

Примем следующие обозначения:

$Q_н^р$ — теплотворность топлива;

$V_{п.г}$ — количество продуктов горения, получающихся от сгорания 1 *кг* топлива;

$C_{п.г}$ — теплоемкость продуктов горения;

t_x — теоретическая температура горения, которую надо определить.

Тепловой баланс процесса горения 1 *кг* топлива может быть выражен следующим уравнением:

$$\underbrace{Q_н^р}_{\text{Приход тепла}} = \underbrace{C_{п.г} \cdot V_{п.г} \cdot t_x}_{\text{Расход тепла}}.$$

Решая это уравнение относительно t_x, имеем:

$$t_x = \frac{Q_н^р}{c_{п.\,г} \cdot V_{п.\,г}}.$$

Однако пользоваться этой формулой при точных расчетах неудобно вследствие того, что теплоемкости газов находятся в функциональной зависимости от искомой температуры и при решении такого уравнения t_x получается во 2-й и 3-й степенях[1]. Поэтому теоретическую температуру горения обычно определяют по так называемому способу подбора значений, состоящему в следующем. Задаваясь приближенно теоретической температурой горения t_1, определяют количество тепла, необходимое для нагревания продуктов горения до этой температуры. Пусть это количество тепла составит Q_1 *ккал*. Если Q_1 будет больше теплотворности топлива $Q_н^р$, то искомая температура t_x будет ниже t_1, так как имеющегося тепла $Q_н^р$ недостаточно, чтобы нагреть продукты горения до принятой температуры.

Если же Q_1 окажется меньше $Q_н^р$, то, очевидно, тепла будет больше, чем необходимо для нагрева продуктов горения до температуры t_1. Следовательно, искомая температура горения будет выше предварительно принятой температуры t_1. Вторично задавшись температурой горения t_2 большей, чем температура t_1 (обычно на 100°), подсчитывают количество тепла Q_2, необходимое для нагревания продуктов горения до температуры t_2.

Допустим, что $Q_2 > Q_н^р > Q_1$, тогда $t_2 > t_x > t_1$, т. е. t_x лежит в пределах температур t_1 и t_2. Определение ее производится интерполяцией аналитическим или графическим путем.

Так как приращение температуры продуктов горения в небольших пределах можно считать пропорциональным приращению затраты тепла на их нагрев, то можно составить пропорцию:

$$(t_x - t_1) : (t_2 - t_1) = (Q_н^р - Q_1) : (Q_2 - Q_1),$$

откуда искомая температура:

$$t_x = t_1 + \frac{(Q_н^р - Q_1) \cdot (t_2 - t_1)}{Q_2 - Q_1}.$$

При графическом определении теоретической температуры горения поступают следующим образом. На осях прямоугольной системы координат в определенном масштабе откладывают

---

[1] При изучении этого раздела следует повторить из курса общей теплотехники учение о теплоемкости газов (см., например, А. М. Воронов. Теоретические основы теплотехники. Госэнергоиздат. 1952, стр. 59—68).

величины t_1, t_2, Q_1 и Q_2 (рис. 11). По координатам (t_1, Q_1, t_2, Q_2) находят точки 1 и 2 и соединяют их прямой линией, согласно допущенной выше линейной зависимости изменения температуры газов от количества тепла. Отложив на оси абсцисс $Q_н^р$, восстанавливают в точке *3* перпендикуляр до пересечения его с прямой *1—2* в точке *4*. Проектируя точку *4* на ось ординат, получают на ней точку *5*. Отрезок *0—5* в принятом масштабе выражает собой теоретическую температуру горения.

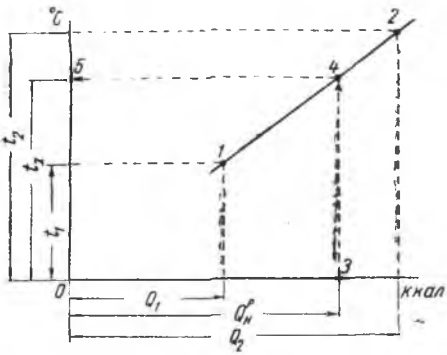


Рис. 11. Графическое определение теоретической температуры горения.

Теоретическая температура горения зависит от теплотворности топлива, его состава и количества воздуха, расходуемого для горения, так как с увеличением избытка воздуха увеличивается объем продуктов горения, и наоборот. Следовательно, теоретическая температура горения не может служить характеристикой топлива, как его теплотворность.

Определение теоретической температуры горения в расчетах необходимо потому, что она представляет собой тот предел температуры горения, который может быть достигнут при сжигании топлива данного состава при определенном избытке воздуха.

Температура горения может быть значительно повышена путем подогрева воздуха, а в случаях сжигания газообразного топлива—и самого газа. Благодаря этому в зону горения вводится дополнительное количество тепла, которое поступает на нагревание продуктов горения, увеличивая температуру горения.

При подогреве воздуха и газообразного топлива формула для определения теоретической температуры горения t_m будет иметь следующий вид:

$$t_m = \frac{Q_н^р + C_в \cdot V_в \cdot t_в + C_г \cdot V_г \cdot t_г}{C_{п.\,г} \cdot V_{п.\,г}},$$

где: $Q_н^р$—теплотворность топлива в *ккал/кг* или *ккал/м*^{3}.

$V_в$ — количество воздуха, израсходованного на горение, в *нм*^{3}*/кг*, или *нм*^{3}*/м*^{3};

$C_в$ — средняя теплоемкость воздуха в *ккал/м*^{3} *град*;

$t_в$ — температура подогрева воздуха;

V — количество газообразного топлива в *нм*^{3} (обычно 1 *нм*^{3});

$C_г$ — средняя теплоемкость газообразного топлива в *ккал/м³ град*;

$t_г$ — температура подогрева газообразного топлива;

$V_{п.г}$ — количество продуктов горения 1 *кг* или 1 *нм³* топлива в *нм³/кг* или *нм³/нм³*;

$C_{п.г}$ — средняя теплоемкость продуктов горения в *ккал/м³ град*.

В ряде случаев предварительный нагрев воздуха и газообразного топлива является обязательным. Например, при сжигании генераторного газа в стекловаренных печах газ и воздух нагреваются, примерно, до 900°.

3. ТИПОВОЙ ПРИМЕР РАСЧЕТА ГОРЕНИЯ

Общие указания

При расчете горения исходными данными обычно являются состав горючей массы топлива, состав балласта и коэффициент избытка воздуха.

Расчеты горения состоят в определении:

1) состава рабочего топлива;

2) теплотворности рабочего топлива;

3) теоретического и действительного расхода воздуха при данном коэффициенте избытка воздуха;

4) состава продуктов горения;

5) теоретической и практической температур горения при данном значении пирометрического коэффициента горения.

При выполнении расчетов горения необходимо:

1. Установить, на какое количество сжигаемого топлива производится расчет, т. е. определяются $L_т$ и $L_д$, количество продуктов горения и прочие величины. Расчеты горения можно относить к 1 *кг* или 1 *м³* топлива. Удобнее расчеты горения производить для твердого и жидкого топлива — на 100 *кг* и для газообразного — на 100 *м³*.

2. Выбрать единицы измерения — *кг*, *м³* или *мо* для выражения количеств воздуха и продуктов горения.

3. Установить необходимую степень точности при вычислениях, например, 0,1 0,01 и т. п. Надо помнить, что чрезмерная точность в расчетах не нужна и ведет только к излишней затрате времени. При выполнении расчетов следует пользоваться логарифмической линейкой.

4. При определении состава продуктов горения в весовых единицах следует проверять правильность расчета состава продуктов горения по закону сохранения веса веществ, составляя материальный баланс процесса горения.

Расчет горения генераторного газа из подмосковного угля

Исходные данные для расчета:

Состав газа (в %): $CO_2 = 7{,}2$; $CO = 26{,}4$; $CH_4 = 3{,}0$; $C_2H_4 = 0{,}4$; $H_2 = 14{,}5$; $N_2 = 47{,}3$; $H_2S = 1{,}2$. Коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1{,}25$. Поступающий для горения воздух предварительно подогревается до 600°.

Определить: 1) теплотворность газа; 2) теоретическое количество воздуха; 3) действительное количество воздуха; 4) состав продуктов горения; 5) теоретическую температуру горения при данной температуре подогрева воздуха.

1. Теплотворность генераторного газа определяется по формуле (7):

$$Q_н = \frac{3020\,CO + 2580\,H_2 + 8550\,CH_4 + 14110\,C_2H_4 + 5530\,H_2S}{100} =$$

$$= \frac{3020 \cdot 26{,}4 + 2580 \cdot 14{,}5 + 8550 \cdot 3{,}0 + 14110 \cdot 0{,}4 + 5530 \cdot 1{,}2}{100} = 1560 \quad ккал/м^3.$$

2. Теоретический расход воздуха определяется после расчета потребного количества кислорода.

Для расчета количества кислорода и определения состава продуктов горения предварительно следует составить табличную форму, которую в процессе расчета заполняют числовыми величинами (табл. 14).

Теоретическое количество воздуха составляет:

$$V_в^т = 29{,}5 \cdot 0{,}21 = 140{,}5 \ нм^3.$$

3. Действительное количество воздуха равно:

$$V_в^д = 1{,}25 \cdot 140{,}5 = 175{,}5 \ нм^3.$$

Остаточное количество кислорода:

$$O_{ост} = 0{,}21 \ (V_д - V_т) = 0{,}21 \ (175{,}5 - 140{,}5) = 7{,}4 \ нм^3.$$

Количество азота, поступающего в составе воздуха:

$$N_в = 0{,}79 \cdot V_д = 0{,}79 \cdot 175{,}5 = 138{,}6 \ нм^3.$$

4. Состав продуктов горения приводится в табл. 14.

5. Теоретическая температура горения определяется путем подбора значений.

Так как воздух, предварительно подогретый до 600°, вносит в зону горения дополнительное количество тепла к теплотворности газа, то сначала определяется теплосодержание воздуха при 600°.

$$Q_{возд} = C_в \cdot V_в \cdot t_в$$

где: $C_в = 0{,}324$ *ккал/м³ град;*
$V_в = 175{,}5$ *нм³;*
$t_в = 600°$;
$Q_{возд} = 0{,}324 \cdot 175{,}5 \cdot 600 = 34\,120$ *ккал.*

Таблица 14

Состав продуктов горения 100 *м³* газа

Топливо		Расход кислорода		Продукты горения				
составные части	%	коэффициент расхода	количество в *м³*	CO_2	H_2O	SO_2	O_2	N_2
CO_2	7,2	—	—	7,2	—	—	—	—
CO	26,4	0,5	13,2	26,4	—	—	—	—
CH_4	3,0	2,0	6,0	3,0	6,0	—	—	—
C_2H_4	0,4	3,0	1,2	0,8	0,8	—	—	—
H_2	14,5	0,5	7,3	—	14,5	—	—	—
H_2S	1,2	1,5	1,8	—	1,2	1,2	—	—
N_2	47,3	—	—	—	—	—	—	47,3
Итого . .	100,0	—	29,5	37,4	22,5	1,2	—	47,3
Из воздуха	—	—	—	—	—	—	7,4	138,6
Всего . .	—	—	29,5	37,4	22,5	1,2	7,4	185,9

Общее количество тепла, вносимое в зону горения 100 *нм³* генераторного газа с соответствующим количеством воздуха, подогретого до 600°:

156 000 + 34 120 = 190 112 *ккал*, или 1901 *ккал* на 1 *нм³* газа.

Задаемся ориентировочно теоретической температурой горения в 1800° и определяем количество тепла, необходимое для нагревания продуктов горения до 1800°:

$$Q_{CO_2+SO_2} = (37{,}4+1{,}2) \cdot 0{,}574 \cdot 1800 = 39\,800 \text{ ккал}$$
$$Q_{H_2O} = 22{,}5 \cdot 0{,}459 \cdot 1800 = 18\,580 \text{ „}$$
$$Q_{N_2} = 185{,}9 \cdot 0{,}351 \cdot 1800 = 117\,400 \text{ „}$$
$$Q_{O_2} = 7{,}4 \cdot 0{,}371 \cdot 1800 = 4\,950 \text{ „}$$
$$180\,730 \text{ ккал}$$

Полученное количество тепла относится к горению 100 *нм³* газа. Для нагревания продуктов горения, образующихся от сгорания 1 *нм³* генераторного газа, необходимо иметь тепла в 100 раз меньше, т. е. 1807 *ккал.*

Сравнивая это количество тепла с располагаемым (1901 *ккал*), делаем вывод, что искомая теоретическая температура горения будет более 1800°.

Для установления верхнего предела задаемся температурой горения в 1900° и так же, как в первом случае, определяем количество тепла, необходимое для нагревания продуктов горения 100 *нм*³ на 1900°:

$$Q_{CO_2+SO_2} = (37,4+1,2)\cdot 0,578\cdot 1900 = 42250 \text{ ккал}$$
$$Q_{H_2O} = 22,5\cdot 0,464\cdot 1900 = 19850 \text{ »}$$
$$Q_{N_2} = 185,9\cdot 0,353\cdot 1900 = 124600 \text{ »}$$
$$Q_{O_2} = 7,4\cdot 0,373\cdot 1900 = 5250 \text{ »}$$
$$191950 \text{ ккал}$$

или на нагревание продуктов горения 1 *м*³ генераторного газа 1920 *ккал*.

Очевидно, что количества тепла 1901 *ккал* недостаточно для нагревания продуктов горения до 1900° и, следовательно, искомая теоретическая температура горения t_x будет находиться в пределах от 1800 до 1900°.

Уточним эту температуру:

$$(t_x - 1800) : (1900 - 1800) = (1901 - 1807) : (1920 : 1807),$$

откуда $t_x = 1883°$.

Практическая температура горения составляет примерно 60—70% от теоретической, т. е. лежит в пределах 1130—1320°.

ЗАДАЧИ КО ВТОРОМУ РАЗДЕЛУ

1. Определить теоретическое количество воздуха (в *кг* и *м*³) для горения дров, состав которых принять по приложению 1.

2. Определить теоретическое количество воздуха (в *м*³), необходимое для горения водяного генераторного газа, состоящего из 50% CO и 50% H_2.

3. Определить теоретическое и действительное количество воздуха при $\alpha = 1,5$, необходимое для сжигания каменного угля следующего состава: $C^p = 72,0\%$; $H^p = 3,5\%$; $O^p = 7,7\%$; $N^p = 1,0\%$; $S^p = 0,8\%$; $W^p = 6,0\%$; $A^p = 9,0\%$. Расчет произвести в килограммах.

4. Определить теоретическое и действительное количество воздуха в куб. метрах для условий предыдущей задачи.

5. Определить теоретическое количество воздуха, необходимое для сгорания генераторного газа следующего состава: $CO_2 = 6,6\%$; $CO = 22,5\%$; $CH_4 = 0,9\%$; $C_2H_4 = 0,2\%$; $H_2 = 14,5\%$; $N_2 = 55,2\%$; $O_2 = 0,1\%$.

6. Определить избыток воздуха, если по анализу дымовых газов в них содержится: $CO_2 = 14,5\%$ и $O_2 = 4,8\%$.

7. Определить коэффициент избытка воздуха, если состав продуктов горения твердого топлива содержит: $CO_2 = 12,7\%$; $O_2 = 5,3\%$; $CO = 0,3\%$; $H_2 = 0,2\%$; $CH_4 = 0,1\%$; $N_2 = 81,4\%$.

8. Рассчитать процесс горения дров, органическая масса которых содержит $C^o = 50\%$; $H^o = 6\%$; $O^o = 43\%$ и $N^o = 1\%$.

Балласт состоит из $W^p = 30\%$ и $A^p = 1\%$. Горение происходит с избытком воздуха 30%.

Определить:

а) теоретическое количество воздуха;

б) действительное количество воздуха при указанном избытке его;

в) состав продуктов горения;

г) теоретическую и практическую температуры горения, если вторая составляет 60% первой.

9. Рассчитать горение донецкого антрацита, состав которого приведен в приложении 1.

Определить:

а) теоретическое и действительное количество воздуха при $\alpha = 1{,}4$ (по весу и объему);

б) состав дымовых газов (по весу и объему);

в) теоретическую и практическую температуры горения при пирометрическом коэффициенте горения, равном 0,7.

10. Произвести расчет процесса горения мазута по химическим уравнениям и формулам для приближенного расчета и сравнить полученные результаты. Избыток воздуха принять 20%. Состав мазута принять по приложению 1.

11. Рассчитать процесс горения генераторного газа. Состав газа принять любой из табл. 23.

Определить:

а) теплотворность генераторного газа;

б) теоретическое и действительное количество воздуха, если горение идет с избытком воздуха 20%;

в) состав продуктов горения;

г) теоретическую температуру горения генераторного газа, если он предварительно подогрет до 900°, а воздух, поступающий для горения, — до 1000°;

д) практическую температуру горения, если принять пирометрический коэффициент горения равным 0,65.

12. Рассчитать процесс горения природного газа Саратовского месторождения, состав которого приведен на стр. 40.

Определить:

а) теоретическое и действительное количества воздуха, если $\alpha = 1{,}2$;

б) состав продуктов горения при данном избытке воздуха;

в) сечение, которое должен иметь трубопровод для отвода продуктов горения, если за 1 час сжигается 1500 $м^3$ природного газа; средняя температура продуктов горения — 900°, а их скорость в трубопроводе — 5 *м/сек*.

13. Определить расход воздуха и объем дымовых газов, получающихся при горении донецкого антрацита, состав которого приведен в задаче 3 к первому разделу (см. стр. 43), если коэффициент избытка воздуха равен 1,5.

Определения произвести, применяя формулы для приближенного расчета, приведенные в табл. 13.

14. Определить, как изменится теоретическая температура горения мазута, если коэффициент избытка воздуха при горении его будет увеличен с 1,2 до 1,4. Расчет произвести по приближенным формулам. Теплотворность мазута принять по приложению 1.

15. Определить, на сколько градусов увеличится теоретическая температура горения природного газа, состав которого приведен на стр. 40, если поступающий для горения воздух будет нагрет до 800°.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОВТОРЕНИЯ КО ВТОРОМУ РАЗДЕЛУ

1. От каких основных факторов зависит скорость горения топлива?
2. Что называется кинетической и диффузионной областями горения?
3. Какие определения входят в типовой расчет процесса горения?
4. На следствии из какого закона основан метод расчета процесса горения в объемных единицах?
5. Назовите состав воздуха в процентах по весу и объему.
6. Как определить объемный вес газа, если известен вес его килограммолекулы?

7. Какая разница между теоретическим и действительным количеством воздуха, необходимым для горения?

8. Как зависит коэффициент избытка воздуха от вида сжигаемого топлива (твердое, жидкое, газообразное)?

9. Назовите продукты полного и неполного горения топлива в составе дымовых газов.

10. Как определить коэффициент избытка воздуха у работающей топки, если известен состав дымовых газов?

11. На применении какого закона основано составление материального баланса процесса горения?

12. Какую теплоемкость газов следует принимать при расчете теоретической температуры горения: истинную или среднюю?

13. Какая температура называется теоретической температурой горения топлива?

14. Что представляет собой пирометрический коэффициент процесса горения?

15. Как влияет избыток воздуха на теоретическую температуру горения топлива?

16. Каким путем можно увеличить температуру горения топлива?

РАЗДЕЛ ТРЕТИЙ

ДВИЖЕНИЕ ГАЗОВ В ТЕПЛОВЫХ УСТАНОВКАХ

Глава I

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ВЕЛИЧИНЫ

Процессы передачи тепла в печах, сушилках и других тепловых установках, в большинстве случаев, связаны с движением газов.

Движение газов имеет много общего с движением жидкостей, поэтому основные законы гидравлики применимы и к газам. Вместе с тем, между жидкостями и газами имеются и существенные различия в физических свойствах, определяющих разницу в характере их движения. Например, объемы жидкости при изменении температуры остаются практически неизменными, в то время как газы при нагревании, по закону Гей-Люссака, изменяют свои объемы весьма значительно, что необходимо учитывать в расчетах.

Наука, изучающая законы движения газов, называется газодинамикой, или аэродинамикой. Поэтому расчеты движения газов, выполняемые при проектировании печей и других тепловых устройств, называются аэродинамическими или газодинамическими расчетами.

Движение нагретых газов изучают очень давно. М. В. Ломоносов еще в 1742 г. в своей работе «О вольном движении воздуха в рудниках примеченном» впервые высказал мысль о том, что причиной движения воздуха в шахтах рудников является выдавливание внутреннего теплого воздуха внешним, холодным, более тяжелым.

М. В. Ломоносов считал, что и в печах, имеющих естественную тягу, движение газов происходит по той же причине, «ибо печь или труба *CD* представляет шахт, в котором воздух теплее и, следовательно, легче внешнего; *AB* — соответствующий ему воздушной столп много холоднее и гуще того, что в *CD*: для того движения из *B* к *D* тем быстрее, чем жар в *CD* больше и чем *CD* выше»[1] (рис. 12).

[1] В. Е. Грум-Гржимайло. Пламенные печи, ч. 1. Изд. Теплотехнического института, М., 1925.

В начале XX века эта мысль Ломоносова была развита русским ученым В. Е. Грум-Гржимайло, разработавшим первую научную теорию печей, названную им гидравлической теорией печей, потому что движение нагретых газов в печах и газоходах автор теории уподоблял движению воды в реках и каналах. По образному выражению его, газовый поток в печах представляет собой как бы обращенную реку.

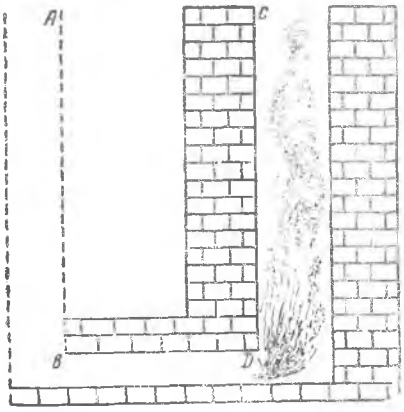


Рис. 12. Движение нагретых газов в печи.

Подобно тому, как водный поток в реке всегда течет от верхнего уровня к нижнему, заполняя по пути все неровности своего русла, так и поток нагретых газов в печах при своем движении заполняет все неровности пути, стремясь, однако, к обратному, т е. к подъему от нижнего уровня к верхнему, так как он легче окружающего его воздуха.

В условиях равномерного нагрева изделий в печи, поток горячих газов должен наполнять ее полностью для того, чтобы внизу печи не было слоев холодных неподвижных газов, бесполезных для нагрева изделий.

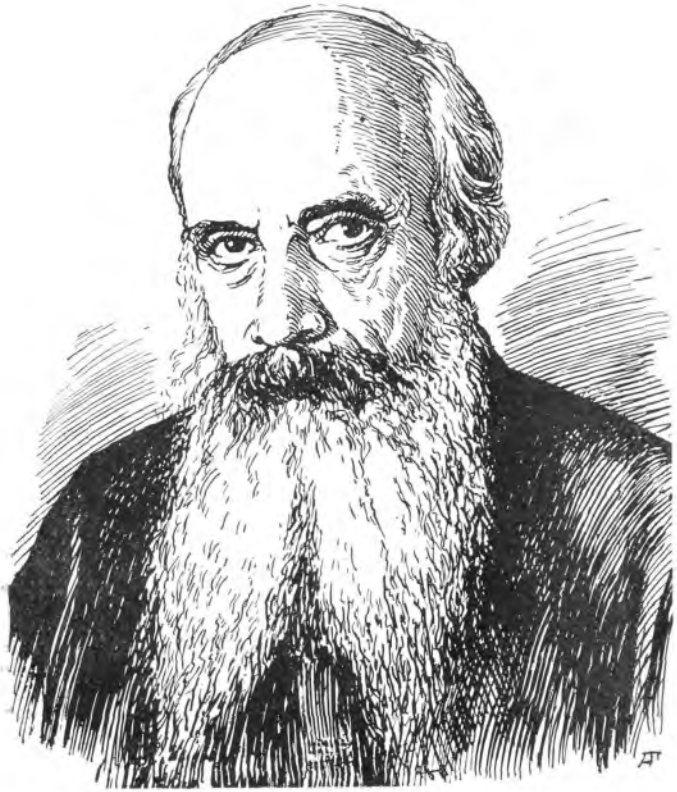
Гидравлическая теория относилась к печам, работавшим с применением естественной тяги, создаваемой дымовой трубой, и правильно объясняла работу печей.

На основе своей теории В. Е. Грум-Гржимайло сконструировал большое количество печей и сушилок для различных отраслей промышленности, которые в некоторых случаях сохранили свое значение до сих пор.

В дальнейшем гидравлическая теория В. Е. Грум-Гржимайло утратила свое практическое значение, так как в большинстве современных печей движение газов, вследствие применения специальных вентиляторов, подчиняется другим законам газодинамики.

Однако, будучи первой научной теорией печей, теория В. Е. Грум-Гржимайло сыграла прогрессивную роль на определенном этапе развития печной теплотехники.

Объемный вес газов. Объемным весом, как известно из физики, называется вес единицы объема твердого, жидкого или газообразного вещества.



Профессор Владимир Ефимович
ГРУМ-ГРЖИМАЙЛО
(1864 — 1928)

Обозначая вес газа через G, а объем — через V, получаем, что объемный вес:

$$\boxed{\gamma=\frac{G}{V}\,кг/м^3.} \qquad (20)$$

По закону Гей-Люссака, объем газов при изменении температуры изменяется следующим образом:

$$\boxed{V_t=V_0\left(1+\frac{1}{273}t\right).} \qquad (21)$$

Соответственно изменение объемного веса при изменении температуры выражается так:

$$\boxed{\gamma_t=\gamma_0\frac{273}{T},} \qquad (22)$$

где: γ_t — объемный вес при температуре t° в $кг/м^3$;
γ_0 — объемный вес при 0 в $кг/м^3$;
t — температура в град.;
T — абсолютная температура, равная $273+t$ град.

Пример. Определить объемный вес газа при температуре 1400°, если объемный вес его при 0 равен 1,3 $кг/м^3$.

$$\gamma_t=\gamma_0\frac{273}{T}=1{,}3\,\frac{273}{1400+273}=0{,}213\ кг/м^3.$$

Объемный вес нагретых газов значительно меньше объемного веса наружного холодного воздуха.

Вязкость газов. Величину вязкости газа характеризуют усилия, необходимые для сдвига одного слоя газа относительно других. Эта сила прямо пропорциональна скорости и поверхности соприкосновения слоев газа и обратно пропорциональна расстоянию между слоями:

$$\boxed{P=\mu\frac{vF}{h},} \qquad (23)$$

где: P — сила, необходимая для перемещения слоя газа в $кг$;
μ — коэффициент вязкости в $кг\,сек/м^2$;
v — относительная скорость перемещения в $см/сек$;
F — поверхность соприкосновения слоев в $м^2$;
h — расстояние между слоями в $м$.

В технических расчетах движения газов в газоходах применяется в основном понятие о кинематической вязкости газа, которая равна коэффициенту вязкости, деленному на плотность

газа. Размерность кинематической вязкости получается при подстановке соответствующих значений размерности для вязкости и плотности:

$$N = \frac{\mu g}{\gamma} = м^2/сек. \qquad (24)$$

где: μ — коэффициент вязкости газа в *кг сек/м²*,
g — ускорение силы тяжести в *м/сек²*,
γ — плотность газа в *кг/м³*.

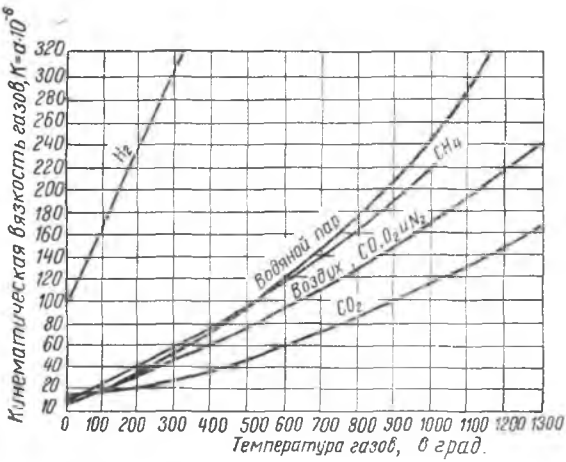


Рис. 13. Зависимость кинематической вязкости газов от температуры.

Вязкость газов сильно повышается при их нагревании. Значение кинематической вязкости для отдельных газов в зависимости от температуры следует принимать по рис. 13.

Глава II.

ПРИЧИНЫ И ВИДЫ ДВИЖЕНИЯ ГАЗОВ

1. ВИДЫ ДАВЛЕНИЙ

Столб жидкости или газа с площадью основания F и высотой h оказывает на площадь основания давление P, равное объему жидкости или газа, умноженному на объемный вес γ:

$$P = F \cdot h \cdot \gamma.$$

На единицу площади давление равно:

$$\boxed{P = h \cdot \gamma \ кг/м^2,} \qquad (25)$$

т. е. давление, производимое жидкостью или газом определенного объемного веса на единицу площади, равно высоте столба жидкости или газа, умноженной на его объемный вес.

Высота столба жидкости или газа, выражающая давление, называется напором.

Пример 1. Определить высоту столба воды, давление которого равно 1 $кг/м^2$.

Так как для воды $\gamma = 1000$ $кг/м^3$, по формуле (25) получим:

$$h = \frac{P}{\gamma} = \frac{1}{1000} = 0{,}001 \ м = 1 \ мм,$$

т. е. давление 1 $кг/м^2$ равно давлению 1 *мм* вод. ст.

Пример 2. Выразить давление столба керосина высотой 1 *м* при $\gamma = 800$ $кг/м^3$.

По формуле (25):

$$P = h\gamma = 1 \cdot 800 = 800 \ кг/м^2.$$

Давление характеризует запас энергии в жидкости или газе.

В общем случае газ при движении обладает как потенциальной, так и кинетической энергией. Потенциальная энергия жидкости и газа характеризуется статическим давлением, а кинетическая—динамическим давлением.

Запас потенциальной энергии, т. е. статическое давление, обусловлен положением тела в пространстве относительно определенного уровня и весом тела и может быть выражен геометрическим и статическим напорами.

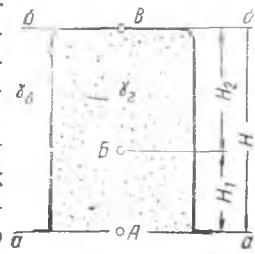


Рис. 14. Величина геометрического напора.

Геометрический напор выражает энергию положения газа по отношению к уровню, принятому за начало отсчета. Геометрическим напором газ обладает, если его объемный вес отличается от объемного веса окружающего его газа, например, атмосферного воздуха. Если газ легче окружающего воздуха, то он стремится подняться, если тяжелее,—он опускается.

Пусть сосуд высотой H и площадью сечения F наполнен газом объемного веса $\gamma_г$ и окружен воздухом объемного веса $\gamma_в$ (рис. 14). Если газ тяжелее воздуха, он опускается с силой, равной:

$$HF\gamma_г - HF\gamma_в.$$

Если газ легче воздуха, то он поднимается и его подъемная сила, согласно закону Архимеда, равна:

$$(HF\gamma_в - HF\gamma_г)\ кг.$$

Разница давлений столбов воздуха и газа при их высоте H *м* составляет.

$$\boxed{\Delta P = H(\gamma_в - \gamma_г)\ кг/м^2.} \qquad (26)$$

Если объемные веса равны, то разница давлений равна нулю. Если объемный вес газов меньше объемного веса воздуха, как это обычно бывает в печах, то разница давлений направлена вверх. Геометрический напор частицы газа в точке A, считая за начальный уровень плоскость *б—б*, будет $H\ (\gamma_в - \gamma_г)$; в точке $Б—H_2\ (\gamma_в - \gamma_г)$; в точке B, лежащей в плоскости *б—б*, геометрический напор будет равен нулю.

Пример. Сосуд высотой 5 *м*, открытый снизу, наполнен горячим газом с $t=500°$. Объемный вес газа $\gamma_г = 1{,}32$ *кг/м*³ при 0° и 760 *мм* рт. ст. Температура окружающего воздуха +25°.

Определить разницу давлений воздуха и газа вверху сосуда.

По формуле (26) имеем:

$$\Delta P = H(\gamma_{возд.} - \gamma_{газ.}) = 5\left(\frac{1{,}29\cdot 273}{273+25} - \frac{1{,}32\cdot 273}{273+500}\right) = 3{,}7\ кг/м^2.$$

Примером, иллюстрирующим действие подъемной силы газа, может служить подъем воздушных шаров, наполненных легким газом. Действием этой же силы объясняется выбивание струи горячего воздуха из душника нагретой комнатной печи или из верхней части остывающей обжигательной печи.

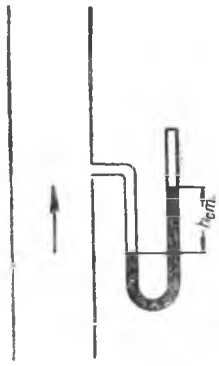


Рис 15. Схема определения статического напора.

Статический напор выражает разность энергии давления газа, заключенного в трубопроводе, печи, и давления окружающей среды. Статический напор получается сжатием газа с помощью вентиляторов, газодувок, и т. п. Если один конец манометра присоединить к трубопроводу перпендикулярно направлению течения газа, а другой оставить открытым, то по разности уровней жидкости в трубке можно определить разницу давлений газа в трубопроводе и окружающей атмосфере (рис. 15).

Если давление в трубопроводе больше атмосферного, его называют положительным, если меньше—отрицательным. Отрицательное давление называют также разрежением или вакуумом.

Динамическое давление. Кинетическая энергия газа, движущегося со скоростью v *м/сек*, определяется динамическим (скоростным) давлением:

$$h_{дин} = \frac{v^2}{2g}\gamma \text{ кг/м}^2.$$

Измерение динамического давления производится также с помощью манометра. Если один конец манометра присоединить к трубке, расположенной перпендикулярно потоку газа, а другой — к трубке, направленной навстречу потоку, то манометр покажет величину динамического давления (рис. 16).

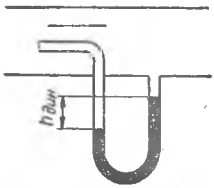


Рис. 16. Схема определения динамического давления.

В выражении динамического давления объемный вес и скорость зависят от температуры нагретого газа. Выразим объемный вес газа γ_t, при температуре t через объемный вес его при 0° γ_0 и скорость v_t через v_0 (скорость, отнесенная к 0°):

$$\gamma_t = \frac{\gamma_0}{1+\alpha t}; \; v_t = v_0(1+\alpha t).$$

Подставляя эти значения в выражение для скоростного давления, получим:

$$h = \frac{v^2 t}{2g}\gamma_t = \frac{v_0^2(1+\alpha t)^2}{2g}\cdot\frac{\gamma_0}{1+\alpha t} = \frac{v_0^2}{2g}\gamma_0(1+\alpha t).$$

2. ПРЕВРАЩЕНИЕ НАПОРОВ

При движении газа происходит превращение напоров. При сужении сечения трубопровода скорость движения газа возрастает за счет перехода части потенциальной энергии в кинетическую, и наоборот, при расширении сечения часть кинетической энергии переходит в потенциальную. При этом для идеального газа общее количество энергии остается неизменным.

Основной закон сохранения энергии применительно к установившемуся движению газов выражается уравнением Д. Бернулли[1], формулировка которого для идеальных газов следующая:

«При установившемся движении газа для любой его частицы сумма геометрического, статического и скоростного напоров есть величина постоянная».

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} = \text{постоянная},$$

[1] Даниил Бернулли (1700—1782), математик и механик, был членом Российской Академии Наук.

где: Z — высота, соответствующая геометрическому напору, в *м*;

$\frac{P}{\gamma}$ — высота, соответствующая статическому напору, в *м*;

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

Для реального несжимаемого газа, в результате потери напора на сопротивление движению, сумма напоров уменьшается на величину напора, потерянного на преодоление сопротивления:

$$h_{геом.} + h_{стат} + h_{дин} + h_{пот} = \text{постоянная},$$

где: $h_{пот}$ — давление, затраченное на преодоление сопротивления по пути перехода из одного сечения в другое.

3. ПОТЕРИ ДАВЛЕНИЯ ПРИ ДВИЖЕНИИ ГАЗОВ

Энергия, которой обладает газ при движении, измеряемая давлением, расходуется на создание скорости движения и преодоление возникающих при этом сопротивлений.

К основным потерям давления, вызываемым сопротивлениями при движении газов, относятся потери на преодоление силы трения о стенки газоходов и на преодоление так называемых местных сопротивлений.

Потеря на трение в газоходах любого сечения определяется по формуле:

$$R = \rho \frac{lp}{4F} \cdot \frac{v^2}{2g} \gamma \ кг/м^2, \qquad (27)$$

где: ρ — коэффициент сопротивления трению, зависящий от состояния поверхности газохода и скорости движения газов (для кирпичных каналов—0,05, для металлических—0,02 — 0,03);

p — периметр газохода в *м*;

F — площадь сечения газохода в $м^2$;

l — длина газохода в *м*;

v — скорость газа в *м/сек*;

γ — объемный вес газа при данной температуре в $кг/м^3$.

Под местными сопротивлениями понимают сопротивления, возникающие при изменении направления газов или при изменении сечения канала. На преодоление этих сопротивлений теряется известная часть давления, так же как и на трение.

Потеря давления на местные сопротивления:

$$Z = \xi \frac{v^2}{2g} \gamma \text{ кг/см}^2, \tag{28}$$

где ξ — коэффициент местного сопротивления, полученный экспериментальным путем. В прил. VII приведены значения коэффициентов для наиболее распространенных видов местных сопротивлений.

4. СИЛЫ, ВЫЗЫВАЮЩИЕ ДВИЖЕНИЕ ГАЗОВ

Различают свободное и принудительное движение газов. Свободное движение возникает вследствие действия подъемной силы, приобретаемой газом при нагревании. При этом газ увеличивает свой объем. Объемный вес его становится меньше, в результате чего возникает разница давлений, равная произведению высоты столба горячего газа на разность объемных весов холодного воздуха и горячего газа. Примером может служить действие дымовой трубы.

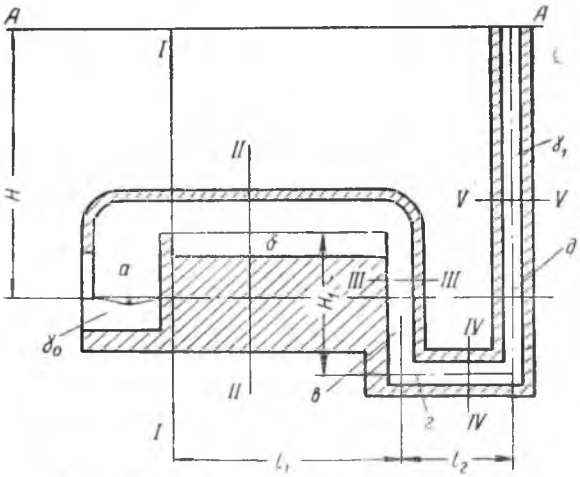


Рис. 17. Схема действия дымовой трубы.

На рис. 17 показана схема действия дымовой трубы. При сжигании топлива в топке *а* получающиеся газы устремляются в рабочее пространство печи *б*, а затем через дымовые каналы *в* и *г* в дымовую трубу *д*. Движение это происходит под действием следующих сил: с одного конца печи на плоскость колосниковой решетки давит столб атмосферного воздуха высотой H с давлением $P_1 = H\gamma_0$, где γ_0 — объемный вес холодного возду-

ха. К этому добавляется атмосферное давление P_0, действующее на плоскость AA. Таким образом, всего на плоскость колосниковой решетки действуют:

$$P_1 + P_0 = H\gamma_0 + P_0 \text{ кг/м}^2 .$$

В плоскости дымовой трубы в одном сечении с колосниковой решеткой действуют: давление столба горячих газов $P_2 = H\gamma_t$, γ_t —объемный вес горячих газов, и атмосферное давление P_0, т. е.:

$$P_2 + P_0 = H \cdot \gamma_t + P_0.$$

Если из первого равенства вычесть второе, то получим:

$$P_1 + P_0 - P_2 - P_0 = H\gamma_0 - H\gamma_t$$

или

$$P_1 - P_2 = H(\gamma_0 - \gamma_t).$$

Так как объемный вес γ_0 холодного воздуха численно больше, чем объемный вес газов γ_t, то разность давления $P_1 - P_2$ всегда больше нуля. Поэтому газы будут двигаться по направлению к дымовой трубе.

Высота дымовой трубы определяется в зависимости от разрежения, требующегося для преодоления сопротивлений по пути движения газов до трубы и в самой трубе.

Тяга (S), создаваемая трубой высотой H, равна:

$$S = 273\, H\left(\frac{\gamma_0^в}{273 + t_в} - \frac{\gamma_0^г}{273 + t_{ср}}\right)\frac{B}{760},$$

где: H — высота трубы в *м*;

$\gamma_0^в$—удельный вес воздуха в *кг/нм*^{3};

$t_в$ — температура воздуха в град. С;

$\gamma_0^г$—объемный вес газов в *кг/м*^{3};

$t_{ср}$—средняя температура газов в трубе в град. С;

B — минимальное барометрическое давление для данной местности в *мм* рт. ст.

В рассмотренном примере давление, вызвавшее движение газов, является следствием разности давлений наружного воздуха и газа. Однако давление можно создать и вентилятором.

5. ВИДЫ ДВИЖЕНИЯ ГАЗОВ

При движении газа по газопроводам и каналам наблюдаются два различных вида движения:

параллельноструйный, называемый ламинарным, и вихреобразный, называемый турбулентным.

Предельная скорость, при которой может быть сохранено

ламинарное движение, называется **критической скоростью**.

Характер движения жидкостей или газов зависит от числа Рейнольдса Re:

$$\boxed{Re = \frac{v \cdot d \cdot \gamma}{\mu \cdot g} = \frac{v \cdot d}{\nu}\,,} \qquad (29)$$

где: v — средняя скорость по данному сечению трубопровода в *м/сек*;

d — диаметр трубопровода в *м*;

γ — объемный вес газа в *кг/м*^{3};

μ — коэффициент вязкости газа в *кг · сек/м*^{2};

g — ускорение силы тяжести (9,81 *м/сек*^{2});

ν — кинематическая вязкость жидкостей и газов в *м*^{2}*/сек*.

Число Рейнольдса является безразмерной величиной.

Если трубопровод не круглого сечения, то вместо d необходимо в формулу (29) подставить значение так называемого приведенного диаметра.

Приведенным диаметром называют диаметр трубопровода, сопротивление трения в котором равно сопротивлению трения в данном канале при одинаковой в них скорости.

Сопротивление трения любого канала пропорционально $\frac{P}{F}$.

Для круглого сечения:

$$\frac{P}{F} = \frac{\pi d}{\frac{\pi d^2}{4}} = \frac{4}{d}\,.$$

Если сопротивление любого канала сечения F_1 и периметра P_1 равно сопротивлению трубопровода круглого сечения приведенного диаметра $d_{пр}$, то можно составить равенство:

$$\frac{P_1}{F_1} = \frac{4}{d_{пр}},$$

откуда

$$\boxed{d_{пр} = \frac{4F_1}{P_1},} \qquad (30)$$

т. е. приведенный диаметр равен отношению учетверенной площади данного сечения к периметру этого же сечения.

Пример. Определить приведенный диаметр для прямоугольного канала со сторонами a и $в$.

По формуле (30) находим:

$$d_{пр} = \frac{4F_1}{P_1} = \frac{4\,a \cdot в}{2(a + в)} = \frac{2\,a \cdot в}{a + в}.$$

Если $Re \leqslant 2320$, то движение—струйчатое. Если $Re < 4000$, то движение происходит в переходной области между ламинарным и турбулентным. Если $Re > 4000$, то движение—турбулентное.

Из выражения (29) можно найти значение для критической скорости различных газов, если знать величину их вязкости и приведенный диаметр канала.

Легко определить, что для размеров газопроводов, применяющихся в технике, при обычных скоростях движение будет всегда турбулентным.

Пример. Определить критическую скорость для продуктов горения при следующих условиях: $t_{газа} = 1000°$; $\gamma_0 = 1{,}3$ *кг/м*³; размеры канала—0,5×0,6 *м*.

Из формулы (29) определяем $v_{кр}$:

$$v_{кр} = \frac{Re\,\nu}{d_{пр}}.$$

Для данного случая $Re = 2320$ и $\mu = 3{,}9 \cdot 10^{-6}\ \frac{кг \cdot сек}{м^2}$.

По формуле (24) и значению μ находим:

$$\nu = \frac{\mu \cdot g}{\gamma} = \frac{3{,}9 \cdot 10^{-6} \cdot g}{\gamma} = \frac{3{,}9 \cdot 10^{-6} \cdot 9{,}81}{\frac{1{,}3 \cdot 273}{1273}} = 136 \cdot 10^{-6}\ м^2/сек;$$

$$d_{пр} = \frac{4F}{P} = \frac{4 \cdot 0{,}5 \cdot 0{,}6}{2(0{,}5 + 0{,}6)} = 0{,}55\ м.$$

Следовательно:

$$v_{кр} = \frac{2320 \cdot 136 \cdot 10^{-6}}{0{,}55} = 0{,}57\ м/сек.$$

Скорость газов в дымовых каналах обычно равна 3—4 *м/сек*, и движение газов в этом случае турбулентное.

При движении газов в каналах скорость их распределяется неравномерно по всему сечению. Максимальная скорость соответствует оси канала. Чем дальше от оси, тем скорость движения газов меньше; у стенок она равняется нулю.

Если движение в каналах ламинарное, то кривая распределения скорости по сечению канала имеет вид параболы, показанной на рис. 18. При этом средняя скорость потока газов приблизительно равна 0,5 максимальной скорости на оси трубы.

Различают следующие виды турбулентного движения в трубах:

а) если пограничный ламинарный слой покрывает абсолютную шероховатость трубы, то последняя считается гидравлически гладкой;

б) если пограничный ламинарный слой не покрывает абсолютную шероховатость трубы, то она считается шероховатой.

С увеличением числа Рейнольдса толщина ламинарного слоя у стенки уменьшается.

Одна и та же труба может быть и гидравлически гладкой и гидравлически шероховатой, в зависимости от скорости движения в трубе, т. е. от числа Рейнольдса.

Между областью гладких и шероховатых труб существует еще бо́льшая переходная область, когда ламинарный слой недостаточно покрывает шероховатость. В этом случае коэффициент

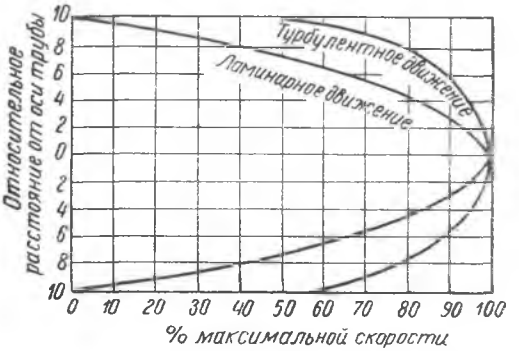


Рис. 18. Скорости ламинарного и турбулентного движения.

сопротивления трения зависит и от числа Рейнольдса и от абсолютной шероховатости.

Считают, что жидкость или газ прилипают к стенке трубы, следовательно, скорость здесь равна нулю; затем вблизи самой стенки существует весьма тонкий пограничный слой ламинарного потока. Здесь скорость быстро возрастает. Говорят, что ламинарный слой является как бы смазкой у стенок трубы.

6. ПРИМЕР РАСЧЕТА СОПРОТИВЛЕНИЙ ПРИ ДВИЖЕНИИ ГАЗОВ

Дымовые газы (см. рис. 17) движутся из топки *а* через камеру печи *б* и каналы *в* и *г* к дымовой трубе *д*.

Определить сопротивления при этом движении при следующих данных: количество газов—6000 *м*³/*час* (при 0° и 760 *мм* рт. ст.); объемный вес газов—1,3 *кг*/*м*³; площадь сечения I — I — 1 × 0,5 *м*; площадь сечения II—II—2 × 2 *м*; площадь сечения III—III—0,5×0,5 *м*; длина l_1=10 *м*; H_1=2 *м*; l_2=6 *м*; площадь сечения IV—IV—0,5×0,5 *м*; температура газов: в топке—1100°, в печной камере—1000°, в канале *в*—900°, в канале *г*—800°.

Расчет сопротивлений ведется по отдельным участкам.

1. **Топка.** Основные сопротивления возникают при проходе воздуха через колосниковую решетку и слой топлива. Величина их зависит от конструкции топки, рода сжигаемого топлива и тщательности обслуживания.

В конце топки продукты горения встречают сопротивление при повороте в печную камеру и при проходе через окно (изменение поперечного сечения), которые подсчитываем по формуле (28):

$$Z = \xi \frac{v^2}{2g} \gamma .$$

Значение ξ определяем по приложению VII.

Для поворота на 90°:

$$\xi = 1{,}5;$$

$$\xi_2 = \left(1 - \frac{F_1}{F_2}\right)^2,$$

где $F_1 = 0{,}5$ и $F_2 = 4$.

Для изменения сечения:

$$\xi_2 = \left(1 - \frac{0{,}5}{4}\right)^2 = 0{,}77 .$$

Скорость в сечении I—I:

$$v_1 = \frac{6000}{0{,}5 \cdot 3600} = 3{,}3 \text{ м/сек (при 0° и 760 мм рт. ст.)};$$

$$\gamma_{1100} = \frac{1{,}3 \cdot 273}{1373} = 0{,}26 \text{ кг/м}^3.$$

Потеря на поворот:

$$Z_1 = \xi \frac{v_1^2}{2g} \gamma_{1100} = 1{,}5 \frac{3{,}3^2}{19{,}6} \cdot 0{,}26 = 0{,}22 \text{ кг/м}^2.$$

Потеря на изменение сечения:

$$Z_2 = \xi_2 \frac{v^2}{2g} \gamma_{1100} = 0{,}77 \frac{3{,}3^2}{19{,}6} \cdot 0{,}26 = 0{,}12 \text{ кг/м}^2 .$$

2. **Печная камера.** На этом прямолинейном участке имеет место сопротивление трения, определяемое по формуле (27):

$$R_1 = \rho \frac{l_1 P_1}{4F_2} \cdot \frac{v^2}{2g} \gamma_{1000},$$

где: $\rho = 0{,}05$;

$l_1 = 10$ м;

$P_1 = (2 + 2) \cdot 2 = 8$ м;

$F_2 = 4$ м²;

$v_2 = \frac{6000}{4 \cdot 3600} = 0{,}4$ м/сек;

$\gamma_{1000} = 1{,}3 \frac{273}{1273}$ кг/м³;

$$R_1 = 0{,}05 \frac{10 \cdot 8}{4{,}4} \cdot \frac{0{,}4^2}{19{,}6} \cdot \frac{1{,}3 \cdot 273}{1273} = 0{,}0005 \text{ кг/м}^2 .$$

Как видим, сопротивление трения при данных условиях ничтожно мало.

3. **Переход из печной камеры в каналы.** Здесь имеет место поворот:

$$Z_3 = \xi_3 \frac{v_2^2}{2g} \gamma_{1100},$$

где $\xi_3 = 1{,}5$;

$$Z_3 = 1{,}5 \frac{0{,}4^2}{19{,}6} \cdot \frac{1{,}3 \cdot 273}{1273} = 0{,}0033 \ кг/м^2$$

и изменение сечения:

$$Z_4 = \xi_4 \frac{v_3^2}{2g} \gamma_{900},$$

где:

$$\xi_4 = 0{,}5\left(1 - \frac{F_2}{F_1}\right)^2 = 0{,}5\left(1 - \frac{0{,}25}{4}\right)^2 = 0{,}45;$$

$$Z_4 = 0{,}45 \frac{6{,}7^2}{19{,}6} \cdot 0{,}3 = 0{,}31 \ кг/м^2.$$

4. **Каналы.** Здесь имеем сопротивление трения, преодоление подъемной силы газа и потери на изменение направления (поворот в канал *г*).

Потери на преодоление подъемной силы газа:

$$Z_5 = H_1(\gamma_в - \gamma_г) = 2\left(1{,}29 - 1{,}3 \frac{273}{1173}\right) = 2 \ кг/м^2.$$

Потери на трение и поворот:

$$R_2 + Z_6.$$

Скорость в канале *в*:

$$v_3 = \frac{6000}{0{,}25 \cdot 3600} = 6{,}7 \ м/сек;$$

$$\gamma_{900} = 1{,}3 \frac{273}{1173} = 0{,}3 \ кг/м^3;$$

$$R_2 + Z_6 = \left(\rho \frac{HP}{4F} + \xi_5\right) \frac{v_3^2}{2g} \gamma_{900};$$

$$R_2 + Z_5 = \left(0{,}05 \frac{2 \cdot 2}{4 \cdot 0{,}25} + 1{,}5\right) \cdot \frac{6{,}7^2}{19{,}6} \cdot 1{,}3 \cdot \frac{273}{1173} = 1{,}15 \ кг/м^2.$$

5. **Канал** *г*. Здесь сопротивление трения R_3 и поворот при переходе в трубу Z_7.

Скорость $v_3 = 6{,}7$ *м/сек*:

$$R_3 + Z_7 = \left(\frac{0{,}05 \cdot 6{,}2}{4 \cdot 0{,}25} + 1{,}5\right) \cdot \frac{6{,}7^2 \cdot 1{,}3 \cdot 273}{19{,}6 \cdot 1073} = 1{,}60 \ кг/м^2,$$

Таблица 15

Таблица для расчета сопротивлений при движении газов

Наименование отдельных участков пути движения газов	Длина l в $м$	Площадь F в $м^2$	Периметр P в $м$	Расход газа V_0 в $м^3/сек$	Скорость газа v в $м/сек$	Температура t° в град. С	Объемный вес γ_t газа при t° в $кг/м^3$	Динамическое давление в $кг/м^2$	Преодоление подъемной силы газов	Коэффициент сопротивления трению ρ	Сопротивление трения R в $кг/м^2$	Коэффициент местного сопротивления ξ	Местное сопротивление Z в $кг/м^2$	Суммарное сопротивление $R+Z$ в $кг/м^2$
Топка	—	0,5	3	6000	3,3	1100	0,26	0,56	—	—	—	2,27	0,34	0,34
Печная камера	10	4,0	8	6000	0,4	1000	0,28	0,008	—	0,05	0,0005	—	—	0,0005
Переход из печной камеры в каналы	—	0,25	2	6000	6,7	1000	0,28	—	—	—	—	1,95	0,31	0,31
Канал *в*	2	0,25	2	6000	6,7	900	0,3	2,3	2	0,05	0,14	1,5	1,01	3,15
Канал *г*	2	0,25	2	6000	6,7	800	0,33	2,3	—	0,05	0,46	1,5	1,15	1,6
														5,400 $кг/м^2$

Общее сопротивление на пути от топки до трубы:

$$R + \Sigma Z = 0{,}22 + 0{,}12 + 0{,}0005 + 0{,}31 + 3{,}15 + 1{,}60 = 5{,}40 \text{ кг/м}^2.$$

Для облегчения вычислений рекомендуется пользоваться табл. 15, вписав в нее последовательно весь путь газов и все данные по отдельным участкам. Расчет производят по каждому участку и полученные результаты складывают.

Глава III

УСТРОЙСТВА И УСТАНОВКИ ДЛЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ГАЗОВ

Для перемещения газов в тепловых установках применяют дутьевые и вытяжные устройства. Движение газов в тепловых установках происходит, главным образом, за счет тяги.

Различают два вида тяги: естественную и искусственную. Естественная тяга создается под действием дымовой трубы, искусственная—в результате работы вентиляторов.

1. ВЫТЯЖНЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ЕСТЕСТВЕННОЙ ТЯГИ

Разрежение, создаваемое дымовой трубой, зависит от высоты трубы, температуры отходящих газов и температуры окружающего воздуха. Чем выше труба, чем выше температура отходящих газов и чем ниже температура окружающего воздуха, тем больше разрежение, создаваемое дымовой трубой.

Увеличение температуры отходящих газов благоприятно отзывается на величине разрежения, но невыгодно, так как при этом теряется много тепла.

Разрежение, создаваемое трубой в зимнее время, значительно больше, чем летом. Как правило, высоту трубы следует определять для летних условий. Разрежение, создаваемое дымовой трубой у ее основания, равно:

$$S = 273\,H\left(\frac{\gamma_0^в}{T_в} - \frac{\gamma_0^г}{T_{ср}^г}\right)\cdot\frac{B}{760} - r\,\frac{H}{d_{ср}}\,\gamma_0^г\,\frac{273 + t_{ср}^г}{273}\,\frac{v_{0\,ср}^г}{2g} -$$

$$- \frac{v_{0y}^г}{2g}\,\gamma_0^г\,\frac{273 + t_г}{273},$$

где. r — коэффициент сопротивления от трения (для кирпичных труб в среднем 0,03);

$d_{ср}$ — средний диаметр трубы в *м*;

$t_г$ — температура газов при выходе из трубы, в град. С;

$t_{ср}^г$ — средняя температура газов в трубе в град. С;

$v_{0\,ср}^г$ — средняя скорость газов в трубе при нормальных условиях в *м/сек*;

v_{0y} — скорость газов при выходе из трубы в *м/сек*.

Второй член формулы выражает потерю напора на трение а третий—потерю напора при выходе из трубы.

Падение температуры по высоте трубы составляет в среднем для кирпичных труб 0,5 — 1° и для железных — до 2° на метр. Среднюю температуру газов в трубе можно определять по формуле: $t_{ср} = t_{осн} - \frac{H}{2}$.

Площадь верхнего сечения дымовой трубы определяется из выражения

$$F = \frac{V}{v},$$

где: V — общее количество уходящих газов в *м*³ в *сек.*;
v — скорость в *м/сек.*

При круглом сечении диаметр верхнего сечения $D_в = \sqrt{\frac{4V}{\pi v}}$.

Для создания больших скоростей движения газов и преодоления связанных с ними повышенных сопротивлений приходится прибегать к искусственной тяге.

2. УСТРОЙСТВА И ПРИСПОСОБЛЕНИЯ ДЛЯ ИСКУССТВЕННОЙ ТЯГИ

Для создания искусственной тяги служат вентиляторы, которые, в отличие от дымовой трубы, могут создавать как разрежение, так и давление.

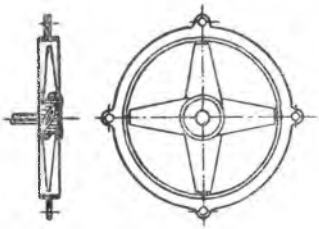


Рис. 19. Осевой вентилятор.

Вентиляторы могут создавать давление до 2000 *кг/м*², т. е. во много раз больше, чем дымовая труба. Различают вентиляторы низкого давления, развивающие давление до 100 *кг/м*², среднего—от 100 до 300 *кг/м*² и высокого — свыше 300 *кг/м*².

По принципу действия различают вентиляторы осевые и центробежные.

Осевой вентилятор представляет собой несколько крыльев, насаженных на втулку и заключенных в кожух. По внешнему виду они напоминают пропеллер. Осевые вентиляторы (рис. 19) имеют к. п. д. 0,6.

Центробежный вентилятор (рис. 20) состоит из кожуха в форме улитки, внутри которого вращается колесо с лопатками.

Работа центробежного вентилятора происходит следующим образом. При вращении колеса воздух, находящийся внутри вентилятора, под действием центробежной силы приводится в движение, отбрасывается от центра к окружности и далее направляется к выходному патрубку кожуха. Внутри вентилятора

при этом образуется разрежение, вследствие чего через всасывающее отверстие в него поступают газ или воздух.

Давление, создаваемое центробежными вентиляторами, а также их производительность изменяются в очень широких пределах, почему они и получили большое распространение.

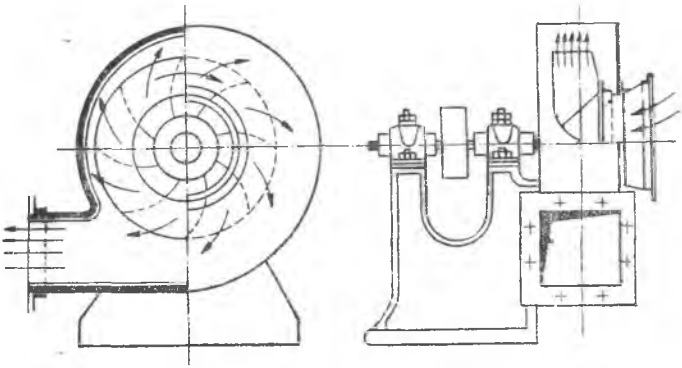


Рис. 20. Центробежный вентилятор.

Суммарное или, иначе, полное давление, создаваемое вентилятором, состоит из статического и динамического давлений.

Между числом оборотов, производительностью, давлением и мощностью электродвигателя центробежного вентилятора существует определенная зависимость. Производительность вентилятора (количество подаваемого воздуха) возрастает пропорционально увеличению числа оборотов. Создаваемое давление пропорционально квадрату числа оборотов, а потребляемая мощность—кубу числа оборотов.

Обозначив через n и n_1 — число оборотов, Q и Q_1 — производительность в *м*³/*сек*, h и h_1 — давление в *кг*/*м*² и N и N_1 — теоретическую мощность для вращения колеса вентилятора, можно написать:

$$\boxed{\frac{Q}{Q_1} = \frac{n}{n_1}\,;\ \frac{h}{h_1} = \frac{n^2}{n_1^2}\,;\ \frac{N}{N_1} = \frac{n^3}{n_1^3}\,.} \qquad (31)$$

Пример. Для увеличения количества воздуха, подаваемого в сушилку, число оборотов вентилятора увеличено вдвое. Определить, во сколько раз возросло количество подаваемого воздуха и потребляемая мощность электродвигателя.

По формуле (31):

$$\frac{Q_1}{Q} = \frac{n_1}{n} = 2;\ \frac{N_1}{N} = \frac{n^3}{n^3} = \left(\frac{n_1}{n}\right)^3 = 8.$$

откуда $Q_1 = 2Q$, а $N_1 = 8N$, т. е. производительность вентилятора возросла в два раза, а потребляемая мощность — в восемь раз.

Действительная мощность, потребляемая на валу вентилятора, равна:

$$N_д = \frac{Qh}{3600 \cdot 75\,\eta_в} \text{ л. с. или } N_д = \frac{Qh}{1{,}36 \cdot 75\,\eta_в \cdot 3600} \text{ квт}, \quad (32)$$

где: Q — производительность в *м³/час*;

h — давление в *мм* вод. ст.;

$\eta_в$ — к. п. д. вентилятора, равный 0,4—0,6.

Для вентиляторов высокого давления к. п. д. больше, чем для вентиляторов низкого давления.

Мощность, потребляемая на валу электродвигателя при ременной передаче:

$$_{в.э} = \frac{Qh}{1{,}36 \cdot 75\,\eta_в \cdot \eta_п\, 3600} \text{ квт}, \quad (33)$$

где $\eta_п$ — к. п. д. ременной передачи, равный 0,9—0,95.

Мощность, потребляемая на клеммах электродвигателя при ременной передаче:

$$N_к. = \frac{Qh}{3600 \cdot 1{,}36 \cdot 75\,\eta_в \cdot \eta_п \cdot \eta_э} \text{ квт},$$

где $\eta_э$ — к. п. д. электродвигателя, равный 0,9.

Установочную мощность на случай перегрузки следует брать больше расчетной на 15—20%.

Подбор вентилятора производят по таблицам заводов, изготовляющих вентиляторы. В таблицах помещается характеристика вентиляторов, содержащая значения: производительности Q в *м³/час*, статического $h_{ст}$ и динамического $h_{дин}$ давлений в зависимости от числа оборотов n и потребляемой мощности N. В новейших таблицах приведены общие давления и скорость газов.

Для выбора вентилятора надо определить его производительность и подсчитать сопротивления на пути движения газов. По этим величинам подбирают из таблиц соответствующий номер вентилятора, который указывает размер рабочего колеса в дециметрах для вентиляторов низкого давления. Для вентиляторов среднего давления номер вентилятора приблизительно равен диаметру рабочего колеса в сантиметрах, деленному на 11.

Таблицы вентиляторов обычно составляются для воздуха при температуре 20° и объемном весе 1,2 *кг/м³*. При использовании

вентилятора для газов или воздуха с другим объемным весом необходимо ввести поправку на величину давления при действительных условиях.

Давление при данной температуре:

$$h_t = h_{20} \frac{\gamma_t}{\gamma_{20}},$$

где: h_{20} — давление (из таблиц);
γ_t — объемный вес газов при $t°$;
γ_{20} — объемный вес воздуха (из таблиц) (1,2 *кг/м*³).

3. ХАРАКТЕРИСТИКА ВЕНТИЛЯТОРОВ

Подбор вентиляторов может производиться, кроме таблиц, еще по так называемым характеристическим кривым, которые графически выражают связь между основными параметрами работы вентилятора. Полная характеристика вентилятора при постоянном числе оборотов (n=постоян.) выражает зависимость между производительностью Q, давлением P, мощностью N и к. п. д. η.

Полные характеристики вентиляторов позволяют выбрать наиболее экономичный для заданных условий вентилятор.

На рис. 21 приведены номограмма вентиляторов низкого давления, а на рис. 22—вентиляторов среднего давления, которыми следует пользоваться при подборе вентиляторов.

В нижней половине номограмм по оси ординат отложены производительности вентиляторов в *м*³/*час*, по которым подбирают номер вентилятора.

В верхней половине номограмм по оси ординат полные давления вентиляторов *кг/м*²; кривые, идущие от начала координат кверху, представляют к. п. д. вентилятора при различной его производительности.

Крайняя кривая справа выражает значение динамического давления для разного числа оборотов.

Число оборотов определяется по кривым, идущим слева направо в горизонтальном направлении. Верхняя кривая обычно соответствует наибольшему числу оборотов, допустимому по соображениям прочности. Число оборотов получается от деления числа A, показанного на кривой, на номер вентилятора.

Пример. Подобрать вентилятор для подачи 30 000 *м*³/*час* при $H_{п.в}$=60 *кг/м*².

По номограмме (рис. 21) видно, что можно установить два вентилятора: № 9½ и № 8. Для установки принимаем вентилятор с наиболее высоким к. п. д. Таким вентилятором будет № 9½ с к. п. д., равным 0,56, при числе оборотов, равном

$$n = \frac{A}{№} = \frac{4250}{9,5} = 447 \text{ об/мин.}$$

По этим данным определится потребная мощность электродвигателя вентилятора:

$$N = \frac{30\,000 \cdot 60}{3\,600\ 102 \cdot 0{,}56 \cdot 0{,}95 \cdot 0{,}97} = 10{,}5\ \textit{квт}.$$

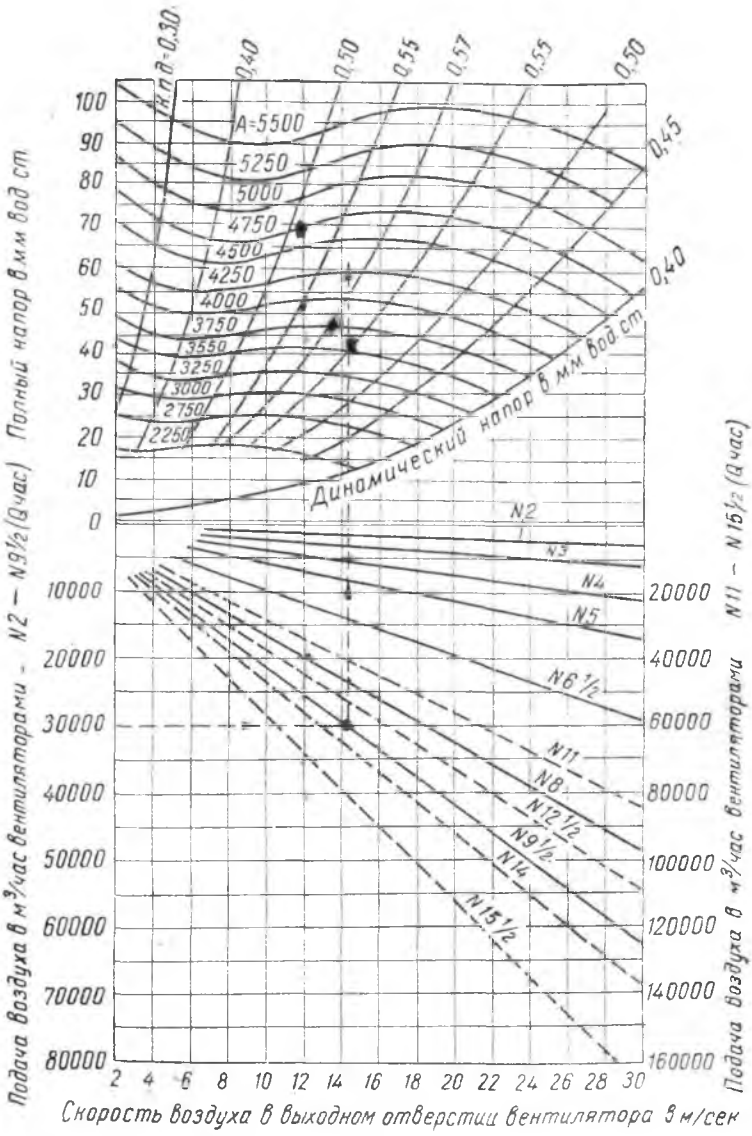


Рис. 21. Номограмма для подбора вентиляторов низкого давления.

ЗАДАЧИ К ТРЕТЬЕМУ РАЗДЕЛУ

1. Дымоход печи высотой 3 *м* заполнен воздухом, температура которого—500°. Определить давление вверху дымохода, если температура наружного воздуха 30°, а объемный вес воздуха 1,3 *кг/м*³ при 0° и 760 *мм*. рт. ст.

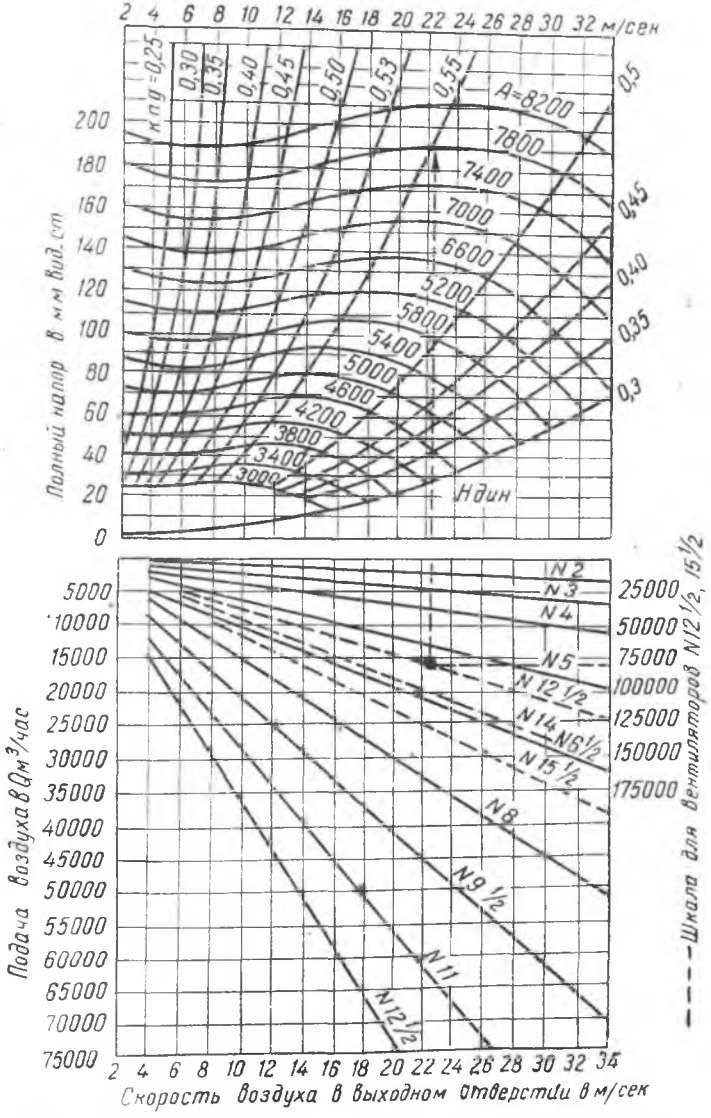


Рис. 22. Номограмма для подбора вентиляторов среднего давления.

2. Определить размеры дымовой трубы для удаления из печи 15 000 *м*³/*час* дымовых газов при температуре 200°, если разрежение равно 25 *мм* вод. ст. ($\gamma_г^0 = 1{,}3$ *кг/м*³).

3. Для условий задачи № 2 подобрать вентилятор и определить потребную мощность электродвигателя, пользуясь характеристиками.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОВТОРЕНИЯ К ТРЕТЬЕМУ РАЗДЕЛУ

1. В чем состоит причина движения газов в печах по М. В. Ломоносову?
2. Какие существуют виды давлений?
3. Напишите формулу для определения величины сопротивления от трения при движении газов.
4. Как выражаются потери давления в местных сопротивлениях?
5. Чем отличается ламинарное движение от турбулентного?
6. Что такое критерий Рейнольдса и как он вычисляется?
7. На чем основано действие дымовой трубы?
8. Как рассчитывают высоту дымовой трубы?
9. Чем отличаются осевые вентиляторы от центробежных?
10. Какова зависимость между числом оборотов центробежного вентилятора, его производительностью, давлением и расходом мощности?
11. Как делятся центробежные вентиляторы по величине давления?
12. Что такое характеристика вентилятора?
13. Как подбираются центробежные вентиляторы?
14. Как определяется расход мощности на валу вентилятора?

РАЗДЕЛ ЧЕТВЕРТЫЙ

ОСНОВЫ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ

Передача тепла может осуществляться теплопроводностью, конвекцией и излучением.

Теплопроводностью (кондукцией) называют передачу тепла между соприкасающимися частицами тела разной температуры. Такова передача тепла в твердых телах; например, передача тепла в кирпичной кладке или металлическом стержне.

Конвективной теплопередачей называется передача тепла посредством перемещения отдельных частиц тел с различной температурой. Этот способ передачи тепла имеет место в жидкостях и газах, в которых вследствие изменения их удельного веса при нагревании возникает движение отдельных частиц. При перемещении отдельных частиц газа или жидкости с различной температурой одновременно с ними переносится известное количество тепла, содержащегося в них. При этом имеет место также передача тепла между частицами газов и жидкости и твердыми телами, с которыми они соприкасаются. Совокупное действие обоих способов переноса тепла в движущейся среде и называют конвективным теплообменом. Примерами передачи тепла конвекцией могут служить нагревание жидкости в сосудах, отопление помещения теплом нагревательных приборов и т. п.

Излучение представляет один из случаев передачи лучистой энергии. Тепловая энергия, заключающаяся в теле, превращается в лучистую, и в таком виде передается через пространство, разделяющее тела. Только при встрече с новым телом она превращается на его поверхности вновь в тепловую энергию. Встречающиеся на пути лучистой энергии тела могут либо пропускать лучи через себя, либо отражать их, либо поглощать Случай поглощения соответствует превращению лучистой энергии в тепловую.

В тепловых установках передача тепла редко совершается только в одной какой-либо форме. Чаще всего наблюдаются од-

новременно различные формы теплопередачи, причем в зависимости от особенностей процесса или конструкции устройства та или другая форма может иметь преобладающее значение. Так, в сушильных установках передача тепла сушильным изделиям от продуктов сгорания происходит, в основном, путем конвекции и теплопроводности. В шахтных печах конвекция играет главную роль. В муфельных печах, где материал отделяется стенкой от непосредственного соприкосновения с продуктами сгорания, передача тепла происходит теплопроводностью и излучением.

Глава I

ПЕРЕДАЧА ТЕПЛА ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬЮ

Различают два основных случая передачи тепла теплопроводностью: теплопроводность при стационарном (установившемся) потоке тепла и при нестационарном.

Если температура любой точки тела остается постоянной в течение всего времени передачи тепла, то такой поток называется стационарным; если же температура всех или некоторых точек тела с течением времени меняется, то такой поток называется нестационарным. Примером стационарного потока может служить передача тепла от внутренней стенки трубы к наружной, по которой непрерывно протекает горячий пар или жидкость. Такой же поток наблюдается в стенах печей при установившейся постоянной температуре в самой печи.

Примером нестационарного потока может служить передача тепла в стене печи при растопке или в стене остывающей печи.

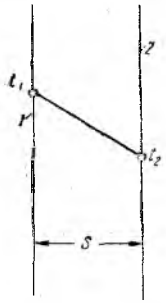


Рис. 23. Передача тепла через плоскую стенку.

1. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ПРИ СТАЦИОНАРНОМ ПОТОКЕ ТЕПЛА

Передача тепла через плоскую однородную стену. На рис. 23 изображена плоская стена с температурой поверхностей t_1 и t_2. Так как $t_1 > t_2$, то тепло будет передаваться от поверхности *1* к поверхности *2*.

Количество тепла, проходящего через стену за промежуток времени z, согласно закону Фурье, будет равно:

$$\boxed{Q = \lambda \frac{t_1 - t_2}{S} F \cdot z,} \qquad (34)$$

где: λ — коэффициент теплопроводности, характеризующий теплопроводность материала, из которого сложена стена, передающая тепло;

F — поверхность стены в $м^2$;

S — толщина стены в $м$.

Уравнение (34) показывает, что количество тепла, передаваемого теплопроводностью от одной поверхности к другой, прямо пропорционально разности температур поверхностей, площади их, времени перехода и обратно пропорционально расстоянию между поверхностями.

Если принять все величины, входящие в уравнение (34), равными единице, то получим значение коэффициента теплопроводности:

$$\boxed{\lambda=\frac{Q\,s}{(t_1-t_2)\,F\cdot z}\ ккал\cdot м/м^2\ час\cdot град=ккал/м\ час\ град.} \quad (35)$$

Таким образом, коэффициент теплопроводности есть количество тепла, передаваемого в 1 час через стену толщиной 1 *м* и площадью 1 $м^2$, если разность температур обеих поверхностей равняется 1°.

Уравнение (34) часто представляют в несколько преобразованном виде. Разделив уравнение (34) на Fz, получим количество тепла, проходящее через 1 $м^2$ поверхности стены в течение 1 часа. Эта величина называется тепловым потоком и обозначается через:

$$\boxed{q=\frac{Q}{F\cdot z}=\lambda\,\frac{t_1-t_2}{s}=\frac{t_1-t_2}{\frac{s}{\lambda}}.} \quad (36)$$

Выражение s/λ называется термическим сопротивлением.

Тепловой поток численно равен разности температур поверхностей стены, деленной на термическое сопротивление этой стены.

Значения коэффициента теплопроводности определяются опытным путем и зависят от свойств вещества тела. Все твердые тела в зависимости от величины коэффициента теплопроводности разделяются на несколько групп.

Если коэффициент теплопроводности меньше 0,25 *ккал/м час град*, то такие материалы являются плохими проводниками тепла и называются теплоизоляционными материалами.

Для большинства строительных материалов минерального происхождения значения λ заключаются в пределах 0,3—0,8 *ккал/м час град*.

Все металлы являются прекрасными проводниками тепла и обладают высоким значением коэффициента теплопроводности.

Наибольшее значение коэффициента теплопроводности имеет медь — около 340. Значения коэффициентов теплопроводности для различных тел приводятся в приложении III.

На величину коэффициента теплопроводности оказывают влияние температура материала, его объемный вес и влажность. Связь между величиной коэффициента теплопроводности и температурой для большинства материалов выражается уравнением:

$$\boxed{\lambda = a + bt,} \tag{37}$$

где: a и b — постоянные величины;
t — температура.

Необходимо различать истинную теплопроводность при данной температуре и среднюю теплопроводность в определенном промежутке температур. При расчете передачи тепла через стену в уравнение (37) следует подставить среднее значение:

$$\boxed{\lambda = a + bt_{cp} = a + b\,\frac{t_1+t_2}{2} = a + \frac{b}{2}(t_1+t_2).} \tag{38}$$

Пример. Определить количество тепла, проходящее в 1 час через стену, если $t_1=1000°$, $t_2=220°$, $s=230$ *мм*, $F=10$ *м*^{2}, $\lambda_{шам}=0{,}6+0{,}0005t$.

$$Q = \frac{\lambda}{s}(t_1-t_2)F = \frac{0{,}6+0{,}000275\cdot 1220}{0{,}23}\cdot 780\cdot 10 = 31\,725 \text{ ккал/час}.$$

С повышением влажности теплопроводность растет весьма резко. Так, для сухого песка $\lambda=0{,}28$, а для песка с влажностью 11% $\lambda=0{,}98$, хотя для воды $\lambda=0{,}50$.

Изменяется теплопроводность и с изменением объемного веса тела. В качестве приближенного соотношения можно принять следующее выражение для изменения теплопроводности сухих строительных материалов при температуре 50—100° в зависимости от объемного веса:

$$\lambda = 0{,}2\gamma + 0{,}05\gamma^2,$$

где γ — объемный вес материала в *т/м*^{3}.

Пример. Для кирпича с объемным весом $\gamma=1400$ *кг/м*^{3} $=14$ *т/м*^{3} $\lambda = 0{,}2\cdot 1{,}4 + 0{,}05\cdot 1{,}4^2 = 0{,}33$ *ккал/м час град*.

Передача тепла через сложную плоскую стену. Если стена состоит не из одного слоя, а из нескольких (рис. 24), то количество протекающего через нее тепла можно определить, если известны коэффициенты теплопроводности отдельных слоев, их толщина и температура крайних поверхностей.

Предположим, что рассматриваемая стена не теряет тепла в

направлении, перпендикулярном потоку, и температуры не изменяются во времени (стационарный поток).

Согласно уравнению (36), получаем:

для первого слоя:

$$q_1 = \frac{\lambda_1(t_1 - t_2)}{s_1}, \qquad (39)$$

для второго слоя:

$$q_2 = \frac{\lambda_2(t_2 - t_3)}{s_2}, \qquad (40)$$

для третьего слоя:

$$q_3 = \frac{\lambda_3(t_3 - t_4)}{s_3} \quad \text{и т. д.} \qquad (41)$$

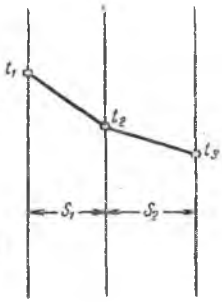


Рис. 24. Передача тепла через сложную плоскую стену.

Так как передача тепла происходит при установившемся потоке, то количество тепла, проходящего через различные слои, должно быть одинаковым. В противном случае температура слоя, где проходило бы большее количество тепла, неизбежно повысилась бы, и стационарность потока была бы нарушена. Поэтому можно приравнять все приведенные уравнения. Преобразовав их, получим из каждого выражения для разности температур:

$$t_1 - t_2 = \frac{q\, s_1}{\lambda_1}, \qquad (42)$$

$$t_2 - t_3 = \frac{q\, s_2}{\lambda_2}, \qquad (43)$$

$$t_3 - t_4 = \frac{q\, s_3}{\lambda_3}. \qquad (44)$$

Сложив почленно эти уравнения, получим:

$$t_1 - t_4 = q\left(\frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2} + \frac{s_3}{\lambda_3}\right), \qquad (45)$$

откуда:

$$q = \frac{t_1 - t_4}{\frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2} + \frac{s_3}{\lambda_3}}. \qquad (46)$$

Для стены из n слоев получим аналогично:

$$q=\frac{t+t_{n+1}}{\frac{s_1}{\lambda_1}+\frac{s_2}{\lambda_2}+\ldots+\frac{s_n}{\lambda_n}}, \tag{47}$$

где: q — тепловой поток в *ккал/м² час*;

t_1 — температура наружной поверхности первого слоя;

t_{n+1} — температура наружной поверхности n-го слоя;

$s_1, s_2, \ldots, s_n$ — толщина отдельных слоев;

$\lambda_1, \lambda_2, \ldots, \lambda_n$ — коэффициенты теплопроводности отдельных слоев.

Из уравнения (47) видно, что термическое сопротивление сложной стены равняется сумме термических сопротивлений отдельных слоев.

Из выражений для разности температур определяем температуры на границах отдельных слоев при условии совершенно плотного примыкания слоев друг к другу:

между первым и вторым слоями:

$$t_2=t_1-\frac{qs_1}{\lambda_1}, \tag{48}$$

между вторым и третьим слоями:

$$t_3=t_2-\frac{qs_2}{\lambda_2} \tag{49}$$

или, подставляя значение t_2 из предыдущего уравнения (48):

$$t_3=t_1-q\left(\frac{s_1}{\lambda_1}+\frac{s_2}{\lambda_2}\right). \tag{50}$$

Точно так же и для любого слоя:

$$t_{n+1}=t_1-q\left(\frac{s_1}{\lambda_1}+\frac{s_2}{\lambda_2}+\ldots+\frac{s_n}{\lambda_n}\right). \tag{51}$$

Температура на поверхности любого слоя сложной плоской стены равняется температуре наружной поверхности стены минус произведение теплового потока на сумму сопротивлений слоев, предшествующих определяемой поверхности.

Пример. Определить количество тепла, проходящего в 1 час через 1 *м²* стены, состоящей из шамотного кирпича тол-

щиной 34 *см* и глиняного кирпича толщиной 24 *см*, если температура наружных поверхностей стены равна 1350° и 250° (рис. 25).

Коэффициенты теплопроводности при указанных температурах:

$$\lambda_{шк} = 1{,}1 \ ккал/м \cdot час\ град \ и \ \lambda_{гл.п.} = 0{,}75 \ ккал/м \cdot час\ град.$$

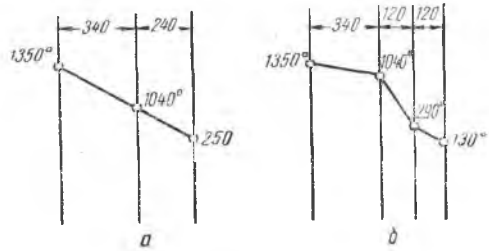


Рис. 25. Распределение температур в сложной стене: *а*—стена без тепловой изоляции; *б*—стена с теплоизоляционным слоем.

Согласно уравнению (47):

$$q = \frac{t_1 - t_2}{\frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2}} = \frac{1350-250}{\frac{0{,}34}{1{,}1} + \frac{0{,}24}{0{,}75}} = 1750 \ ккал/м^2\ час.$$

Пример. При замене глиняного кирпича в стене, приведенной в предыдущем примере, на теплоизоляционный и глиняный, как указано на рис. 25,*б*, общее количество тепла, протекавшее через такую стену, снизилось до 1000 *ккал/м² час*. Найти распределение температур в такой стене, если температура внутренней поверхности осталась без изменения: 1350°. Коэффициент теплопроводности теплоизоляционного кирпича — 0,16 *ккал/м час град*.

Пользуясь уравнениями (42) — (44), находим:

$$t_2 = t_1 - \frac{qs_1}{\lambda_1} = 1350° - \frac{1000 \cdot 0{,}34}{1{,}1} = 1040°;$$

$$t_3 = t_2 - \frac{qs_2}{\lambda_2} = 1040° - \frac{1000 \cdot 0{,}12}{0{,}16} = 290°;$$

$$t_4 = t_3 - \frac{qs_3}{\lambda_3} = 290° - \frac{1000 \cdot 0{,}12}{0{,}75} = 130°.$$

Передача тепла через криволинейную стену. Если сечение, через которое проходит тепловой поток, изменяется, то уравнение (34) нельзя применять. Примером могут служить трубопроводы, в которых поток тепла, направленный по радиусу, встречает непрерывно изменяющиеся сечения.

На рис. 26 схематически изображено поперечное сечение трубы, через которую протекает тепло. Внутренний радиус трубы равен r_1, наружный—r_2; коэффициент теплопроводности материала равен λ; температура наружной поверхности t_2, внутренней—t_1.

В зависимости от того, какая из указанных температур окажется бо́льшей, поток тепла будет проходить от внутренней стенки к наружной или наоборот. Обычно поток тепла направляется от внутренней стены к наружной. Для уменьшения потерь тепла в окружающую среду применяется тепловая изоляция (рис. 27).

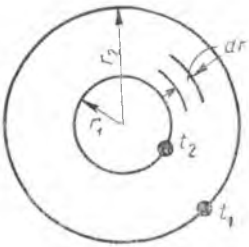


Рис. 26. Схема передачи тепла через криволинейную стену.

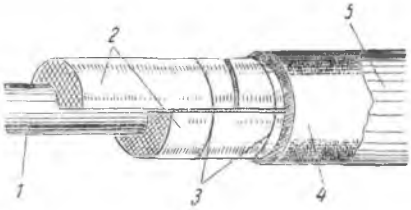


Рис. 27. Тепловая изоляция трубопровода: *1*—трубопровод; *2*—теплоизоляционные скорлупы; *3*—проволока; *4*—штукатурка; *5*—окраска.

Величина теплового потока на поверхности, соответствующей длине трубы в 1 *м*, определяется по формуле:

$$q=\frac{2{,}73\,\lambda\,(t_1-t_2)}{\lg\frac{r_2}{r_1}}=\frac{t_1-t_2}{\frac{1}{273\lambda}\lg\frac{r_2}{r_1}}\ \textit{ккал/м час.} \qquad (52)$$

Для многослойной трубы выражение теплового потока определяется по формуле:

$$q=\frac{2{,}73(t_1-t_{n+1})}{\frac{1}{\lambda_1}\lg\frac{r_2}{r_1}+\frac{1}{\lambda_2}\lg\frac{r_3}{r_2}+\ldots+\frac{1}{\lambda_{n-1}}\lg\frac{r_n}{r_{n-1}}}. \qquad (53)$$

Пример. Горячий воздух от печи передается в сушилку по металлическому трубопроводу, внутри выложенному кирпичом, а снаружи покрытому слоем тепловой изоляции. Внутрен-

ний диаметр трубопровода $D=0{,}5$ *м*, толщина кирпичной футеровки $s_к=0{,}13$ *м*, толщина металлической стенки $s_м=0{,}01$ *м*, толщина наружной изоляции $s_и=0{,}20$ *м*.

Коэффициенты теплопроводности: кирпича $\lambda_к=1{,}0$ *ккал/м час град*, стали $\lambda_{ст}=50$ *ккал/м час град*, тепловой изоляции $\lambda_и=0{,}2$ *ккал/м час град*.

Определить, сколько тепла передается через 1 *м* трубы в 1 час, если температура внутренней поверхности трубопровода 800°, а наружной—30°.

По уравнению (53) имеем:

$$q=\frac{2{,}73\cdot 1(800-30)}{\frac{1}{1{,}0}\lg\frac{0{,}76}{0{,}5}+\frac{1}{50}\lg\frac{0{,}78}{0{,}76}+\frac{1}{0{,}2}\lg\frac{1{,}18}{0{,}78}}=\frac{2100}{0{,}18+0{,}0002+0{,}9}=$$

$$=\frac{2100}{1{,}08}=1950\ \textit{ккал/м час.}$$

Величина знаменателя в выражении показывает, что тепловое сопротивление металлического кожуха очень мало (0,0002) сравнительно с другими сопротивлениями. Это относится ко всем стальным трубопроводам с изоляцией. Вследствие хорошей теплопроводности стали и малой толщины стен сопротивлением теплопроводности стены трубопроводов можно пренебречь.

2. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ ПОТОКЕ ТЕПЛА

Передача тепла в стене при неустановившемся состоянии потока является более сложным процессом, и уравнения, выведенные выше для стационарного потока, в этом случае неприменимы.

Температуропроводность. При нестационарном потоке тепла главное влияние на процесс передачи тепла оказывает не теплопроводность материала, а его температуропроводность, характеризующая скорость распространения в нем температуры.

Распространение тепла в материале от слоя к слою сопровождается повышением температур слоев этого материала. Так как повышение температуры зависит от удельной теплоемкости материала, то и температуропроводность связана с его удельной теплоемкостью. Чем меньше тепла требуется для изменения температуры слоя на 1°, т. е. чем меньше его удельная теплоемкость, тем больше скорость распространения температур в материале. Таким образом, температуропроводность материала обратно пропорциональна его удельной теплоемкости. Вместе с тем, общее количество тепла, поступающее в слой и вызывающее повышение температуры, зависит, согласно уравнению (35), при данной разности температур от коэффициента теплопроводности. Таким образом, температуропроводность связана

прямой пропорциональностью и с теплопроводностью. Общее выражение для температуропроводности имеет следующий вид:

$$a=\frac{\lambda}{c_{об}}.$$

Так как $c_{об}$ — удельная теплоемкость единицы объема — равна удельной теплоемкости единицы веса, умноженной на удельный вес материала:

$$c_{об}=c\gamma \text{ ккал/м}^3 \text{ град},$$

то выражение для температуропроводности после подстановки принимает следующий вид:

$$\boxed{a=\frac{\lambda}{c\gamma} \text{ м}^2\text{/час}} \qquad (54)$$

Пример. Определить температуропроводность стали, если $\lambda=50$ *ккал/м час град*; $c=0{,}13$ *ккал/кг град* и $\gamma=7000$ *кг/м*^{3}.

Решение:

$$a=\frac{\lambda}{c\gamma}=\frac{50}{0{,}13\cdot 7000}=0{,}055 \text{ м}^2\text{/час}.$$

Закон теплопроводности для неустановившегося состояния. Закон передачи тепла теплопроводностью при нестационарном состоянии выражается дифференциальным уравнением второго порядка, устанавливающим связь между координатами, временем и физическими величинами, участвующими в процессе (температура, количество тепла). Решение его в общем виде очень сложно и обычно ограничиваются рассмотрением его для некоторых частных случаев при определенных ограничивающих условиях; например, если изменение температуры происходит только вдоль одной геометрической координаты (нагрев или охлаждение бесконечно большой плоской стенки).

Закон передачи тепла в этом случае выражается следующим уравнением:

$$\boxed{\frac{dt}{dz}=a\,\frac{d^2t}{dx^2},} \qquad (55)$$

где: t — температура рассматриваемой плоской стенки;
z — время в час.;
x — координата (длина в направлении распространения тепла);
a — температуропроводность в *м*^{2}*/час*.

Это уравнение используется для расчета явлений нагрева и охлаждения тел, распределения температуры в них, скорости распространения тепла и т. п. Для тел правильной формы (пло-

ская пластина, цилиндр, шар), обладающих постоянными физическими свойствами (теплопроводность, теплоемкость), имеется точное решение этого уравнения[1].

Глава II

ПЕРЕДАЧА ТЕПЛА КОНВЕКЦИЕЙ

Сущность передачи тепла конвекцией заключается в том, что отдельные частицы жидкости или газа переносят тепло при своем движении. Таким образом, этот вид передачи тепла всегда связан с движением жидкости или газа, для которых он и является характерным.

Различают передачу тепла свободной конвекцией при естественном движении жидкости или газа, т. е. когда движение отдельных частиц жидкости или газа происходит только за счет изменения их удельного веса, и вынужденной конвекцией, когда движение частиц ускоряется, например, с помощью мешалок для жидкостей, вентиляторов для передачи газов.

1. ЗАКОН ПЕРЕДАЧИ ТЕПЛА КОНВЕКЦИЕЙ

Общий закон, определяющий количество тепла, передаваемого конвекцией, выражается уравнением:

$$\boxed{Q=\alpha(t_г-t_{ст})F\cdot z,} \qquad (56)$$

где: Q — количество передаваемого тепла;
α — коэффициент теплоотдачи конвекцией;
$t_г$ — температура газа или жидкости;
$t_{ст}$ — температура стенки, которая омывается жидкостью или газом;
F — поверхность, омываемая газом или жидкостью;
z — время.

Это уравнение показывает, что теплопередача пропорциональна величине поверхности, разнице температур между телом, поглощающим тепло, и телом, отдающим тепло, и времени, в течение которого происходит передача тепла.

---

[1] Методы расчета теплопроводности при нестационарном тепловом состоянии приводятся, ввиду их сложности, в специальных курсах теплопередачи, например, в учебнике М. А. Михеева. Основы теплопередачи. Госэнергоиздат, 1949.

2. ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ НА КОЭФФИЦИЕНТ ТЕПЛООТДАЧИ

Основной величиной, от которой зависит изменение коэффициента теплоотдачи α, является скорость движения жидкости или газа.

Выше в разделе «Движение газов» было указано, что различают два вида движения: ламинарное и турбулентное. Переход одного вида движения в другой определяется величиной критической скорости.

В большинстве случаев при передаче тепла между твердым телом и потоком жидкости или газов имеет место турбулентное движение. Благодаря турбулентности температура в потоке жидкости быстро уравнивается, получает приблизительно одно и то же значение. Главное сопротивление для перехода тепла от жидкости к твердому телу представляет пограничный слой, где существует ламинарное движение. При ламинарном движении через пограничный слой тепло в направлении нормали к стенке передается теплопроводностью, которая, как известно, для жидкости и газа чрезвычайно мала.

На рис. 28 показаны часть потока в непосредственной близости от стенки и распределение температур и скоростей при пере-

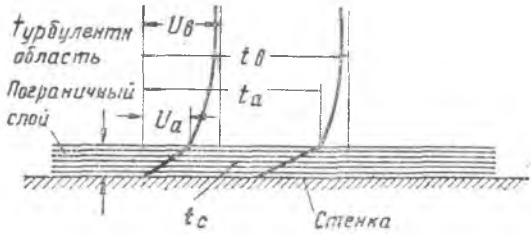


Рис. 28. Изменение скоростей и температур при передаче тепла конвекцией.

даче тепла путем конвекции от газа к стенке. В пограничном слое скорости возрастают от нуля у стенки до v_a приблизительно по прямой, а в турбулентном потоке скорость резко возрастает до значения $v_в$. Точно также изменяется и температура: у стенки она равна t_c, в ламинарном потоке медленно растет по прямой до t_a, а затем в турбулентном — быстро растет до $t_в$.

Внутри пограничного слоя передача тепла в направлении нормали к стенке происходит главным образом теплопроводностью вследствие движения частиц параллельно стенке, и для передачи тепла от жидкости к стенке она не имеет почти никакого зна-

Академик Михаил Викторович
КИРПИЧЕВ

чения. При турбулентном же движении в остальной части трубы передача в направлении, нормальном к стене, значительно усиливается вследствие вихревого движения жидкости, и тепло может передаваться путем интенсивного перемешивания частиц жидкости. Чем меньше толщина пограничного слоя, тем скорее происходит передача тепла от жидкости к стене. Вместе с тем, чем больше турбулентность движения, тем скорее уменьшается толщина пограничного слоя. Отсюда видно, что при турбулентном движении по сравнению с ламинарным передача тепла конвекцией возрастает.

Выше было сказано, что переход движения из ламинарного в турбулентное определяется критической скоростью. Очевидно, что α зависит от числа Рейнольдса Re. Отсюда следует, что на величину α, помимо скорости движения потока, влияют также диаметр канала, вязкость газа и его плотность.

Работами ряда исследователей установлено, что величина α зависит также и от температуры жидкости или газа и стены, а также от состояния ее поверхности (гладкая или шероховатая). Следовательно, коэффициент теплоотдачи зависит от ряда факторов, которые следует уточнять в каждом отдельном случае при выборе значений α.

Определение величины α —очень трудная задача, так как приходится выявлять влияние каждого из многочисленных факторов. При этом передача тепла часто происходит в очень сложных аппаратах и условиях, что сильно затрудняет проведение опытов. Следует также учесть, что не всегда данные, полученные для одного случая или аппарата, могут быть полностью применены для другого. Все это очень усложняет изучение вопросов теплообмена.

В настоящее время большие успехи достигнуты в изучении явлений теплообмена. Этому способствует широкое применение теории теплового моделирования, разработанной академиком М. В. Кирпичевым и его школой.

Изучение явления производится на модели, подобной основному исследуемому аппарату. Результаты опытов, обработанные согласно теории подобия, можно непосредственно перенести на натуральные объекты, служившие образцами для моделирования.

В трудах академика Кирпичева определены условия, необходимые для получения моделей, подобных образцу. Для сравнения двух явлений пользуются критериями—так называются безразмерные комплексы величин, выражающие связь, существующую между физическими явлениями в модели и образце.

Критерии сохраняют одно и то же постоянное значение при переходе от одного подобного явления к другому. Физические явления подобны, если кроме геометрического подобия у них подобны и физические величины, характеризующие явления.

Например, если движения двух жидкостей подобны, то это означает, что они протекают в геометрически подобных каналах, и ограничивающие стенки геометрически подобны. Кроме того, подобны скорости во всех точках системы, а также плотность и вязкость жидкостей.

Примером критерия является число Рейнольдса Re, которое устанавливает условия перехода ламинарного движения в турбулентное. Этот критерий, выражающий отношение сил инерции к силам вязкости, позволяет вычислить для любых каналов и газов критическую скорость, при которой происходит переход одного вида движения в другой.

Аналогичные критерии выведены и для тепловых явлений. Критериям присвоены названия по имени ученых, известных своими работами в области гидродинамики и теплопередачи. Например, критерий Пекле

$$\mathrm{Pe}=\frac{v\,d}{a},$$

где: v — скорость жидкости;
d — диаметр канала;
a — коэффициент температуропроводности.

Критерий Pe определяет условия теплового подобия двух явлений. Если величины, входящие в состав критерия, одинаковы в образце и в модели, то изменения температур в обоих случаях будут происходить одинаково.

Пользуясь теорией моделирования, можно вместо сложного аппарата-образца построить модель, в которой удобно исследовать различные факторы. Изменяя отдельные условия при сохранении общего соотношения, можно в результате ряда опытов получить общее решение вопроса. Это позволяет проверить целесообразность конструкций действующих установок и определить наиболее выгодные условия, которым должны удовлетворять вновь проектируемые тепловые аппараты.

Кроме того, постановка опытов на модели проще и обходится значительно дешевле, чем исследования на действующих аппаратах.

В настоящее время теория моделирования широко применяется при решении различных вопросов теплотехники, для определения коэффициентов при изучении теплопередачи, конструировании новых установок и т. д. и имеет большое значение для народного хозяйства.

Тепловое моделирование было использовано при разработке сушилки системы «Росстромпроекта» для определения условий, обеспечивающих равномерность выхода газов по всей камере. Аналогичные работы были проведены для установления наиболее благоприятной формы и соотношения отдельных элементов вращающихся печей.

3. ФОРМУЛЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ α

Значение α, как всякого коэффициента пропорциональности, получается из уравнения (56), если принять все остальные величины равными единице. При этом получаем:

$$\alpha = \frac{Q}{(t_г - t_{ст})\, F \cdot z} = ккал/м^2\ час\ град, \qquad (57)$$

где α — коэффициент теплоотдачи—количество тепла, передаваемое 1 $м^2$ поверхности в течение 1 часа при разности температур жидкости или газа и твердого тела 1°.

Имеется ряд формул, выведенных на основании экспериментальных работ для определения значения α в зависимости от различных факторов. Приводим наиболее важные формулы.

1. В случае турбулентного движения газов по трубе или каналу применяется формула:

$$\alpha = \frac{3v^{0,8}}{\sqrt[4]{d}}\ ккал/м^2\ час\ град, \qquad (58)$$

где: v—скорость, приведенная к 0°, *в м/сек*;
d—диаметр трубы в *м*.

Если канал не круглого, а прямоугольного сечения, то вместо d вводят приведенный диаметр, т. е.:

$$d_{пр} = \frac{4F}{P},$$

где: F—сечение канала;
P—периметр канала.

2. Для вынужденного движения воздуха в направлении, параллельном поверхности нагрева, применяются обычно формулы, в которых учитывается как скорость движения воздуха, так и характеристика поверхности, омываемой воздухом (табл. 16).

Таблица 16

Значения α для вынужденного движения параллельно поверхности нагрева

Характеристика поверхности	Значение α при скорости	
	<5 *м/сек*	>5 *м/сек*
Гладкая	$4,8+3,4\,v$	$6,12\,v^{0,78}$
Прокатанная	$5,0+3,4\,v$	$6,14\,v^{0,78}$
Шероховатая	$5,3+3,6\,v$	$6,47\,v^{0,78}$

Значение скорости v в этих формулах берется при температуре воздуха, равной $+20°$. Если же температура воздуха отличается от $+20°$, то скорость должна быть перерассчитана по следующей формуле:

$$v_t = v_{20} \frac{273+20}{273+t}, \tag{59}$$

где t—температура, при которой определяется v_t.

3. Для случая свободного движения воздуха имеются формулы, определяющие теплопередачу конвекцией вне зависимости от скорости движения. Обычно применяют следующие формулы:

для вертикальной стены

$$\alpha = 2{,}2\sqrt[4]{\Delta t}, \tag{60}$$

для горизонтальной стены:

$$\alpha = 2{,}8\sqrt[4]{\Delta t}, \tag{61}$$

где Δt—разность температур воздуха и плоской стены.

Если давление окружающего воздуха значительно отличается от нормального барометрического (760 *мм* рт. ст.), а температура воздуха значительно выше $+20°$, то коэффициент конвекции, полученный по формулам (60) и (61), надо умножить на выражение:

$$\sqrt{\frac{B}{2{,}6T}},$$

где: B—барометрическое давление;
T—абсолютная температура воздуха.

Значения α могут изменяться в широких пределах, в зависимости от условий.

Приводим некоторые значения α:

для газов	от	5 до	200	*ккал/м² час*	*град*
для жидкостей	от	200 до	6000	»	»
для конденсирующегося пара	от	6000 до	15000	»	»
для кипящей воды . . .	от	2000 до	10000	»	»

Глава III

ПЕРЕДАЧА ТЕПЛА ИЗЛУЧЕНИЕМ

1. ИЗЛУЧЕНИЕ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Лучистая энергия, падающая на твердое тело, поглощается, отражается, а частью проходит сквозь тело. Если обозначить через: Q_0—общее количество лучистой энергии, воспринимаемое телом, Q_A—часть энергии, которая поглощается, Q_R—часть энергии, которая отражается, а через Q_D—часть энергии, проходящую через тело, то можно записать равенство:

$$Q_0 = Q_A + Q_R + Q_D .$$

Деля обе части на Q_0, получим:

$$\frac{Q_A}{Q_0} + \frac{Q_R}{Q_0} + \frac{Q_D}{Q_0} = 1,$$

или обозначив:

$\frac{Q_A}{Q_0} = A$—коэффициент поглощения тела;

$\frac{Q_R}{Q_0} = R$—коэффициент отражения тела;

$\frac{Q_D}{Q_0} = D$ —коэффициент проницаемости,

получим следующее равенство:

$$\boxed{A + R + D = 1.} \qquad (62)$$

Для всех природных тел коэффициенты A, R и D всегда меньше единицы. Тела, у которых $A=1$, а $R=0$ и $D=0$, называются абсолютно черными. Они целиком поглощают падающую на них лучистую энергию.

Если $R=1$, а $A=0$ и $D=0$, то вся падающая лучистая энергия полностью отражается. Такие тела называются абсолютно белыми, или зеркальными.

Если $D=1$, а $A=0$ и $R=0$, то вся падающая энергия полностью проходит сквозь тело. Такие тела называют абсолютно прозрачными, или проницаемыми.

Значения A, R и D зависят от природы тела, его температуры и длины волны излучения. Для твердых тел существует равенство $A+R=1$.

Из этого соотношения следует, что если отражательная способность велика, то поглотительная—мала, и наоборот.

Абсолютно черных, как и абсолютно белых и прозрачных тел в природе нет, но близкими к абсолютно черным можно считать черный бархат и сажу. Представление об абсолютно черном теле может дать также полый шар, в котором проделано маленькое отверстие. На рис. 29 показано, что луч, попавший в полость такого шара, будет отражаться все время внутрь и не сможет выйти наружу, т. е. шар будет представлять собой тело, целиком поглощающее лучистую энергию.

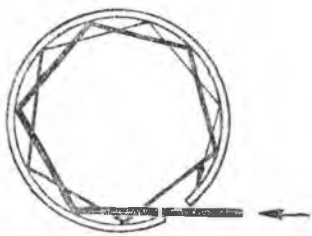


Рис. 29. Схема поглощения тепла абсолютно черным телом.

По закону Кирхгофа лучепоглощательная способность тел прямо пропорциональна лучеизлучательной способности. Таким образом, абсолютно черное тело обладает и наибольшей лучеизлучательной способностью, возможной при данной температуре.

Спектр абсолютно черного тела имеет непрерывный характер с различной интенсивностью излучения в отдельных частях. Энергия излучения видимых лучей в нем значительно меньше, чем в инфракрасной части спектра. Реальные тела, имеющие непрерывный спектр излучения, кривая которого подобна кривой абсолютно черного тела при той же температуре, называются серыми телами. Излучение серых тел никогда не превышает интенсивности излучения абсолютно черного тела при той же длине волны и той же температуре.

Изменение температуры влияет на интенсивность излучения волн различной длины. Так, при температуре до 1200° наибольшая часть тепла передается волнами большой длины, соответствующими невидимой части инфракрасного лучеиспускания, световые же лучи имеют второстепенное значение. Только при более высоких температурах роль световых лучей в передаче тепла начинает вырастать, и при температуре солнца (около 6000°) на долю световых лучей приходится около половины всей излучаемой энергии.

Все технические материалы, представляют собой серые тела, т. е. способность поглощения лучистой энергии в них значительно меньше, чем у абсолютно черных тел.

Количество энергии, передаваемое излучением абсолютно черного твердого тела, по закону Стефана-Больцмана, пропорционально 4-й степени его абсолютной температуры:

$$E_s = C_s T^4 \ ккал/м^2 \ час,$$

где коэффициент C_s —так называемая постоянная излучения абсолютно черного тела и равна $4{,}96 \cdot 10^{-8}$. Во избежание боль-

ших чисел при вычислениях, коэффициент 10^{-8} обычно относят к температуре, и вышеприведенный закон выражают следующим образом:

$$E = 4{,}96 \left[\frac{T}{100}\right]^4 \text{ ккал/м}^2 \text{ час}, \tag{63}$$

где 4,96—коэффициент излучения абсолютно черного тела.

Большинство твердых тел имеет меньший коэффициент излучения, чем коэффициент абсолютно черного тела. Для них уравнение (63) принимает вид:

$$E = C\left[\frac{T}{100}\right]^4 \text{ ккал/м}^2 \text{ час}. \tag{64}$$

Коэффициент излучения C данного тела зависит от природы тела, состояния его поверхности и температуры и определяется опытным путем. Коэффициент этот всегда меньше 4,96.

Для одного и того же тела гладкая полированная поверхность всегда имеет меньший коэффициент излучения, чем шероховатая.

Отношение энергии излучения серого тела к энергии излучения абсолютно черного тела при той же температуре называется степенью черноты тела:

$$\varepsilon = \frac{E}{E_s} = \frac{C\left(\frac{T}{100}\right)^4}{C_s\left(\frac{T}{100}\right)^4} = \frac{C}{C_s}. \tag{65}$$

Значение ε изменяется от 0 до 1. В приложении IV приведены значения степени черноты различных материалов. Зная ε, можно вычислить энергию излучения тела:

$$E = \varepsilon E_s = \varepsilon\, 4{,}96 \left(\frac{T}{100}\right)^4.$$

Различные случаи теплопередачи излучением между двумя твердыми телами. Излучение тепла телами происходит при любой температуре по приведенному выше общему закону. Если два тела с различной температурой излучают друг на друга тепло, то передача его будет происходить взаимно от одного к другому. Однако в конечном результате тело с более низкой температурой получит тепла больше, чем тело с более высокой температурой.

Общее выражение количества тепла, передаваемого в таком случае, имеет следующий вид:

$$Q = C\left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right], \tag{66}$$

где: Q —количество тепла, воспринимаемое 1 $м^2$ поверхности менее нагретого тела;

T_1 —температура более нагретого тела;

T_2 —температура менее нагретого тела;

C —коэффициент, зависящий от природы каждого из излучающих тел, а также от взаимного расположения их поверхностей.

Для определения C (так называемого приведенного коэффициента излучения) существует несколько формул.

1. Теплопередача излучением между двумя параллельными плоскими поверхностями:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_s}, \tag{67}$$

где: C_1 и C_2—коэффициенты излучения обоих тел;

C_s—коэффициент излучения абсолютно черного тела.

2. Теплопередача в случае, если одна поверхность окружает другую:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{F_1}{F_2}\left[\frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_s}\right], \tag{68}$$

где: F_1—поверхность тела, окруженного со всех сторон другим;

F_2—поверхность окружающего тела.

Если F_2 очень велико по сравнению с F_1, то C равняется C_1.

Формулу (68) часто применяют при расчете передачи тепла в печах.

Вместо приведенного коэффициента излучения в расчетах пользуются также приведенной степенью черноты, которая получается из условия:

$$\varepsilon = \frac{C}{C_s}.$$

Например, для разобранного выше случая получим:

$$\boxed{\varepsilon_n = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2}\left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)}}, \qquad (69)$$

3. Излучение через отверстие в кладке. Количество тепла в этом случае определяется по формуле:

$$Q = 4{,}96\,\varphi\left[\left(\frac{T_к}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_н}{100}\right)^4\right] F_{от}\ ккал/час,$$

где: φ —коэффициент диафрагмирования, зависящий от размеров отверстия и толщины кладки; определяется по графику (рис. 30);

$T_к$—температура в камере в °К;

$T_н$—температура наружная в °К;

$F_{от}$—площадь отверстия в $м^2$.

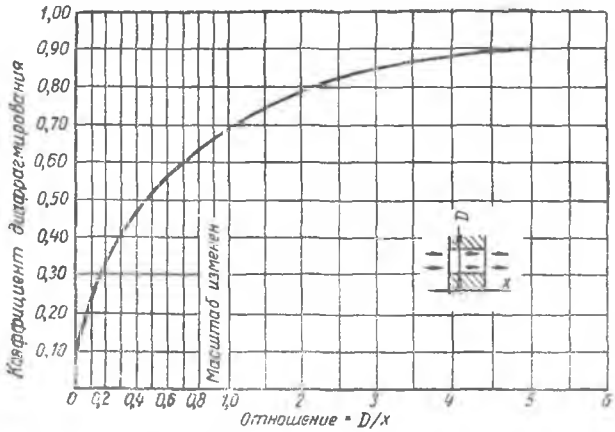


Рис 30. График изменения коэффициента диафрагмирования.

Для облегчения пользования уравнением (66) его часто несколько преобразовывают, чтобы придать ему вид обычного уравнения передачи тепла:

$$Q = m\,(t_1 - t_2).$$

Если обе части уравнения (66) разделить на разность температур $t_1 - t_2 = T_1 - T_2$, то получим:

$$\frac{Q}{t_1 - t_2} = C\,\frac{(0{,}01T_1)^4 - (0{,}01T_2)^4}{T_1 - T_2}.$$

Если обозначить:

$$C\,\frac{(0{,}01T_1)^4 - (0{,}01T_2)^4}{T_1 - T_2} = \alpha_л,$$

то получим окончательное уравнение:

$$\boxed{Q = \alpha_л (t_1 - t_2),} \qquad (70)$$

т. е. уравнение передачи тепла излучением принимает такой же вид, как при передаче конвекцией. Во многих случаях такой вид уравнения облегчает пользование им при расчетах, так как позволяет объединить коэффициенты передачи тепла конвекцией и излучением.

2. ИЗЛУЧЕНИЕ ГАЗОВ

Излучающая и поглощающая способность газов различна: для одно- и двухатомных газов она ничтожно мала, а трехатомные, например, H_2O и CO_2, обладают значительной излучающей способностью. Так как эти газы образуются при горении топлива, то это имеет особенное значение в тепловых установках.

В отличие от твердых тел, газы излучают и поглощают лучистую энергию лишь в определенных интервалах длин волн в различных частях спектра. Для остальных лучей газы прозрачны и их энергия излучения равна нулю.

Далее, в отличие от твердых тел, поглощающих и излучающих лучистую энергию поверхностным слоем, в газах излучение и поглощение происходит в объеме, т. е. зависит от толщины слоя газа, его формы и концентрации газа в этом объеме.

Зависимость излучения определенного объема газа от температуры не подчиняется закону Стефана-Больцмана для твердых тел и не может быть выражена простой зависимостью $C \cdot T^4$. В общем виде энергия излучения газов может быть выражена зависимостью:

$$\boxed{Q_F = f(T_F,\ pl) \text{ или } \varepsilon_г = f(T_F,\ pl),} \qquad (71)$$

где: Q_F —количество энергии излучения в час, отнесенное к 1 $м^2$ поверхности, в *ккал/м² час;*

$\varepsilon_г$ —относительная излучательная способность или степень черноты газа;

pl—произведение толщины слоя газа на парциальное давление его;

T_F —абсолютная температура газа в $°K$; $T_F = t° + 273$.

При вычислении теплоизлучения газов пользуются графиками. На рис. 31—32 приведены графики для определения ε углекислого газа и водяного пара. На оси абсцисс отложена температура в градусах. Наклонные кривые соответствуют $p\,l$, т. е. произведению частичного давления на толщину слоя газов. По оси

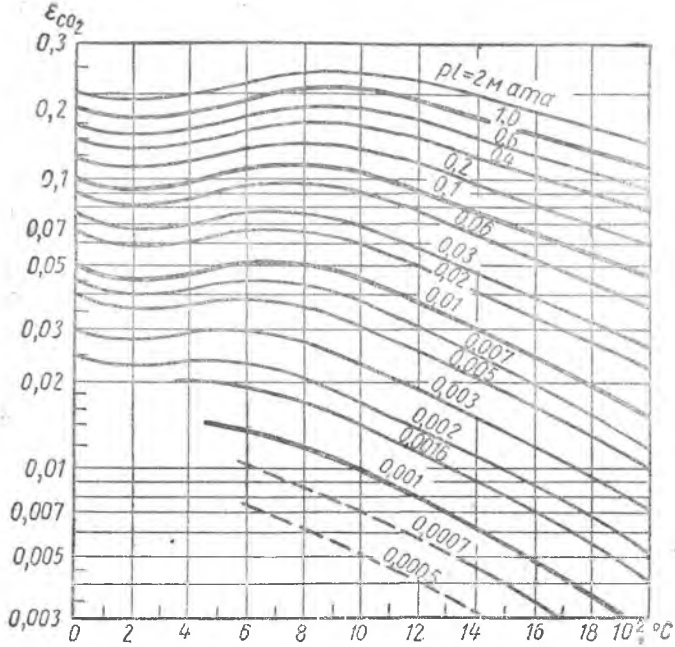


Рис. 31. График для определения степени черноты углекислого газа.

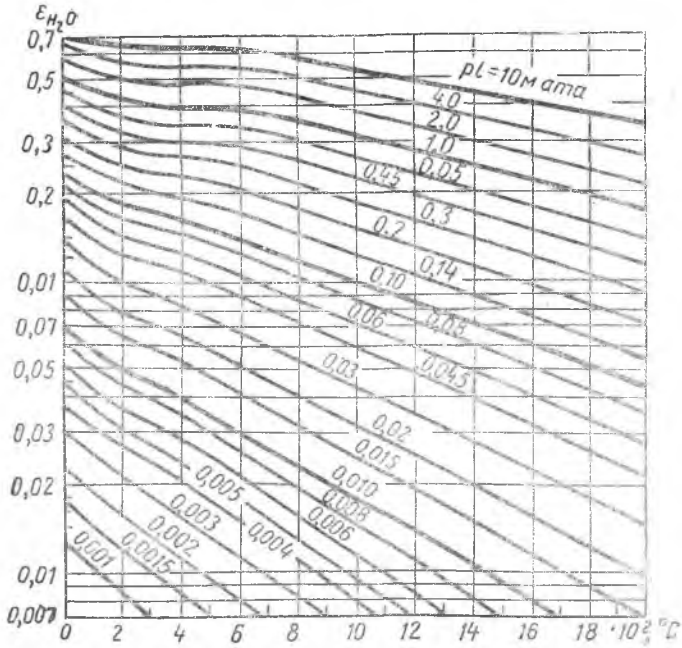


Рис. 32. График для определения степени черноты водяного пара.

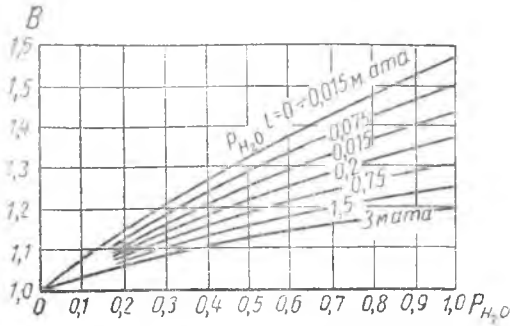


Рис. 32,*а*. Значения поправочного коэффициента к степени черноты водяного пара.

ординат отложены значения степени черноты ε. Найдя на оси абсцисс точку, равную температуре газа, следует провести перпендикуляр до пересечения его с кривой, соответствующей pl, и перенести эту точку на ось ординат, где нанесено значение ε.

Если газовая смесь содержит одновременно углекислоту и водяной пар, то степень черноты смеси равна их сумме:

$$\boxed{\varepsilon_г = \varepsilon_{CO_2} + \varepsilon_{H_2O}\,.} \qquad (72)$$

Ошибка при этом будет равна 2—4%.

Зная $\varepsilon_г$, можно определить излучение газа:

$$Q_г = \varepsilon_г\, C_s \left(\frac{T_г}{100}\right)^4 \text{ ккал/м}^2\text{ час.}$$

Для водяного пара влияние p больше влияния l, поэтому при вычислении значения ε по графику (рис. 32) вводится поправка β, определяемая по графику (рис. 32,*а*).

Пример. Определить теплоизлучение от продуктов сгорания при температуре газов 1400°, толщине слоя газов 1 *м* и составе газов CO_2=10%; H_2O=12% и N_2+O_2=75%.

Теплоизлучение газов находим как сумму излучения CO_2 и H_2O. Парциальное давление составляет: для H_2O $pl = 0{,}12 \cdot 1 = 0{,}12$ *м. атм*, для CO_2 $pl = 0{,}1 \cdot 1 = 0{,}1$ *м атм*.

По графикам (см. рис. 31—32) определяем: $\varepsilon_{CO_2} = 0{,}08$ и $\varepsilon_{H_2O} = 0{,}08 \cdot 1{,}08 = 0{,}086$,
где 1,08—поправка β (по графику рис. 32,*а*).

Подставляя полученные значения в уравнение, получим:

$$Q = (\varepsilon_{CO_2} + \varepsilon_{H_2O}) \cdot C_s \left(\frac{T_г}{100}\right)^4 = 0{,}165 \cdot 4{,}96 \left(\frac{1673}{100}\right)^4 = 0{,}82 \cdot 78\,340 = 64\,700 \text{ ккал/м}^2\text{ час.}$$

3. ПЕРЕДАЧА ТЕПЛА МЕЖДУ ГАЗАМИ И ТВЕРДЫМИ ТЕЛАМИ

Формула (71) выражает общее количество лучистой теплоты, содержащейся в газе, и справедлива при излучении газа в пустоту, которая может рассматриваться как абсолютно черное тело при 0°.

Если газ находится около поверхности твердого тела, то между ними возникает обмен тепла. Часть тепла, излучаемого

твердым телом, будет излучаться в газовый объем, отдавая ему некоторое количество тепла. Если бы поверхность тела представляла абсолютно черное тело, то все тепло поглотилось бы им. Вследствие отражения части лучей пропорционально коэффициенту поглощения данной поверхности, фактическое поглощение тепла всегда меньше. В результате, количество тепла, переданное излучением газа на 1 $м^2$ твердой поверхности за 1 час, будет равняться разности и определяется по формуле:

$$q_{г-ст} = \varepsilon' C_s \left[\varepsilon_{газ} \left(\frac{T_{газ}}{100}\right)^4 - A_{газ} \left(\frac{T_{ст}}{100}\right)^4 \right] \text{ ккал/м}^2 \text{ час}, \quad (73)$$

где: $q_{г-ст}$—количество тепла, передаваемое от газа стенке;

$\varepsilon^1 = \frac{\varepsilon_{ст}+1}{2}$—эффективная степень черноты стенки, учитывающая многократное поглощение;

$\varepsilon_{газ} = \varepsilon_{CO_2} + \varepsilon_{H_2O}$—степень черноты газа при температуре газа, определяемая по графикам (см. рис. 31—32);

$A_{газ} = A_{CO_2} + A_{H_2O}$—поглощательная способность газа при температуре стенки, где

$$A_{CO_2} = \varepsilon_{CO_2} \left(\frac{T_{газ}}{T_{ст}}\right)^{0,65}; \; A_{H_2O} = \beta \cdot \varepsilon_{H_2O}.$$

Если $T_{ст} > T_{газ}$, то значение $q_{г-ст}$ получится отрицательным, т. е. газ не отдает, а воспринимает тепло.

Формула (73) справедлива, если длина луча при теплообмене со стенкой одна и та же в любом направлении, т. е. для полусферы. При телах другой формы длина луча вычисляется из радиуса эквивалентной газовой полусферы по формуле $l = 4\frac{W}{F}$, где W—объем тела в $м^3$, а F—поверхность оболочки.

В практических расчетах длина луча несколько меньше вычисленного значения и составляет приблизительно 85% от предельного.

Можно пользоваться следующими значениями поправочного коэффициента φ при определении длины луча для газовых тел различной формы: для шара диаметром d $\varphi = 0,6d$; для куба со стороной a $\varphi = 0,6\ a$; для цилиндра бесконечной длины с диаметром d $\varphi = 0,9d$; для цилиндра, высота которого равняется диаметру, $\varphi = 0,6d$ при излучении на боковую поверхность.

Пример. Дымовые газы, содержащие 10% CO_2 и 12% H_2O при температуре 1400°, проходят через цилиндрический дымоход диаметром 1,5 *м* и длиной 1,5 *м*, нагретый до 1000°. Определить количество тепла, получаемое стенкой, если $\varepsilon_{ст} = 0,85$.

Находим:

$$\varepsilon' = \frac{0,85+1}{2} = 0,93.$$

Для цилиндра $\varphi = 0,6d = 0,6 \cdot 1 = 0,6$ *м*;

для CO_2 $pl = 0,1 \cdot 0,6 = 0,06$ *м·атм*;

для H_2O $pl = 0,12 \cdot 0,6 = 0,072$ *м·атм*.

Для этих условий по графикам (см. рис. 31 и 32) находим значения ε_{CO_2} и ε_{H_2O}.

Для ε_{H_2O} вводим поправку β по графику (см. рис. 32,*а*): $\beta = 1,08$.

При 1400° $\varepsilon_{CO_2} = 0,064$; $\varepsilon_{H_2O} = \beta \cdot 0,065 = 1,08 \cdot 0,065 = 0,07$;

при 1000° $\varepsilon_{CO_2} = 0,087$; $\varepsilon_{H_2O} = \beta \cdot 0,08 = 1,08 \cdot 0,08 = 0,086$.

$$\varepsilon_{газ} = \varepsilon_{CO_2} + \varepsilon_{H_2O} = 0,064 + 0,07 = 0,134.$$

Вычисляем

$$A_{газ} = A_{CO_2} + A_{H_2O};$$

$$A_{CO_2} = \varepsilon_{CO_2}\left[\frac{T_{газ}}{T_{ст}}\right]^{0,65} = 0,087\left(\frac{1673}{1273}\right)^{0,65} = 0,087 \cdot 1,19 = 0,103;$$

$$A_{H_2O} = \beta\,\varepsilon_{H_2O} = 0,086;$$

$$A_{газ} = 0,103 + 0,086 = 0,189.$$

Подставляя в формулу (73), находим:

$$q_{газ-ст} = 0,93 \cdot 4,96\left[0,134\left(\frac{1673}{100}\right)^4 - 0,189\left(\frac{1273}{100}\right)^4\right] =$$

$$= 0,93 \cdot 4,96\,(0,134 \cdot 78\,500 - 0,189 \cdot 26\,200) =$$

$$= 0,93 \cdot 4,96 \cdot 5550 = 25600 \text{ ккал/м}^2 \text{ час}.$$

Всего стенка получает в час тепла:

$$Q = q \cdot S = 25600\,\pi \cdot 1,5 \cdot 1,5 = 180000 \text{ ккал. час}.$$

4. СУММАРНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ ТЕПЛООТДАЧИ

В большинстве теплотехнических установок обмен тепла между поверхностью твердого тела и газом обычно происходит не только конвекцией, но и излучением. В соответствии с этим приходится при расчете количества тепла, передаваемого в этом случае, принимать во внимание общий коэффициент теплоотдачи, который представляет сумму коэффициентов конвекции и излучения по ранее выведенным формулам.

В случае передачи тепла от наружной стены к воздуху коэффициент теплоотдачи $\alpha = \alpha_к + \alpha_л$:

$$\alpha = 2{,}2\sqrt[4]{t_{ст} - t_{газ}} + \frac{4}{t_{ст} - t_{газ}}\left[\left(\frac{T_{ст}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{газ}}{100}\right)^4\right]. \quad (74)$$

У горизонтальных стен, отдающих тепло наружу, общий коэффициент теплоотдачи будет больше, так как в формуле коэффициента теплоотдачи вместо коэффициента 2,2 для коэффициента конвекции принимается значение 2,8.

5. ИЗЛУЧЕНИЕ ПЛАМЕНИ

При сгорании газа или беззольного топлива получается почти бесцветное пламя, излучение которого подсчитывается по вышеприведенным формулам. Если же в пламени имеются раскаленные частицы сажи, угля, золы, то оно получается светящимся и называется факелом. Излучение факела зависит от количества и размера содержащихся в нем частиц. Степень черноты факела определяют по излучательной способности углекислоты и водяного пара, содержащихся в продуктах горения (см. рис. 31 и 32).

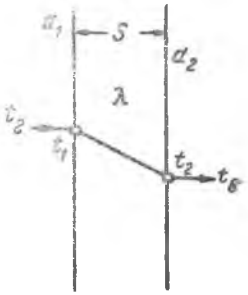


Рис. 33. Переход тепла из одной среды в другую через стенку

За условную температуру факела обычно принимают среднегеометрическое из теоретической температуры горения топлива (см. раздел второй, главу III) и температуры горения в конце топки:

$$T_ф = \sqrt{T_г \cdot T_2^n}.$$

По температуре факела и степени черноты можно определить его излучение на окружающую стенку с поверхностью F, если известна ее температура и степень черноты:

$$Q_ф = \varepsilon_{ст} \cdot \varepsilon_ф \cdot F\left[\left(\frac{T_ф}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{ст}}{100}\right)^4\right].$$

Излучение светящегося пламени больше излучения бесцветного пламени. Поэтому в некоторых случаях при сжигании генераторного газа в него добавляют 2—3% смолы мазута, что резко повышает светимость пламени.

6. ПЕРЕДАЧА ТЕПЛА ОТ ОДНОЙ СРЕДЫ К ДРУГОЙ ЧЕРЕЗ СТЕНКУ

Во многих случаях передача тепла в тепловых устройствах происходит от одной среды к другой, например, от газа к газу, через промежуточную стенку. На рис. 33 изображена в разрезе

стенка; по одну сторону ее находится газ, от которого тепло передается через стенку воздуху. Переход тепла происходит, как показано, по направлению стрелки.

Введем следующие обозначения: $t_{газ}$—температура газа; t_1—температура поверхности стены, омываемой газом; t_2—температура наружной стенки; $t_в$—температура воздуха.

Согласно заданному условию:

$$t_{газ} > t_1 > t_2 > t_в.$$

Передача тепла в единицу времени от газа к стенке происходит по уравнению (56) теплоотдачи:

$$\boxed{Q = \alpha_1 F (t_{газ} - t_1),} \qquad (75)$$

где: Q—количество тепла, передаваемое от газа к стенке за 1 час;

α— суммарный коэффициент теплоотдачи конвекцией и излучением;

F—площадь, через которую происходит передача тепла;

$t_{газ}$ и t_1—температура газа и стенки.

При условии, что потерь нет, это количество тепла, воспринимаемое поверхностью стенки, омываемой газом, передается через стенку теплопроводностью. Количество тепла, передаваемое в этом случае, определяется по уравнению (34):

$$\boxed{Q = \frac{\lambda}{S} F (t_1 - t_2),} \qquad (76)$$

где: λ—коэффициент теплопроводности;

S—толщина стенки в направлении, совпадающем с направлением перехода тепла.

Тепло от наружной поверхности передается воздуху, а количество тепла будет определяться уравнением:

$$\boxed{Q = \alpha_2 (t_2 - t_в),} \qquad (77)$$

где α_2—суммарный коэффициент теплоотдачи конвекцией и излучением от наружной стенки к воздуху.

Преобразовав уравнения, получим значения для разности температур:

$$\boxed{t_{газ} - t_1 = \frac{Q}{\alpha_1 \cdot F},} \qquad (78)$$

$$t_1 - t_2 = \frac{Q \cdot S}{\lambda \cdot F}, \tag{79}$$

$$t_2 - t_в = \frac{Q}{\alpha_2 \cdot F}. \tag{80}$$

Сложив эти уравнения, получаем выражение:

$$t_{газ} - t_в = \frac{Q}{F}\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{S}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}\right). \tag{81}$$

Здесь левая часть уравнения выражает разность температур газовой и воздушной среды.

Из уравнения (81) получаем:

$$Q = \frac{F(t_{газ} - t_в)}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{S}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}. \tag{82}$$

Если выражение $\frac{1}{\alpha_1} + \frac{S}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}$ обозначим через $\frac{1}{K}$, то выражение для количества тепла, передаваемого от первой среды ко второй, примет обычный вид, характеризующий процесс теплопередачи:

$$Q = KF(t_{газ} - t_в), \tag{83}$$

где K—так называемый коэффициент теплопередачи от среды к среде через промежуточную стенку.

Определение количества тепла с помощью коэффициента теплопередачи облегчает вычисления, так как можно ограничиться определением только температур газовых сред, не определяя температуры стены.

Во многих случаях легче определить температуру газовой среды, чем температуру поверхности стенки. Поэтому и выражение для определения общего количества тепла с помощью коэффициента теплопередачи K имеет широкое применение. Для получения размерности K полагаем все остальные входящие в уравнение члены равными единице. Тогда:

$$K = \frac{Q}{F\,(t_{газ} - t_в)} \quad ккал/м^2\ час\ град,$$

т. е. коэффициент теплопередачи от среды к среде через стенку представляет количество тепла, проходящее в час через стенку

площадью в 1 $м^2$ при условии, что разность температур газовых сред равняется 1°.

Выражение:

$$\boxed{\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{S}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \qquad (84)$$

носит название сопротивления теплопередаче.

В это выражение входят: $\frac{1}{\alpha_1}$ — сопротивление переходу тепла от газа к стенке; $\frac{S}{\lambda}$ — сопротивление самой стенки; $\frac{1}{\alpha_2}$ — сопротивление переходу тепла от стенки. Таким образом можно сказать, что общее тепловое сопротивление при переходе от среды к среде через стенку равняется сумме тепловых сопротивлений при переходе тепла от газа к стенке и от стенки к газу и сопротивления самой стенки.

Если стенка состоит не из одного слоя, а из нескольких, то $\frac{1}{K}$ будет отличаться от вышеприведенного выражения тем, что вместо члена, определяющего сопротивление одной стенки, войдет сумма сопротивлений всех составных слоев:

$$\boxed{\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{S_1}{\lambda_1} + \frac{S_2}{\lambda_2} + \ldots + \frac{1}{\alpha_2}.} \qquad (84')$$

Пример. Определить коэффициент теплопередачи K для кирпичной стены ($\lambda = 0{,}75$) толщиной 65 *см*, если для внутренней поверхности стены коэффициент теплоотдачи $\alpha_1 = 5$, а для наружной $\alpha_2 = 20$.

Из формулы (84):

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{S}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{5} + \frac{0{,}65}{0{,}75} + \frac{1}{20}} = \frac{1}{0{,}2 + 0{,}85 + 0{,}05} =$$

$$= \frac{1}{1{,}1} = 0{,}91 \text{ ккал/м}^2 \text{ час град.}$$

В случае перехода тепла от одной среды к другой через цилиндрическую стену выражение для определения количества тепла, передаваемого в час через 1 *м* длины криволинейной поверхности (трубы), принимает следующий вид:

$$\boxed{q = \frac{t_{газ} - t_в}{\frac{1}{\pi\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2{,}73\lambda_1}\lg\frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\pi\alpha_2 d_2}} \text{ ккал/час} \cdot \text{м}} \qquad (85)$$

и для многослойной:

$$q = \frac{t_{газ} - t_в}{\frac{1}{\pi\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2{,}73\lambda_1}\lg\frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2{,}73\lambda_2}\lg\frac{d_3}{d_2} + \ldots + \frac{1}{\pi\alpha_2 d_{n+1}}}, \quad (86)$$

где: $t_{газ}$, $t_в$ — температуры сред;

α_1, α_2 — коэффициенты теплоотдачи;

$d_1, d_2, \ldots, d_{n+1}$ — диаметры соответствующих слоев поверхности;

$\lambda_1, \lambda_2, \ldots, \lambda_n$ — коэффициенты теплопроводности отдельных слоев.

7. ПЕРЕДАЧА ТЕПЛА В РЕКУПЕРАТОРАХ И РЕГЕНЕРАТОРАХ

Во многих случаях передача тепла от продуктов горения к нагреваемому газу или воздуху происходит не непосредственно, а с помощью промежуточной среды. Возможны два случая: регенеративная и рекуперативная передачи.

При регенеративной передаче тепла продукты горения направляют в камеру, где находится специальная насадка, обычно кирпичная. После того как продукты горения нагревают насадку до определенной температуры, их удаляют и на нагретую насадку направляют холодный воздух или газ, подлежащие нагреву. Таким образом, здесь происходит процесс с периодичес-

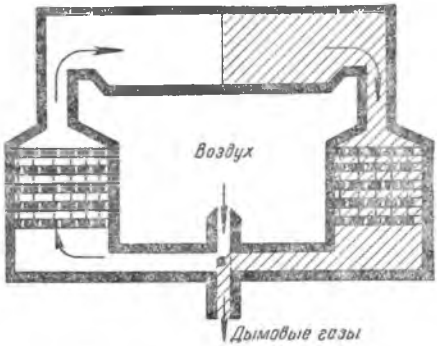


Рис. 34. Схема работы регенераторов.

кой переменой направления движения газов и воздуха. Поэтому, для непрерывного подогрева воздуха необходимо иметь две камеры, а для подогрева воздуха и газа—четыре. Время нагрева насадки продуктами горения или отбора тепла воздухом или газом называют периодом работы генератора. Схема переключения и расположения камер в регенераторах показана на рис. 34.

В промышленности строительных материалов регенераторы применяют главным образом в стекловаренных печах. В теплообменных аппаратах второго рода — рекуператорах — передача тепла от продуктов горения к воздуху происходит через стенку, причем направление движения газов сохраняется постоянным. Направление газовых потоков может быть в основном противоточным и прямоточным.

В случае прямотока (рис. 35, *а*) дымовые газы и воздух движутся в одном направлении по обеим сторонам разделяющей

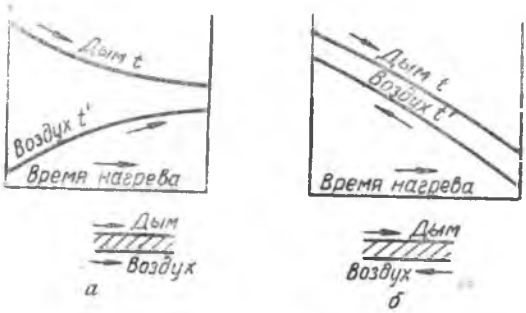


Рис. 35. Схема направления дымовых газов и воздуха в рекуператорах.

их стенки. При этом дымовые газы с наиболее высокой температурой вступают в теплообмен с поступающим в рекуператор воздухом самой низкой температуры. Измерение температур показывает, что максимальный нагрев воздуха в этом случае не может превышать температуру дымовых газов при выходе из рекуператора.

В случае противотока (рис. 35, *б*) движение продуктов горения направлено против движения воздуха; при этом имеется возможность подогреть воздух значительно выше конечной температуры продуктов горения.

Расчет рекуператора ведется двумя способами, в зависимости от задания:

1) по заданной температуре нагрева определяют необходимую поверхность нагрева;

2) по заданной поверхности нагрева определяют температуру подогрева воздуха.

Для расчетов пользуются основными уравнениями теплопередачи. Количество тепла, передаваемое через рекуператор в единицу времени, может быть определено из условий передачи тепла через стенку:

$$\boxed{Q = KF\Delta t,} \qquad (87)$$

где: Q — общее количество тепла, переданное через стенку от продуктов горения к воздуху;

K — общий коэффициент теплопередачи;

F — поверхность нагрева рекуператора в $м^2$;

Δt — среднее значение разности температур между охлаждающимися и нагревающимися газами.

Общее количество тепла можно определить из условия, что тепло, потерянное продуктами горения, движущимися по одну сторону рекуператора, должно быть передано воздуху, движущемуся по другую сторону рекуператора. Количество тепла Q, содержащееся в продуктах горения, равно:

$$\boxed{Q = Wc(t_н - t_к),} \qquad (88)$$

где: W — количество газа в $м^3/час$, приведенное к 0°;

c — теплоемкость газов (средняя);

$t_н$ — температура входящих газов;

$t_к$ — температура газов при выходе.

Количество тепла, полученное воздухом Q', равно:

$$\boxed{Q' = W' c' (t'_н - t'_к).} \qquad (89)$$

Обозначения букв те же, что и для продуктов сгорания, только для воздуха введен значок′. Необходимо учитывать, что часть тепла дымовых газов пропадает бесполезно. Поэтому при подсчете тепла, передаваемого дымовыми газами, приходится вводить коэффициент потери тепла η, который в обычных случаях можно принимать равным 0,90—0,95:

$$Q' = \eta Q = 0{,}90\, Q.$$

Наибольшее затруднение представляет определение Δt, т. е. среднего значения разности температур между охлаждающимися и нагревающимися газами. Эта величина зависит от разности температур охлаждающихся и нагревающихся газов в начале и в конце процесса, а также от характера процесса (прямоток или противоток).

В общем случае:

$$\boxed{\Delta t = \frac{t_{макс} - t_{мин}}{\ln \frac{t_{макс}}{t_{мин}}},} \qquad (90)$$

где: $t_{макс}$ — наибольшая разность температур между продуктами горения и воздухом, равная разности температур при входе газов в рекуператор — $t_н - t'_н$;

$t_{мин}$ — наименьшая разность температур между продуктами горения и воздухом, равная разности температур при выходе газов из рекуператора — $t_к - t'_к$;

ln — натуральный логарифм, равный 2,3 lg.

Для облегчения расчетов в табл. 17 приведены наиболее часто встречающиеся в практике значения:

$$\ln \frac{t_{макс}}{t_{мин}} = 2{,}3 \lg \frac{t_{макс}}{t_{мин}}.$$

В случае, если отношение $\frac{t_{макс}}{t_{мин}} < 2$, можно с достаточной точностью за среднюю температуру принять среднее арифметическое из температур дымовых газов и воздуха:

$$\boxed{\Delta t = \frac{t_{газ} + t_в}{2} = \frac{t_н - t'_н + t_к - t'_к}{2} = \frac{t_н + t_к}{2} - \frac{t'_н + t'_к}{2}.} \qquad (91)$$

Зная значения Q и Δt, можно из формулы (87) найти поверхность рекуператора, если вычислить коэффициент теплопередачи K по формуле (83).

Таблица 17

Значение величин 2,3 lg $\frac{t_{макс}}{t_{мин}}$

$\frac{t_{макс}}{t_{мин}}$	2,3 lg $\frac{t_{макс}}{t_{мин}}$	$\frac{t_{макс}}{t_{мин}}$	2,3 lg $\frac{t_{макс}}{t_{мин}}$	$\frac{t_{макс}}{t_{мин}}$	2,3 lg $\frac{t_{макс}}{t_{мин}}$
12,0	2,48	6,5	1,87	2,0	0,69
11,5	2,44	6,0	1,79	1,9	0,64
11,0	2,40	5,5	1,70	1,8	0,59
10,5	2,35	5,0	1,81	1,7	0,53
10,0	2,30	4,5	1,50	1,6	0,47
9,5	2,25	4,0	1,39	1,5	0,41
9,0	2,20	3,5	1,25	1,4	0,34
8,5	2,14	3,0	1,10	1,3	0,26
8,0	2,08	2,5	0,92	1,2	0,18
7,5	2,01	2,2	0,69	1,0	0,10
7,0	1,95	2,1	0,74	—	—

Пример. Найти среднюю разность температур в рекуператоре для противотока и прямотока, если дымовые газы охлаждаются с 1200 до 900°, а воздух нагревается с 0 до 500°.

По формуле

$$\Delta t = \frac{t_{макс} - t_{мин}}{2{,}3 \lg \frac{t_{макс}}{t_{мин}}}$$

находим:

для прямотока $t_{макс} = 1200 - 0 = 1200°$; $t_{мин} = 900 - 500 = 400°$;

для противотока $t_{макс} = 900 - 0 = 900°$; $t_{мин} = 1200 - 500 = 700°$.

Из табл. 17 находим значения $2{,}3 \lg \frac{t_{макс}}{t_{мин}}$:

для прямотока при $\frac{t_{макс}}{t_{мин}} = 3 \ldots 1{,}10$;

для противотока при $\frac{t_{макс}}{t_{мин}} = 1{,}3 \ldots 0{,}26$.

Отсюда:

для прямотока $\Delta t = \frac{800}{1{,}1} = 730°$;

для противотока $\Delta t = \frac{200}{0{,}26} = 770°$.

Для случая противотока $\frac{t_{макс}}{t_{мин}} = 1{,}3$. Поэтому можно было среднюю разность температур определить как среднюю арифметическую из температур дымовых газов и воздуха:

$$\Delta t = \frac{t_н + t_к}{2} - \frac{t'_н + t'_к}{2} = \frac{1200 + 900}{2} - \frac{500 + 0}{2} = 800°,$$

что мало отличается от значения, вычисленного по точной формуле.

Рекуператоры применяются двух типов: металлические и керамические. Рекуператор первого типа состоит из металлических труб, заключенных в металлическую или керамическую коробку (рис. 36). Движение газов может быть направлено как снаружи труб, так и по трубам. В последнем случае упрощается обслуживание, в частности, удаление осевшей золы. В случае же направления дымовых газов снаружи труб очистка их от осевшей на них золы представляет большие затруднения.

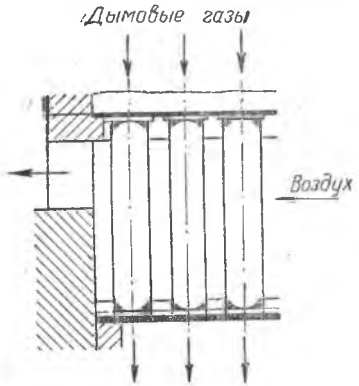


Рис. 36. Металлический трубчатый рекуператор.

При устройстве металлических рекуператоров следует учитывать, что температура стенок труб из простой стали не должна превышать 450°; температура чугунных труб может быть несколько выше.

В настоящее время большое применение получили игольчатые рекуператоры (рис. 37). Рекуператоры этого типа, применяющиеся при температурах до 1050°, состоят из отдельных элементов — труб из тугоплавкого чугуна длиной 0,9—2 *м*, внутренняя и наружная поверхности которых снабжены обтекаемыми иглами, что значительно увеличивает коэффициент теплопередачи (до 60 *ккал/м² час град*).

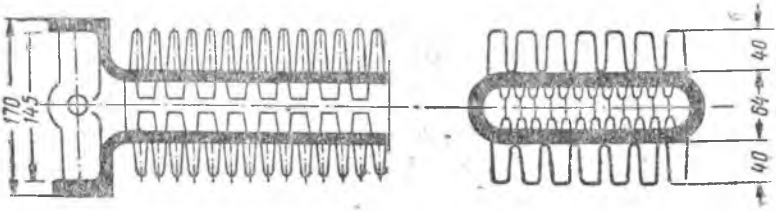


Рис. 37. Элемент игольчатого рекуператора.

Игольчатые рекуператоры занимают мало места и удобны для установки. Недостатком их является засоряемость наружной поверхности золой.

Керамические рекуператоры состоят из блоков различного фасонного сечения, образующих при укладке взаимно перекрещивающиеся каналы. По одну сторону их протекает воздух, по другую — продукты горения. Неудобство керамических рекуператоров заключается в неплотности в местах соединения отдельных элементов, вследствие чего получается значительная утечка подогреваемого воздуха вместе с отходящими газами или же смешивание продуктов горения с подогреваемым воздухом. В обоих случаях к. п. д. рекуператоров снижается. Керамические рекуператоры для подогрева газа применять не следует, так как невозможно обеспечить достаточную плотность соединений.

ЗАДАЧИ К ЧЕТВЕРТОМУ РАЗДЕЛУ

1. Найти распределение температур в стене печи, состоящей из трех слоев кирпича толщиной до 25 *см*. Коэффициенты теплопроводности кирпича: огнеупорного— $\lambda_ш = 1{,}0$, изоляционного—$\lambda_и = 0{,}15$; глиняного— $\lambda_к = 0{,}7$. Температура в печи 1000°, наружного воздуха + 20°. Коэффициент теплоотдачи для внутренней стены $\alpha_1 = 200$ *ккал/м² час град*, для внешней стены $\alpha_2 = 10$ *ккал/м² час град*, $Q = 420$ *ккал/м² час*.

2. Найти толщину стены из фибролита ($\lambda_ф = 0{,}11$), которая равноценна в тепловом отношении толщине кирпичной стены в 2,5 кирпича ($\lambda_к = 0{,}64$).

3. Стены печи сложены из шамотного кирпича толщиной 400 *мм*. $\lambda_ш = 1{,}2$; температура внутри печи 1300°. Для уменьшения тепловых потерь стену изолировали слоем изоляции ($\lambda_и = 0{,}15$). Найти толщину слоя, если потеря тепла с 1 *м²* стены после изоляции равняется 700 *ккал/час*. Коэффициент теплоотдачи для внутренней поверхности $\alpha_1 = 200$, для наружной— $\alpha_2 = 10$. Температура наружного воздуха 25°.

4. Определить теплопередачу излучением 1 *м* горячей трубы диаметром $d = 50$ *см*, проходящей по коридору шириной 1,5 *м* и высотой 2 *м*, если коэффициент излучения трубы $C_1 = 3{,}2$, стены $C_2 = 3{,}8$; температура трубы 100°, а стены — 20°.

5. Газы из печи с температурой 800° используются в прямоточном рекуператоре для нагрева воздуха. Найти поверхность рекуператора, если в один час используется 300 000 *ккал*. Коэффициент теплопередачи стенки рекуператора $K = 11$ *ккал/м² час град*. Температура газа при выходе из рекуператора 450°, воздух нагревается с 20 до 200°.

6. Определить потерю тепла излучением стальной трубы (d=70 *мм*, $l = 3$ *м*), проходящей в кирпичном канале $0{,}3 \times 0{,}3$ *м*, если температура трубы 220°, а стены канала 30°. Коэффициент излучения трубы C_1=3,2, а стен $C_2 = 3{,}8$.

7. Определить поток тепла q *ккал/пог. м час* через стенку стальной трубы с наружным диаметром 30 *мм*; толщина стенки 5 *мм*. Коэффициент теплопроводности стенки $\lambda = 15$ *ккал/м час град*; температура внешней поверхности $t_1 = 600°$, внутренней — $t_2 = 450°$.

8. Вычислить потерю тепла изолированным паропроводом при следующих условиях: наружный диаметр трубы 100 *мм*; первый слой изоляции— магнезиальный толщиной 25 *мм*, с коэффициентом теплопроводности $\lambda = 0{,}06$ *ккал/м час град*; второй слой из асбестодиатомовой изоляции толщиной 25 *мм* с $\lambda = 0{,}075$ *ккал/м час град*; температура поверхности трубы $t_1 = 200°$, поверхности внешней изоляции — 40°.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОВТОРЕНИЯ К ЧЕТВЕРТОМУ РАЗДЕЛУ

1 Какие существуют виды теплопередачи?
2. Чем отличается стационарный поток тепла от нестационарного?
3. Что такое коэффициент теплопроводности?
4. Что такое термическое сопротивление?
5 Отчего зависит коэффициент теплопроводности строительных материалов?
6. Чему равна температура на поверхности любого слоя сложной плоской стенки?
7. Чему равна температуропроводность материалов?
8. Что такое тепловой поток?
9. От чего зависит коэффициент передачи тепла конвекцией?
10. В чем сущность теории теплового моделирования?
11 Укажите значение коэффициента конвекции для различных случаев.
12. Что называется абсолютно черным телом?
13. Как происходит теплопередача излучением между двумя параллельными поверхностями?
14. Чем отличается излучение газов от излучения твердых тел?
15. Как вычисляется тепло излучения газов?
16. Чему равняется коэффициент теплопередачи?
17. Как происходит передача тепла в регенераторах и в рекуператорах?
18. Как определяется величина поверхности рекуператора?

РАЗДЕЛ ПЯТЫЙ

ТОПКИ ПЕЧЕЙ И СУШИЛОК

Топкой называется та часть тепловой установки, в которой происходит сжигание топлива.

Образующиеся при сжигании топлива горячие продукты горения направляются из топки в рабочие камеры печей и сушилок, где передают свое тепло обжигаемым или высушиваемым материалам и изделиям.

Конструкции топок зависят от видов и свойств сжигаемого топлива, а также от назначения тепловых установок. Например, топки котлов резко отличаются по своему устройству и режиму работы от топок промышленных печей и сушилок[1].

В отличие от котельных, печные топки по принципу действия во многих случаях являются топками периодического действия, работающими в разные периоды обжига с переменной тепловой мощностью.

По характеру процесса горения печные топки могут быть топками полного и неполного горения топлива, т. е. полугазовыми. Эти особенности определяются технологическими условиями процесса обжига.

В некоторых печах, например кольцевых, сжигание топлива производится непосредственно в рабочей камере их. Такие печи топок не имеют.

По способу сжигания топлива топки делятся на слоевые и факельные. Слоевой процесс применяется при сжигании твердого кускового топлива; факельным способом сжигается пылевидное, жидкое и газообразное топливо.

---

[1] В этом учебнике рассматриваются лишь топки печей и сушилок, применяющиеся в промышленности строительных материалов.

Глава I

ТОПКИ ДЛЯ СЖИГАНИЯ ТВЕРДОГО КУСКОВОГО ТОПЛИВА

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ТОПКАХ

Сжигание твердого кускового топлива производится в топках с колосниковой решеткой, на которой лежит слой горящего топлива. Такие топки называются слоевыми.

По своему устройству они делятся на:

а) топки с ручным обслуживанием и

б) механизированные.

По способу подвода воздуха к слою горящего топлива топки бывают:

а) дутьевые — с подводом воздуха к топливу под напором и

б) самодувные — работающие за счет тяги, создаваемой печью или дымовой трубой.

Выбор типа топки зависит, в основном, от свойств топлива: влажности, содержания летучих веществ, спекаемости кокса, зольности и температуры спекания золы.

Главнейшими требованиями, которым должна удовлетворять топка, являются:

а) тепловая экономичность; высокий к. п. д. топки;

б) возможная механизация процессов загрузки топлива, шуровки, удаления золы и шлаков; наименьшая затрата труда на обслуживание топки.

Простейшее топочное устройство для сжигания твердого кускового топлива представлено на рис. 38. Основные части топки: топочная камера *1*, колосниковая решетка *2*, зольник или поддувало *3*, загрузочное отверстие *4*, порог топки *5*, отверстие для выхода продуктов горения *6*.

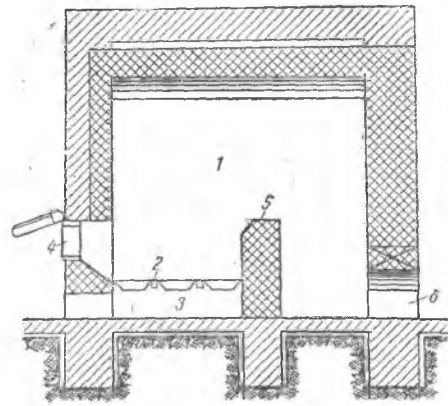


Рис. 38. Схема простейшей топки.

Процесс горения загружаемого в топку топлива схематически можно представить себе состоящим из следующих стадий:

а) подсушка топлива — выделение из него сначала внешней, а затем внутренней, т. е. гигроскопической влаги;

б) разложение топлива на летучие вещества и твердый остаток — кокс, состоящий главным образом из углерода;

в) окисление горючих элементов топлива кислородом воздуха, т. е. процесс собственно горения, протекающий раздельно для летучих веществ и кокса.

Горение летучих веществ происходит в топочном объеме, а горение кокса — на колосниковой решетке.

Первые две стадии горения требуют подведения тепла извне, третья стадия происходит с выделением тепла.

Объем топочной камеры и площадь колосниковой решетки зависят от количества выделяемых из топлива летучих горючих веществ при нагревании топлива.

Чем выше содержание в топливе летучих горючих веществ, тем больше должен быть объем топочной камеры для завершения в нем всех реакций горения летучих веществ, выделившихся из топлива. Наоборот, чем больше кокса образуется при горении, тем больше должна быть площадь колосниковой решетки и тем меньший объем может иметь топка. Например, сжигание антрацита, содержащего малое количество летучих (4—8%), протекает главным образом в слое топлива на колосниковой решетке и не требует большого объема топки, а сжигание длиннопламенных углей происходит в значительной степени в топочной камере и требует большего объема ее, чем при сжигании антрацита.

Важнейшим элементом топки при сжигании твердого кускового топлива слоевым способом является колосниковая решетка, предназначенная для поддержания слоя топлива и равномерного распределения подводимого к нему воздуха.

Колосниковая решетка состоит из отдельных колосников, которые могут иметь самые разнообразные формы и размеры. На рис. 39 представлены два распространенных колосника — балочный и плиточный. Колосники делаются обычно из чугуна.

Благодаря придаваемой колосникам форме, между ними образуются промежутки — прозоры, через которые проходит воздух, поступающий в топку. Сумма площадей всех прозоров между колосниками называется «живым сечением» колосниковой решетки. В зависимости от вида и свойств сжигаемого топлива «живое сечение» площади решетки колеблется от 10 до 30%.

Колосниковые решетки располагаются в топках горизонтально или наклонно.

2. ТОПКИ С ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ КОЛОСНИКОВОЙ РЕШЕТКОЙ

Процесс горения топлива в топке с горизонтальной колосниковой решеткой характеризуется тем, что указанные выше три стадии горения топлива (подсушка, разложение на летучие и кокс и собственно горение) во времени следуют одна за другой.

Топливо, загружаемое в топку более или менее толстым слоем, в первой стадии выделяет влагу, т. е. подсушивается.

Во второй стадии из топлива выделяются горючие летучие вещества, состоящие главным образом из углеводородов (CH_4, C_2H_4 и др.), которые должны полностью сгорать в топке. Для подсушивания топлива и выделения из него горючих летучих веществ, как было указано выше, необходима затрата тепла, вследствие чего топка охлаждается.

В третьей стадии выделившиеся из топлива горючие летучие вещества и кокс сгорают.

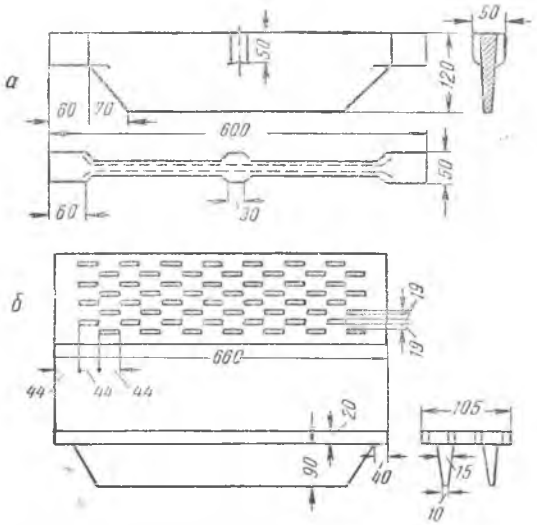


Рис. 39. Типы колосников: *а*—балочный; *б*—плиточный.

Между тремя стадиями процесса горения нет вполне четкого разграничения во времени; частично они совмещаются. Так, выделение летучих начинается еще до полного удаления всей влаги, а окисление горючих элементов — до полного выделения всех летучих веществ из топлива. Вместе с тем сгорание выделяющихся из топлива горючих летучих веществ возможно и в самом топливном слое. Поэтому вышеприведенное деление процесса горения на отдельные стадии или периоды его следует рассматривать как приближенно схематическое.

Важнейшим условием, обеспечивающим полноту сгорания топлива и экономичность работы топки, является достаточное количество поступающего в нее воздуха.

Процесс горения топлива в топке с горизонтальной колосниковой решеткой и периодической загрузкой топлива характеризуется несоответствием между поступлением воздуха в топку и потреблением его в разные стадии горения, т. е. потребление воздуха неодинаково в продолжение всего процесса горения. Значительное количество кислорода воздуха требуется для пол-

ного окисления летучих веществ и кокса, а затем, по мере их прогорания, потребность в воздухе уменьшается и излишек вводимого воздуха приводит к нежелательному охлаждению топки и замедлению реакций горения. Потребление воздуха в отдельные стадии процесса горения изображено на диаграмме (рис. 40).

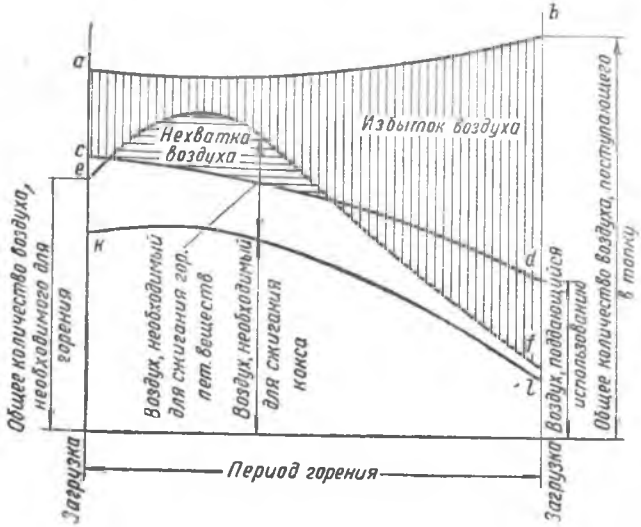


Рис. 40 Диаграмма потребления воздуха в топке (по проф. К. В. Киршу).

Для уменьшения несоответствия между потреблением воздуха и поступлением его в топку необходимо применять частые загрузки топлива небольшими порциями.

Из изложенного следует, что подача воздуха в топку с периодической загрузкой топлива должна изменяться в соответствии с его потреблением. На практике это привело бы, однако, к непрерывному регулированию дверцей поддувала количества поступающего в топку воздуха, что является трудно выполнимым. Дверца поддувала обычно открывается на некоторую среднюю постоянную высоту. Ввиду этого отмеченное выше несоответствие между поступлением воздуха в топку и потреблением в ней воздуха не устраняется и является органическим недостатком данного вида топок.

Несмотря на этот существенный недостаток, топки с горизонтальной колосниковой решеткой и периодической загрузкой топлива имеют, благодаря простоте их устройства, широкое применение. Они могут служить для сжигания всех главнейших видов твердого топлива — дров, торфа, каменных углей и антрацита.

В промышленности строительных материалов топки с горизонтальной колосниковой решеткой применяются для отопления периодических печей, сушилок и во всех остальных случаях сжи-

гания небольших количеств кускового твердого топлива, когда устройство более совершенных топок не оправдывает требуемых для этого затрат.

3. ТОПКИ С НАКЛОННОЙ КОЛОСНИКОВОЙ РЕШЕТКОЙ

Наклонная колосниковая решетка выполняется в виде наклонно поставленных колосников или, чаще, в виде ступенчатой решетки (рис. 41 и 42). Угол наклона колосниковой решетки составляет обычно 45—50°.

В топках со ступенчатой колосниковой решеткой (рис. 41) каждая ступень представляет собой как бы отдельный очаг горения, что способствует устойчивости процесса горения в целом.

Работа топки со ступенчатой колосниковой решеткой отличается от работы топки с горизонтальной колосниковой решеткой тем, что в ней все три стадии горения протекают одновременно. Благодаря этому процесс горения происходит более равномерно и экономично, чем в топках с горизонтальной решеткой и периодической загрузкой топлива.

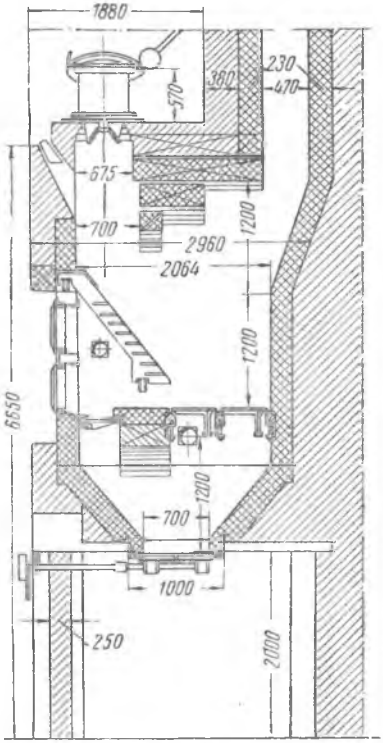


Рис. 41. Шахтная топка со ступенчатой колосниковой решеткой для бурых углей.

4. ШАХТНЫЕ ТОПКИ

В промышленности строительных материалов большое распространение имеют так называемые шахтные топки, применяемые для сжигания дров, торфа и других видов топлива с большой влажностью.

Особенность шахтных топок — наличие над колосниковой решеткой шахты, в которой происходит предварительная подготовка топлива к горению, т. е. его подсушка и частичное выделение летучих веществ. Благодаря этому процесс горения топлива на колосниковой решетке протекает с большей скоростью, а это приводит к увеличению тепловой мощности топки.

Применение шахтных топок как для промышленных печей и сушилок, так и для паровых котлов имеет большое значение в

народном хозяйстве, так как позволяет рационально использовать различные виды низкосортного местного топлива, сжигание которого в других топках затруднительно и неэкономично.

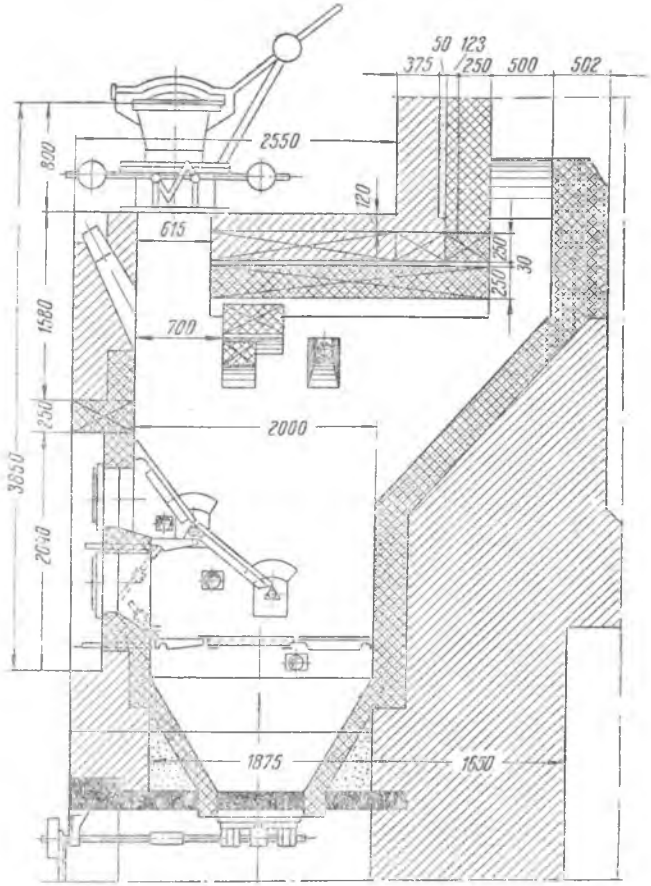


Рис. 42 Шахтная топка с наклонной колосниковой решеткой для дров и торфа.

5. ПОЛУГАЗОВЫЙ ПРОЦЕСС В ТОПКАХ

В ряде случаев процесс горения топлива не заканчивается в топке, а частично переносится в рабочую камеру печи.

Бо́льшая, по сравнению с обычной, толщина слоя топлива приводит к образованию продуктов неполного горения топлива — так называемого полугаза, которые и направляются для дожигания в печь. В результате этого нагревание обжигаемого

материала происходит не только путем переноса тепла из топки нагретыми продуктами неполного горения, но и за счет выделения тепла при догорании их непосредственно в самой печи.

Воздух, поступающий при полугазовом процессе в топку, называется первичным воздухом, а поступающий в печь для горения полугаза — вторичным.

Обычно при полугазовом процессе количество поступающего в топку первичного воздуха составляет около половины общего количества, необходимого для сжигания этого топлива.

Такой способ сжигания топлива, называемый полугазовым или полугенераторным процессом, применяется в промышленности строительных материалов при отоплении различных печей: шахтных известковообжигательных, печей периодического действия для обжига керамических изделий и других.

Применение полугазового способа позволяет иметь в печах более высокие и притом равномерно распределенные температуры и, следовательно, более равномерный обжиг, благодаря частичному перенесению процесса горения в рабочие камеры печей.

Полугазовый способ сжигания топлива применяется при температурах в печах выше 900—1000°; при меньших температурах применяются топки полного сгорания.

Для получения полугаза служит преимущественно топливо с большим количеством летучих веществ: дрова, торф и длиннопламенные угли.

Топки, в которых происходит полугазовый процесс сжигания топлива, называются полугазовыми или полугенераторными. Полугазовый процесс осуществляется обычно в шахтных топках.

Толщина слоя топлива в полугазовой топке зависит от вида топлива, его влажности, величины кусков и режима работы топки. Чем толще слой топлива, тем устойчивее процесс горения в топке и тем больше продуктов неполного горения будет содержать полугаз. Следовательно, тем лучше будет состав его.

Чем больше влажность топлива, тем толще должен быть слой его в топке, так как при толстом слое влажное топливо имеет больше времени для подсушки, прежде чем оно начнет гореть.

Толщина слоя в полугазовых топках зависит и от величины кусков топлива: чем мельче куски, тем тоньше слой топлива, так как при толстом слое мелкого топлива значительно вырастает сопротивление при прохождении воздуха. Толщина слоя топлива в полугазовых топках лежит в следующих пределах: дрова и торф—до 1 *м*, бурые угли (челябинский, подмосковный и т. п.)—0,5—0,8 *м*, каменные угли—0,4—0,5 *м*, антрацит донецкий — 0,4 *м*.

Температура в полугазовых топках ниже, чем в топках полного сгорания; при нормальном режиме полугазового процесса она составляет от 700 до 1000°.

Теплотворность полугаза 600—1000 *ккал/м*^{3}; в зависимости от свойств топлива, толщины его слоя на колосниковой решетке, количества поступающего воздуха и температуры в топке, состав полугаза может колебаться в широких пределах, а именно: $CO_2 = 10 - 15\%$; $CO = 7 - 20\%$; $H_2 = 5 - 12\%$; $N_2 = 50 - 60\%$[1].

6. МЕХАНИЗИРОВАННЫЕ ТОПКИ

В Советском Союзе разработан ряд механизированных топок, при обслуживании которых тяжелый физический труд кочегаров заменен работой механизмов. Вместе с тем применение механизированных топок улучшает условия сжигания топлива, обеспечивает непрерывность и равномерность топочных процессов и, следовательно, большую экономичность использования топлива.

В промышленности строительных материалов в настоящее время применяют следующие устройства для механизации работы топок:

а) механические забрасыватели топлива;

б) винтовые подаватели топлива;

в) подвижные цепные колосниковые решетки;

г) качающиеся и опрокидные колосники для сброса золы и шлаков с решетки в зольный подвал.

Топка с механическим забрасывателем топлива представлена на рис. 43. Забрасыватель состоит из ряда лопастей, присоединенных к валу на шарнирных креплениях. Уголь самотеком поступает к забрасывателю из расположенного выше бункера и забрасывается в колосниковую решетку. Благодаря непрерывной загрузке топлива при помощи забрасывателя, устраняется периодичность процесса горения, характерная для топок с ручной загрузкой топлива.

Винтовой подаватель топлива (рис. 44). Уголь из загрузочного бункера *1* винтовым подавателем *2* подается в топку. Воздух поступает через отверстия в кольцевой колосниковой решетке *3*.

Применение винтового подавателя создает принципиально отличающиеся от обычных топок условия сжигания топлива — свежее топливо подается снизу, т. е. под слой горящего топлива.

В топках с нижней подачей топлива отдельные стадии процесса горения происходят по толщине слоя топлива в обратном порядке, чем в обычных топках: в самом нижнем слое происходит подсушка топлива, несколько выше — выделение летучих горючих веществ, а еще выше—горение. Летучие горючие веще-

---

[1] Методика расчета состава полугаза изложена в учебном пособии «Теплотехнические расчеты установок силикатной промышленности» под редакцией Д. Б. Гинзбурга и В. Н. Зимина. Промстройиздат, 1951.

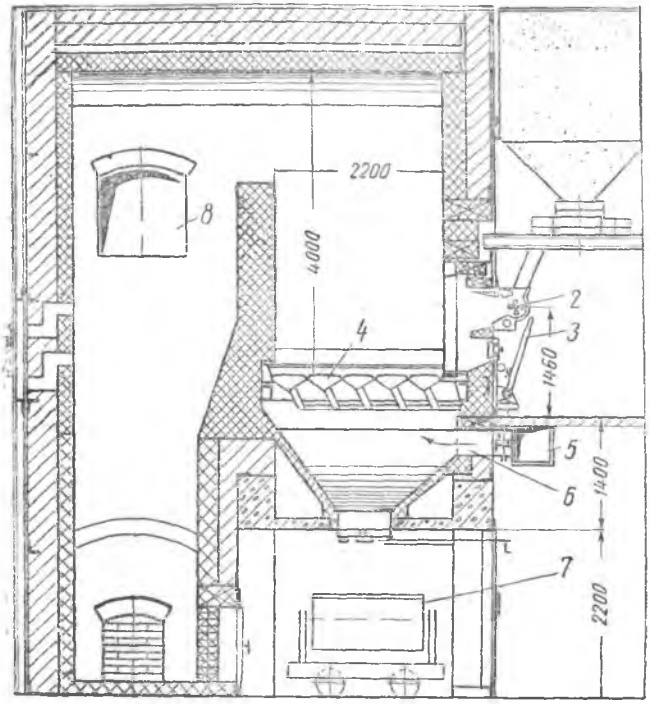


Рис. 43. Механизированная топка: *1*—бункер для угля; *2*—механический забрасыватель топлива; *3*—шуровочная рукоятка; *4*—поворотные колосники; *5*—воздухопровод; *6*—зольник; *7*—вагонетка для золы; *8*—отверстие для отвода газов.

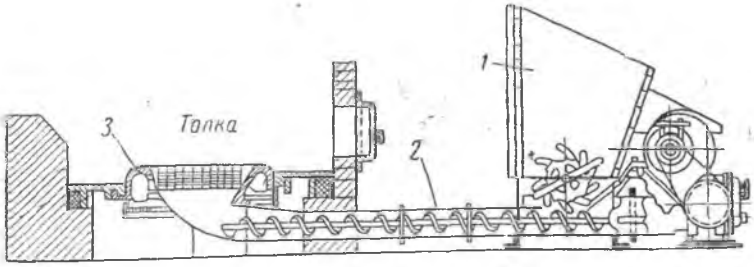


Рис. 44. Винтовой подаватель топлива в топку.

ства, выделившиеся внизу, проходят через вышележащий слой горящего топлива, где и сгорают. Благодаря этому в топках подобного типа потери тепла от химического недожога незначительны.

Механизированные топки с винтовой подачей топлива устраивают у печей периодического действия для обжига керамических изделий и в других случаях.

Подвижная цепная колосниковая решетка представляет собой бесконечное непрерывно движущееся полотно, состоящее из отдельных колосников (рис. 45). Скорость движения решетки

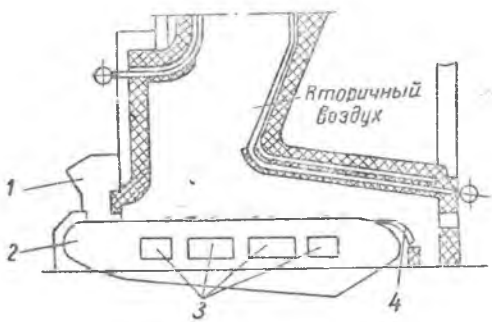


Рис. 45 Цепная колосниковая решетка: *1*—бункер для топлива; *2*—цепная решетка; *3*—отверстия для подачи воздуха; *4*—нож для удаления шлаков.

должна быть согласована со скоростью горения топлива и составляет 30—40 *см* в минуту. Решетка приводится в действие электродвигателем через редуктор с коробкой скоростей, что позволяет регулировать скорость движения. Длина и ширина решетки зависят от размеров топки.

В топках с подвижной решеткой устанавливают позонный подвод воздуха. Зола и шлаки сваливаются при повороте колосников в конце топки в шлаковый бункер, расположенный позади решетки.

Благодаря возможности широко регулировать процесс горения, топки с подвижной решеткой весьма экономичны, но в них необходимо сжигать преимущественно топливо, сортированное по величине кусков.

Качающиеся и опрокидные колосники (рис. 46) применяются главным образом при сжигании топлива, образующего плотный шлак, и служат для механического удаления его из топки. Качающиеся колосники могут поворачиваться (качаться), примерно, на 30° в обе стороны, вследствие чего происходит взрыхление топливного слоя и выпадение шлака из нижней части слоя в шлаковый бункер, расположенный под решеткой.

Опрокидные колосники отличаются от качающихся тем, что

они имеют бо́льшую ширину (360—400 *мм*) и могут поворачиваться лишь в одну сторону, но на бо́льший угол — примерно 60°. Это обеспечивает более сильное взламывание плотных шлаков.

В целях комплексной механизации топочных процессов в топках применяют одновременно несколько механизмов, например, механический забрасыватель топлива и опрокидные колосники (см. рис. 43).

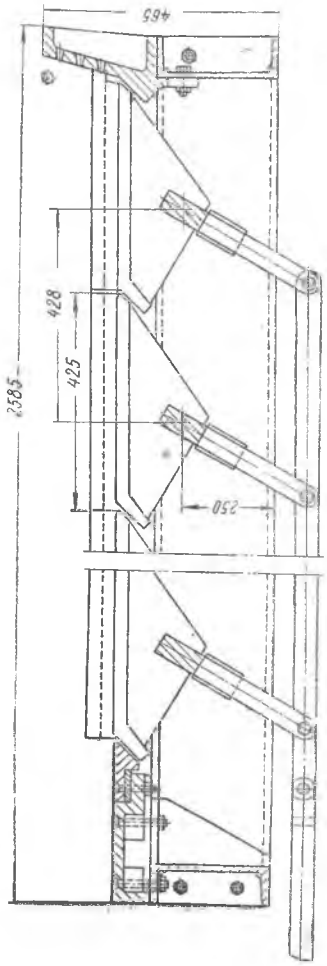


Рис. 46. Опрокидные колосники.

7. ПРИМЕНЕНИЕ ВОЗДУШНОГО ДУТЬЯ В ТОПКАХ

В топках старых конструкций подвод воздуха происходил за счет разрежения — естественной тяги, создаваемой дымовой трубой. В последнее время в большинстве топок применяется принудительное вдувание воздуха под колосниковую решетку при помощи вентиляторов.

Благодаря применению воздушного дутья процессы горения топлива интенсифицируются, и тепловая мощность топок повышается. При наличии воздушного дутья улучшается и возможность регулирования работы топок. В топках со ступенчатыми и механическими колосниковыми решетками применяется так называемый позонный подвод воздушного дутья, обеспечивающий наиболее полное соответствие количеств поступающего и потребляемого воздуха в различных зонах топки.

Давление воздуха под колосниковой решеткой зависит от сопротивления самой колосниковой решетки и лежащего на ней слоя топлива. Чем толще слой топлива, тем выше должно быть, как правило, давление воздушного дутья. Однако вследствие большого давления подаваемого в топку воздуха горячие газы выбиваются из топки через отверстия.

При сжигании каменных углей и антрацита на плоских горизонтальных решетках давление воздушного дутья составляет 50—80 *мм* вод. ст.

При сжигании бурых углей, торфа и дров в топках с наклонными колосниковыми решетками давление дутья должно быть не ниже 100 *мм* вод. ст.

Сжигание каменных углей и антрацита производится при холодном воздушном дутье, так как вследствие большой теплотворности этих видов топлива при подогреве вдуваемого воздуха может произойти спекание золы и зашлакование колосниковой решетки, что нарушит процесс горения.

При сжигании влажных топлив с небольшой теплотворностью (дров, торфа и бурых углей) рекомендуется применять горячее дутье с температурой подогрева воздуха до 150—200°. Это улучшает процесс сжигания влажного топлива и повышает температуру в топке.

8. ОБСЛУЖИВАНИЕ ТОПОК ДЛЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

Основными условиями экономичной работы топок являются правильная подача топлива и подвод воздуха. Работа топок во многом зависит от обслуживания их кочегаром, который должен наблюдать за показаниями контрольно-измерительных приборов и регулировать процесс горения топлива.

Розжиг топки. Перед розжигом топки необходимо осмотреть ее снаружи и внутри для того, чтобы проверить: положение колосников на подколосниковых балках, состояние огнеупорной футеровки и сводов топки, а также исправность загрузочных устройств, дутьевого вентилятора и других частей топочной установки.

Розжиг топки производят обычно дровами или другим легковоспламеняющимся топливом. Лишь после того как на колосниковой решетке образуется слой жара, т. е. раскаленного топлива, в топку начинают загружать уголь или другой вид основного топлива.

После того как топливо разгорится, включают вентилятор воздушного дутья и, регулируя загрузку топлива и подачу воздуха, доводят работу топки до нормальных эксплуатационных условий, затем продукты горения пускают из топки в рабочие камеры печей или сушилок.

Загрузка топлива в топку. При ручной загрузке топливо забрасывают в топку через определенные промежутки времени (обычно через 30—40 минут) небольшими порциями, равномерно распределяя его слоем одинаковой толщины по всей площади колосниковой решетки. Забрасывать топливо в топку большими порциями не следует, так как это ухудшает условия горения.

Полугазовые топки, в большинстве имеющие загрузочные коробки с двойным затвором (верхняя чугунная крышка и нижний створчатый или конусный затвор), загружаются так: верхняя крышка открывается и в коробку загружается топливо; за-

тем крышка закрывается, при помощи рычага открывается дно коробки и топливо падает в топку. Таким образом, при загрузке топлива топка все время бывает закрыта, что препятствует проникновению газов из топки в помещение. После того как топливо загружено в топку, загрузочную коробку вновь наполняют топливом, закрывают верхнюю крышку и оставляют ее подготовленной для следующей очередной загрузки (при сжигании дров коробку оставляют незагруженной, так как дрова могут легко воспламениться).

Шуровка топлива и чистка топки. В топках с ручным обслуживанием приходится периодически перемешивать слой топлива на колосниковой решетке. Это необходимо для улучшения притока воздуха к кускам топлива, облегчения провала золы в зольник и обеспечения других условий горения топлива. Перемешивание слоя топлива на колосниковой решетке называется шуровкой топлива.

Шуровка производится периодически и зависит от свойств топлива: чем сильнее спекается зола топлива в шлак, тем чаще, как правило, шуруют топливо.

При шуровке топлива необходимо следить, главным образом, за тем, чтобы топливо равномерно распределялось по всей площади колосниковой решетки и на ней не было пустых мест, через которые мог бы свободно проходить воздух, не участвующий в горении. Через определенные периоды времени топку очищают от шлаков. В новых топочных конструкциях тяжелый труд кочегаров полностью заменен работой механизмов.

В топке следует поддерживать небольшое разрежение (около 1—2 *мм* вод. ст.), что достигается согласованной работой вентилятора для подачи воздушного дутья в топку и дымососа (или дымовой трубы) у печей и сушилок.

При обслуживании топок надо соблюдать правила техники безопасности: не загружать и не шуровать топлива при включенном дутье, наблюдать за процессом горения только через специальные смотровые отверстия — «гляделки» и т. д.

Глава II

УСТРОЙСТВА ДЛЯ СЖИГАНИЯ ГАЗООБРАЗНОГО, ЖИДКОГО И ПЫЛЕВИДНОГО ТОПЛИВА

Газообразное, жидкое и пылевидное топливо сжигается факельным способом. Сущность этого способа состоит в том, что струя горючего газа, распыленного в мельчайшие капли жидкого топлива или измельченного до пылевидного состояния угля, сгорает в окружающей ее струе воздуха.

Устройства для сжигания газообразного, жидкого или пылевидного топлива называются **горелками** и **форсунками**.

1. ГАЗОВЫЕ ГОРЕЛКИ

Газовые горелки бывают разнообразных конструкций и размеров. Они зависят от:

а) устройства топки или печи;

б) свойств газообразного топлива;

в) степени нагрева газа и воздуха в воздухонагревателях, рекуператорах и регенераторах;

г) технологических условий, предъявляемых к процессу горения.

В зависимости от способа смешения газа и воздуха и характера пламени различают горелки неполного смешения (пламенные) и полного смешения (беспламенные).

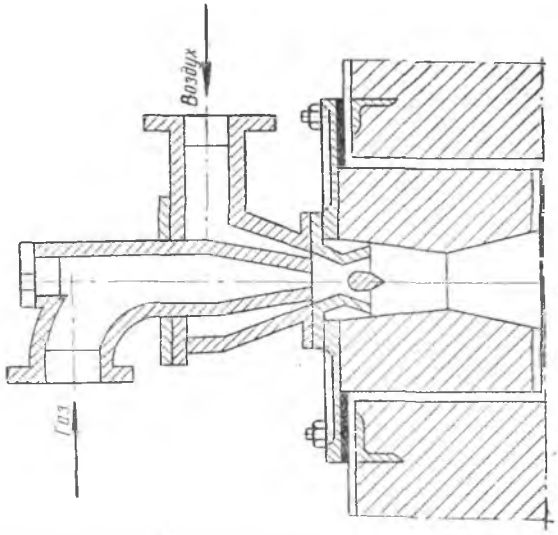


Рис. 47. Газовая щелевая горелка низкого давления.

В пламенных горелках (рис. 47) смешение газа и воздуха происходит при выходе их из горелки. Устройство горелок печей описано при рассмотрении соответствующих типов печей.

В беспламенных горелках происходит более совершенное смешение газа и воздуха: они смешиваются в самой горелке настолько интенсивно, что при выходе из нее газовоздушная смесь воспламеняется, и горение происходит полностью и почти мгновенно. Вследствие этого видимого пламени (как обычно при горении) не наблюдается, так как продукты полного сгорания прозрачны.

При беспламенном сгорании газа достигаются более высокие температуры, чем при пламенном, главным образом за счет незначительного избытка воздуха (5—10%).

2. ФОРСУНКИ ДЛЯ СЖИГАНИЯ ЖИДКОГО ТОПЛИВА

Жидкое топливо, в основном мазут, сжигается в топках и непосредственно в рабочих камерах печей при помощи распыления его форсунками.

Процесс сжигания жидкого топлива состоит из следующих стадий:

1) распыления жидкого топлива до тонкодисперсного состояния;

2) испарения, т. е. превращения жидкого топлива в паровую фазу;

3) смешения парообразных горючих элементов с воздухом;

4) воспламенения и горения газифицированной горючей смеси.

Форсунки для распыления мазута бывают высокого и низкого давления.

По способу распыления форсунки делятся на паровые, воздушные и механические.

Известный русский инженер В. Г. Шухов (1853—1939) в 1880 г. предложил сжигать нефтяное топливо при помощи распыления его паром. Он изобрел первую паровую форсунку. На рис. 48 представлена паровая форсунка системы Шухова, применяемая и в настоящее время. Мазут поступает по внутренней центральной трубке форсунки, а пар—по внешней концентрической. При выходе струя пара пересекается с мазутом и, смешиваясь с ним, распыляет его до тонкодисперсного состояния. По-

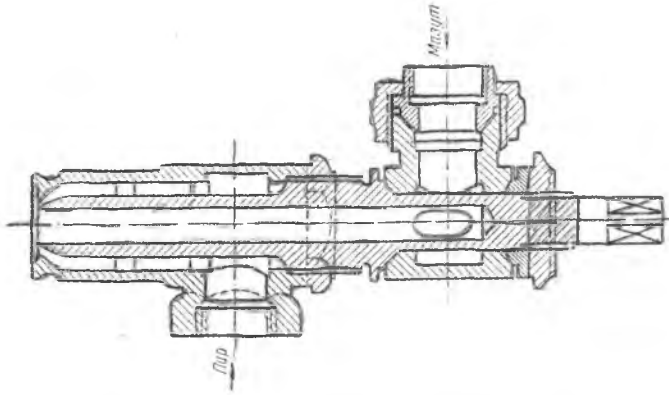


Рис 48. Паровая форсунка системы Шухова.

дача мазута регулируется вентилем, установленным на подводящей мазут трубе.

Воздушные форсунки высокого давления устроены так же как и паровые, с той лишь разницей, что распыление мазута в них производится сжатым воздухом.

Механический распылитель для мазута изображен на рис. 49. Внутри распылителя имеется стальная коническая игла с винтовой нарезкой по поверхности. Нарезка придает выходящей из отверстия форсунки струе мазута быстрое вращательное движение, под действием которого он распыляется на мельчайшие частицы. Механические распылители, в отличие от паровых и воздушных, работают бесшумно.

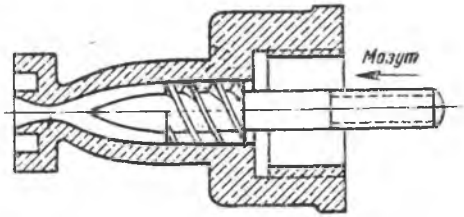


Рис. 49. Механический распылитель для мазута.

Для сжигания мазута во вращающихся печах на цементных заводах применяют двух- и трехструйные механические форсунки высокого давления. Мазут пропускают под давлением до 20—25 *ати* через сопло со специальным распылителем, который так же, как и на рис. 49, имеет вид конуса с нарезанной на нем винтообразной канавкой. Чем круче нарезаны витки, тем шире факел горения и тем лучше распыляется мазут.

В отличие от форсунок высокого давления, в форсунках низкого давления (до 1000 *мм* вод. ст.) мазут распыляют только воздухом, количество которого обычно бывает достаточным для полного сгорания мазута. Для уменьшения вязкости мазут перед поступлением в форсунку подогревают до 60—75°.

Благодаря легкости смешения распыленного горючего с воздухом, горение жидкого топлива протекает с малым избытком воздуха ($\alpha = 1{,}05—1{,}25$) и при высоких температурах.

3. ГОРЕЛКИ ДЛЯ СЖИГАНИЯ ПЫЛЕВИДНОГО ТОПЛИВА

В промышленности строительных материалов пылевидное топливо является основным топливом, применяемым для отопления вращающихся печей на цементных заводах. Горелки для сжигания угольной пыли во вращающихся печах обычно называют пылеугольными форсунками. В большинстве случаев они представляют собой трубу диаметром 100—150 *мм*, по которой пылевоздушная смесь поступает в печь со скоростью 50—70 *м/сек*.

Пылеугольные форсунки для изменения положения факела горения делаются поворотными и выдвижными.

Пылевидное топливо, полученное из длиннопламенных углей, воспламеняется на близком расстоянии от форсунки и дает длинный факел горения. Тощие короткопламенные угли в пылевидном состоянии, наоборот, воспламеняются на большем расстоянии от форсунки и дают более короткий факел горения. Пламя, образующееся при горении пылевидного топлива, обладает бо́льшим теплоизлучением, чем при горении газообразного топлива вследствие находящихся в нем раскаленных частиц твердого углерода.

Глава III

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ТОПОК

1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ТОПКИ

Тепло, заключенное в топливе, при сжигании его в топках используется не полностью. Часть тепла бесполезно теряется. Потери тепла в топках происходят:

1) от химической неполноты горения — q_x, при недостатке воздуха или несовершенном смешении воздуха с топливом, а также при низкой температуре в топке;

2) от механической неполноты горения — $q_м$, что бывает:

а) при провале части несгоревшего топлива через колосниковую решетку в зольник — $q_{пр}$,

б) при выгребе из топки (во время чистки ее) части топлива вместе со шлаками — $q_{выг}$,

в) при уносе части мелкого топлива из топки в виде пыли вместе с дымовыми газами — $q_{ун}$,

3) от потерь в окружающую среду путем излучения и конвекции — $q_{изл}$.

Коэффициент полезного действия и величина тепловых потерь могут иметь различные значения. Это зависит как от устройства топок и режима работы, так и, в большей степени, от технически правильного обслуживания их.

Коэффициент полезного действия топки можно определить на основании теплового баланса, состоящего из прихода и расхода тепла в топке. Приходная часть теплового баланса представляет собой все тепло, заключенное в топливе, т. е. произведение теплотворности топлива на количество сожженного топлива. Расходная часть теплового баланса состоит из полезно используемого тепла $q_{пол}$ и вышеперечисленных тепловых потерь.

Уравнение теплового баланса топки, отнесенное к сжиганию B *кг* топлива, имеет вид:

$$Q_н^р \cdot B = q_{пол} - (q_x + q_{пр} + q_{выг} + q_{ун} + q_{изл}).$$

Коэффициентом полезного действия топки η_{tm} называют отношение полезно используемого тепла ко всему количеству тепла, содержащемуся в топливе, т. е.

$$\eta_{tm} = \frac{q_{пол}}{Q_н^р \cdot B}.$$

Значения к. п. д. топки и тепловых потерь выражаются обычно в процентах. Часто коэффициент полезного действия топки выражают следующим образом:

$$\eta_{tm} = 100 - (q_x + q_{пр} + q_{выг} + q_{ун} + q_{изл}),$$

где за 100% принято все тепло, содержащееся в топливе, а q_x, $q_{пр}$, $q_{выг}$, $q_{ун}$ и $q_{изл}$ — потери тепла в %.

Числовые значения некоторых тепловых потерь, например, потери тепла от химической неполноты горения, могут быть вычислены по соответствующим формулам на основании анализа дымовых газов. Значения других потерь тепла принимаются по практическим данным.

Для приближенных теплотехнических расчетов можно принимать следующие значения тепловых потерь в топках:

а) потеря тепла от химической неполноты горения — от 2 до 5% (меньшее значение следует принимать при сжигании факельным способом жидкого, пылевидного и газообразного топлива, большее — при сжигании твердого кускового топлива в условиях недостаточно хорошего смешивания топлива с воздухом);

б) потеря тепла от механической неполноты горения при провале части топлива через колосниковую решетку в зольник для слоевых топок составляет около 1%;

в) потеря тепла от выгреба части топлива со шлаком при чистке топок обычно не превышает 0,5%;

г) потеря тепла от уноса мелкого топлива в виде пыли с дымовыми газами зависит от влажности топлива, размеров его, величины разрежения в топке, давления дутья и других условий и колеблется от 1 до 6%;

д) потеря тепла в окружающую среду также зависит от многих факторов: температуры горения, устройства топки, плотности кладки и др.; ориентировочно величину этой потери тепла можно считать от 2 до 5%.

Величина коэффициента полезного действия топок, принимая вышеприведенные значения тепловых потерь, может быть от 85 до 95%.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ ТОПКИ

Расчеты топок обычно состоят из определения объема топки и площади колосниковой решетки.

Определение объема топки производится по его тепловому напряжению.

Тепловое напряжение топки представляет собой количество тепла, выделяемого при горении топлива в 1 $м^3$ объема топки в 1 час и имеет размерность *ккал/м³ час*. Таким образом, величина теплового напряжения является показателем тепловой мощности топки, т. е. количества тепла, выделяемого в ней в единицу времени.

Объем топки определяется по формуле:

$$V_m = \frac{Q_н^р \cdot B}{q_{об}}, \qquad (92)$$

где: V_m — объем топки в $м^3$;

$Q_н^р$ — теплотворность топлива в *ккал/кг* или *ккал/м³*;

B — часовое количество сжигаемого топлива в *кг* или $м^2$;

$q_{об}$ — тепловое напряжение объема топки в *ккал/м³ час*.

Тепловое напряжение топочного объема, обычно принимаемое различным для топок печей и сушилок, приведено в табл. 18.

Таблица 18

Тепловое напряжение топочного объема

Вид топлива	Тепловое напряжение объема в *ккал/м³ час*	
	топок печей	топок сушилок
Дрова и торф	$300 \div 400 \cdot 10^3$	$200 \div 250 \cdot 10^3$
Бурый уголь	$200 \div 350 \cdot 10^3$	$150 \div 200 \cdot 10^3$
Каменный уголь	$250 \div 450 \cdot 10^3$	$250 \div 300 \cdot 10^3$
Мазут	$250 \div 500 \cdot 10^3$	$200 \div 300 \cdot 10^3$
Газообразное топливо .	$200 \div 350 \cdot 10^3$	$200 \div 250 \cdot 10^3$

Определение объема топки по тепловому напряжению является приближенным методом расчета, не вполне учитывающим влияние диффузионных процессов в топочной камере и других факторов, особенно сказывающихся при сжигании газообразного топлива.

Создавая хорошие условия для смешения горючих элементов с воздухом, можно резко увеличить тепловое напряжение топочного объема.

Площадь колосниковой решетки определяют по весовому или тепловому ее напряжению.

Весовым напряжением колосниковой решетки называется количество топлива, сжигаемое на 1 $м^2$ площади колосниковой решетки в 1 час и выражаемое в *кг/м² час*.

Тепловым напряжением колосниковой решетки называется количество тепла, получаемое на 1 $м^2$ пло-

щади колосниковой решетки в 1 час и выражаемое в *ккал/м² час*.

Площадь колосниковой решетки может быть определена по формуле:

$$F_к = \frac{B}{b_к} \text{ или } F_к = \frac{Q_н^р \cdot B}{q_к}, \qquad (93)$$

где: $F_к$ — площадь колосниковой решетки в *м²*;

B — количество топлива, сжигаемого в 1 час на всей площади колосниковой решетки, в *кг*;

$b_к$ — весовое напряжение колосниковой решетки в *кг/м² час*;

$Q_н^р$ — теплотворность топлива в *ккал/кг* или *ккал/м³*;

$q_к$ — тепловое напряжение площади колосниковой решетки в *ккал/м² час*.

Тепловые напряжения колосниковых решеток в печных топках при полном сжигании различных видов топлива приведены в табл. 19.

Таблица 19

Тепловые напряжения колосниковых решеток

Типы топок	Вид топлива	Тепловое напряжение в *ккал/м²час*
Топки с горизонтальной или наклонной колосниковой решеткой при естественной тяге и ручном обслуживании	Дрова и торф . .	$500 \div 700 \cdot 10^3$
	Бурый уголь . .	$150 \div 300 \cdot 10^3$
	Каменный уголь .	$300 \div 500 \cdot 10^3$
	Антрацит	$400 \div 600 \cdot 10^3$
Полумеханизированные топки с горизонтальной решеткой и воздушным дутьем, с качающимися колосниками и ручным обслуживанием	Дрова и торф . .	$1000 \div 1400 \cdot 10^3$
	Бурый уголь . . .	$900 \div 1300 \cdot 10^3$
	Каменный уголь .	$1200 \div 1600 \cdot 10^3$
	Антрацит:	
	а) несортированный	$800 \div 1100 \cdot 10^3$
	б) сортированный	$1000 \div 1200 \cdot 10^3$
Механизированные топки с цепной решеткой	Щепа	$1100 \div 1600 \cdot 10^3$
	Торф	$2000 \div 2200 \cdot 10^3$
	Бурый уголь . .	$1000 \div 1500 \cdot 10^3$
	Каменный уголь .	$1300 \div 1800 \cdot 10^3$
	Антрацит	$1200 \div 1600 \cdot 10^3$

В топках сушилок верхние пределы напряжений колосниковых решеток следует принимать на 30—40% меньшими, чем в топках печей.

Для условного топлива с теплотворностью в 7000 *ккал/кг* весовое напряжение колосниковой решетки обычно принимают в 100 *кг/м² час*.

Кроме общей площади колосниковой решетки определяется еще «живое сечение» ее, т. е. сумма площади всех прозоров между колосниками, через которые проходит воздух, зависящее от вида топлива.

Таблица 20

Зависимость площади «живого сечения» колосниковой решетки от вида топлива

Вид топлива	Площадь „живого сечения" в % от всей площади решетки
Дрова, торф и бурые угли	25—30
Каменные угли и антрацит	10—15

Ширина прозоров устанавливается в зависимости от величины кусков топлива и его зольности.

Помимо площади колосниковой решетки и «живого сечения», в топках со слоевым процессом сжигания топлива определяют высоту слоя топлива на колосниковой решетке и сопротивление слоя топлива и решетки прохождению воздуха.

Высота слоя топлива на решетке в топках полного сгорания определяется по уравнению:

$$h_m = \frac{B}{\gamma_m \cdot F_к}, \qquad (94)$$

где: h_m —высота топливного слоя в *м*;

B — количество топлива, сжигаемое в 1 час, в *кг*;

$F_к$ —площадь колосниковой решетки в *м²*;

γ_m —объемный вес топлива в *кг/м³*.

Для подсчета сопротивления колосниковой решетки и слоя топлива применяются практические формулы, приведенные в табл. 21.

В формулах табл. 21:

$\frac{Q}{R}$ — тепловое напряжение колосниковой решетки в *ккал/м² час*;

CO_2—содержание углекислого газа в продуктах горения в процентах.

Таблица 21

Зависимость сопротивления колосниковой решетки от типа топки и вида топлива

Тип топок и вид топлива	Формула для определения сопротивления в *мм* вод. ст.
Топка с горизонтальной колосниковой решеткой для дров	$\Delta S_m = 3\left(\frac{\frac{Q}{R}}{1000}\right)^2 \cdot \left(\frac{13,5}{CO_2}\right)^2$
Шахтная топка для дров	$\Delta S_m = 3\left(\frac{\frac{Q}{R}}{1200}\right)^2 \cdot \left(\frac{15,5}{CO_2}\right)^2$
Топка с горизонтальной колосниковой решеткой для торфа	$\Delta S_m = 4\left(\frac{\frac{Q}{R}}{1000}\right)^2 \cdot \left(\frac{12}{CO_2}\right)^2$
Шахтная топка для торфа	$\Delta S_m = 4\left(\frac{\frac{Q}{R}}{1000}\right)^2 \cdot \left(\frac{15}{CO_2}\right)^2$

Для полугазовых топок высота слоя топлива, полученная по формуле (94), должна быть увеличена в 2—3 раза, так как в этих топках количество топлива принимается из расчета одновременной загрузки 2—3-часового запаса топлива.

3. РАСЧЕТ ФОРСУНОК НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ МАЗУТА

В топках для сжигания жидкого и газообразного топлива определяют объем топки и рассчитывают выходное отверстие форсунки или горелки.

Диаметр воздушного отверстия определяется по формуле:

$$D_в = \frac{K\sqrt{B \cdot a}}{\sqrt{h}}, \qquad (95)$$

где: $D_в$ — диаметр воздушного отверстия в *мм*;

K — эмпирический коэффициент, равный 38 для форсунок с завихрителем и 35 для форсунок без завихрителя;

B — расход нефти (мазута) в *кг/час*;

a — количество воздуха, идущего на распыление, в процентах от всего количества теоретически необходимого воздуха;

h — давление воздуха в *мм* вод. ст.

Диаметр нефтяного отверстия определяется по формуле:

$$D_н = \sqrt{\frac{B}{12{,}6\sqrt{p\gamma}}}, \qquad (96)$$

где: $D_н$ — диаметр нефтяного отверстия в *мм*;
B — расход нефти (мазута) в *кг/час*;
p — давление нефти в форсунке в *кг/см²*;
γ — удельный вес нефти.

4. РАСЧЕТ ГАЗОВЫХ ГОРЕЛОК

Расчет газовых горелок сводится обычно к определению площади выходного отверстия газа, воздуха или газовоздушной смеси, если газ и воздух смешиваются предварительно в горелке перед входом их в печь.

Площади газового и воздушного отверстий определяются по формуле:

$$F = \frac{V}{v}, \qquad (97)$$

где: F — площадь газового или воздушного отверстия в *м²*;
V — количество газа или воздуха в *м³/сек*;
v — скорость выхода газа или воздуха из горелки в *м/сек* (всегда больше линейной скорости горения данной газовоздушной смеси).

Эжекционные газовые горелки обычно принимаются без расчета — по практическим данным заводов-изготовителей.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОВТОРЕНИЯ К ПЯТОМУ РАЗДЕЛУ

1. Какие виды топлива сжигаются в факельных и какие — в слоевых топках?
2. В чем основное преимущество топок с наклонной колосниковой решеткой перед топками с горизонтальной решеткой?
3. Что называется «живым сечением» колосниковой решетки и чему оно равно?
4. Что представляет собой полугазовый процесс в топках и в каких случаях он применяется?
5. Назовите способы механизации топочных процессов и укажите условия их применения в зависимости от вида и свойств топлива?
6. Перечислите основные виды тепловых потерь в топках и укажите способы их уменьшения.
7. Для чего применяется подогрев воздушного дутья в топках?
8. Изложите основные правила обслуживания топок для твердого топлива.
9. Чем отличаются пламенные горелки для сжигания газа от беспламенных?
10. Опишите устройство и работу паровой форсунки системы Шухова.
11. Для чего подогревается мазут перед подачей его в форсунку и до какой температуры, примерно, производится подогрев?

12. Как отличить работу паровой форсунки от механического распылителя мазута по внешним признакам?

13. Опишите устройство горелок для сжигания пылевидного топлива во вращающихся печах.

14. Что представляет собой тепловое напряжение топочного объема, какова его размерность и какими способами можно его увеличить?

15. Что называется тепловым и весовым напряжением колосниковой решетки и в каких единицах измерения они выражаются?

16. Как влияет применение механизации топочных процессов на тепловое напряжение топок?

17. Напишите формулу для определения сопротивления колосниковой решетки и слоя топлива проходу воздуха.

18. Изложите схему расчета топок для твердого, жидкого и газообразного топлива.

19. Расскажите об устройстве топок, которые вы видели на производственной практике.

20. В чем состоят обязанности кочегаров у топок (ответить по опыту работы во время практики).

РАЗДЕЛ ШЕСТОЙ

ГАЗИФИКАЦИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА И ГАЗОГЕНЕРАТОРЫ

Глава I

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ПО ГАЗИФИКАЦИИ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

1. ПРИМЕНЕНИЕ ГЕНЕРАТОРНОГО ГАЗА В ПРОМЫШЛЕННОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В разделе первом указывалось на большое значение генераторного газа для промышленности строительных материалов, в которой он широко применяется для отопления ванных, туннельных и других печей. На многих предприятиях построены крупные газогенераторные станции, перерабатывающие большие количества твердого топлива — древесины, торфа и углей в генераторный газ.

Особенно распространено применение генераторного газа в стекольной промышленности, где подавляющее большинство стекловаренных и других печей отапливается генераторным газом.

В последнее время область применения генераторного газа в промышленности строительных материалов расширилась. Его стали применять в туннельных печах для обжига изделий строительной керамики.

2. ХИМИЧЕСКИЕ РЕАКЦИИ ГАЗОГЕНЕРАТОРНОГО ПРОЦЕССА

Химической основой процесса газификации являются реакции в газогенераторе между углеродом и кислородом воздуха. Эти реакции выражаются уравнениями:

$$\boxed{C+O_2=CO_2+95\,407\ ккал,} \tag{98}$$

$$\boxed{C+\frac{1}{2}O_2=CO+27\,757\ ккал,} \tag{99}$$

$$\boxed{C+CO_2=2CO-39\,893\ ккал.} \tag{100}$$

Первое уравнение выражает полное горение углерода, второе — неполное горение с образованием CO, являющейся одной из основных горючих частей генераторного газа, третье — восстановление части образовавшегося по уравнению (98) CO_2 в CO.

В генераторах при наличии раскаленного углерода и высоких температур все три реакции протекают одновременно, вследствие чего в генераторном газе наряду с CO всегда содержится и некоторое количество CO_2.

Если топливо состоит только из углерода (что практически не имеет места и допущено здесь только для простоты расчета), то на основе приведенных выше химических уравнений можно подсчитать теоретический состав генераторного газа. Из уравнения (99) видно, что для получения 1 *мо* CO необходимо израсходовать 0,5 *мо* O_2.

Вместе с кислородом в составе воздуха поступает азот, переходящий без изменения в генераторный газ. Так как содержание O_2 и N_2 в воздухе равно соответственно (по объему) 21% и 79%, то на 0,5 *мо* O_2 приходится 1,88 *мо* N_2. Таким образом, при газификации 1 *мо* C в продуктах газификации получается:

$$\begin{array}{l} CO - 1{,}00\ мо - 34{,}7\% \\ N_2 - 1{,}88\ мо - 65{,}3\% \\ \hline CO + N_2 - 2{,}88\ мо - 100{,}0\% \end{array}$$

Практическое значение этого вывода состоит в том, что он указывает на максимально возможное содержание CO в генераторном газе, равное 34,7%, к которому надо стремиться при газификации топлива в газогенераторах.

Так как в действительности газифицируемое топливо не является чистым углеродом, а в состав его обычно входят и другие элементы (H, S, O и т. д.), то содержание CO в генераторном газе будет ниже. Содержание CO в генераторном газе зависит не только от состава топлива, но, главным образом, от режима газификации и от обслуживания газогенераторов. При правильном обслуживании газогенераторов содержание CO в генераторном газе может доходить до 30—32%.

При газификации твердого топлива, состоящего из C, H, S и других элементов и содержащего влагу, процесс протекает значительно сложнее, чем указано выше. В состав генераторного газа поэтому обычно входят не только CO и N_2, но и другие газообразные составные части.

Физико-химические явления, происходящие в газогенераторе, по толщине слоя топлива могут быть схематически разделены на четыре зоны: зону сушки и подогрева, зону сухой перегонки, зону газификации, т. е. горения углерода топлива и восстановления им CO_2 в CO, зону золы и шлака (рис. 50).

Загруженное в газогенератор топливо прежде всего сушится, теряет свою влагу. Опускаясь ниже, топливо попадает в зону сухой перегонки, где при высокой температуре и отсутствии воздуха оно подвергается разложению на летучие вещества и кокс.

Продуктами сухой перегонки являются, главным образом, различные углеводороды: CH_4, C_2H_4 и другие. Кроме того, здесь выделяется из топлива H_2S, если топливо содержит серу. Состав газов, получающихся в зоне сухой перегонки, зависит от вида топлива и колеблется в очень широких пределах. Чем больше летучих содержит топливо, тем больше газов выделяется в этой зоне.

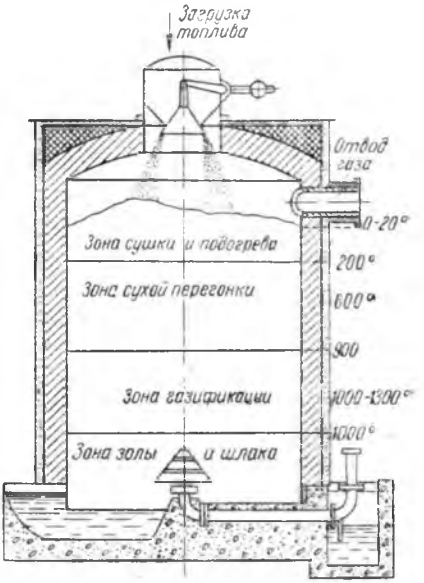


Рис. 50. Схема расположения зон в газогенераторе.

Далее, топливо, состоящее главным образом из углерода с примесью серы и золы, опускается вниз—в зону газификации, в которой вступает в реакции с кислородом воздуха по уравнениям (98) — (100). Так как скорость протекания этих реакций зависит от того, насколько топливо подготовлено к ним, то необходимо создавать условия, обеспечивающие полное удаление влаги и выделение летучих в верхних зонах газогенератора. Чем выше влажность топлива и чем больше в нем летучих, тем больше времени оно должно находиться в газогенераторе. Тем толще, следовательно, должен быть в нем слой топлива.

Из физической химии известно, что с повышением температуры увеличивается скорость реакций. Из этого следует, что для увеличения скорости и полноты восстановления CO_2 в CO (по реакции $CO_2+C=2CO$ — 39 893 *ккал*) надо иметь высокую температуру. Эта реакция является обратимой. При определенной температуре CO_2 и CO находятся в известном равновесии, которое при изменении температуры будет сдвигаться в ту или другую сторону, а именно: при повышении температуры— в сторону увеличения CO и уменьшения CO_2 (табл. 22).

При 1000° почти весь углекислый газ должен восстановиться в окись углерода, поэтому температуру в зоне газификации следует поддерживать около 1000°.

Таблица 22

Зависимость равновесия CO и CO_2 от температуры

Температура реакции в град.	Состав в %	
	CO	CO_2
500	5,0	95,0
600	23,0	77,0
700	68,0	32,0
800	90,0	10,0
900	96,5	3,5
1000	99,3	0,7

3. ДОБАВКА ВОДЯНОГО ПАРА К ВОЗДУШНОМУ ДУТЬЮ

При подаче в газогенератор воздуха в слое топлива выделяется много тепла. Это может привести к спеканию (шлакованию) золы топлива, что очень осложняет работу газогенератора. Поэтому обычно вместе с воздухом в газогенератор подают водяной пар, вступающий в эндотермические реакции с углеродом топлива по уравнениям:

$$C+H_2O=CO+H_2-30\,000\ ккал, \qquad (101)$$

$$C+2H_2O=CO_2+2H_2-20\,195\ ккал. \qquad (102)$$

Обе эти реакции протекают одновременно. При температурах выше 900° преобладает реакция по уравнению (101), а ниже 900° — по уравнению (102).

CO и H_2, как известно, являются горючими газами, увеличивающими теплотворность генераторного газа, несмотря на некоторое увеличение в газе CO_2, образующегося по уравнению (102).

Смесь пара и воздуха, вдуваемая в газогенератор, называется паровоздушным дутьем. Большинство современных газогенераторов работает с паровоздушным дутьем.

В отличие от воздушного генераторного газа, когда в генератор вдувается воздух без добавки водяного пара, генераторный газ, получаемый с применением паровоздушной смеси, называется паровоздушным или смешанным генераторным газом.

Количество пара, вводимого в газогенератор, можно определить косвенно — по температуре паровоздушной смеси, которая обычно поддерживается в пределах 50—60°. Пользуясь психрометрическими таблицами, подсчитывают количество водяного пара в 1 $м^3$ воздуха при данной температуре и полном насыщении воздуха водяным паром.

Пример. Определить количество пара, подаваемого в газогенератор при количестве вдуваемого воздуха 2560 *м³/час* и температуре паровоздушной смеси 55°.

По приложению VI находим, что при полном насыщении и температуре 55° содержание водяного пара в 1 *м³* воздуха составляет 104,28 *г*, а количество пара равно:

$$0{,}10428 \cdot 2560 = 266{,}96 \text{ кг/час}.$$

4. СОСТАВ ПАРОВОЗДУШНОГО ГЕНЕРАТОРНОГО ГАЗА

Состав генераторного газа зависит от вида и свойств топлива, режима газификации, конструкции газогенератора, обслуживания его и ряда других условий. Большое влияние на состав генераторного газа оказывают температура в газогенераторе и влажность паровоздушного дутья.

В табл. 23 приведены составы сухого паровоздушного генераторного газа из разных видов топлива.

Основными горючими частями генераторного газа являются CO и H_2. Особенностью состава генераторного газа является высокое содержание в нем азота, в среднем около 50%.

Все виды твердого топлива (древесина, торф, различные виды углей, кокс) могут быть превращены в генераторный газ. Но для газификации следует применять преимущественно те виды и сорта твердого топлива, сжигание которых в форме кусков затруднительно и неэкономично. Это, прежде всего, относится к местному топливу: торфу, подмосковному, челябинскому и другим местным углям, топливным отходам (например, коксику — отсевам кокса), различным древесным отходам и т. д.

Глава II

ТИПЫ ГАЗОГЕНЕРАТОРОВ

Конструкции газогенераторов весьма разнообразны и зависят в основном от вида и свойств газифицируемого топлива.

Газогенератор состоит обычно из следующих основных частей: 1) шахты газогенератора; 2) загрузочного устройства для топлива; 3) колосниковой решетки.

1. ШАХТЫ ГАЗОГЕНЕРАТОРОВ

Шахтой газогенератора называют его рабочую камеру, в которой происходит превращение твердого топлива в генераторный газ.

В поперечном сечении шахты бывают прямоугольными или, чаще всего, круглыми. Внутри шахты имеют огнеупорную футеровку, а снаружи — металлический кожух.

Таблица 23

Составы сухого паровоздушного генераторного газа из разных видов топлива

Вид газифицируемого топлива	Тип газогенератора	Состав сухого газа в %								Теплотворность сухого газа $Q_н^c$ в *ккал/м³*	Выход газа в *м³/кг*		Выход смолы в % от веса топлива
		CO_2	CO	CH_4	C_2H_4	H_2	H_2S	N_2	O_2		влажный	сухой	
Древесина (дрова W^p=25%)	С естественной тягой	5,6	28,8	3,3	0,4	11,7	—	50,1	0,1	1500	2,06	1,62	6,0
Древесина (щепа W^p=38%)	С дутьем и вращающейся решеткой	6,9	29,3	3,2	0,4	15,2	—	44,6	0,4	1600	1,74	1,08	8,1
Торф (W^p=44%)	С дутьем и крышеобразной решеткой	11,0	19,7	2,5	0,3	13,0	—	53,2	0,3	1180	2,15	1,52	4,3
Торф (W^p=36%)	С дутьем, швельшахтой и вращающейся решеткой	9,4	23,6	2,9	0,6	15,0	—	48,3	0,2	1430	1,97	1,49	4,8
Подмосковный уголь (W^p=32%)	С дутьем и вращающейся решеткой	5,6	26,0	2,2	0,4	15,9	0,9	50,8	0,2	1440	1,87	1,38	4,0
Челябинский уголь (W^p=19%)	То же	4,5	28,0	2,0	0,2	15,0	0,2	49,9	0,2	1440	2,52	2,14	3,0
Донецкий газовый уголь (W^p=5%)	Механизированный	8,7	21,4	2,5	—	17,4	—	49,8	0,2	1310	3,64	3,38	3,3
Антрацит марки АМ (W^p=5%)	Полумеханизированный	5,5	27,5	0,5	—	13,5	0,2	52,6	0,2	1230	4,40	4,16	—
Коксик (W^p=16%)	То же	4,0	29,0	0,6	—	12,0	0,2	54,0	0,2	1250	3,56	3,19	—

Размеры шахт определяются диаметром и высотой. Шахты строятся, главным образом, с диаметром 3 *м*. Высота шахт колеблется в широких пределах, в зависимости от свойств газифицируемого топлива, главным образом от влажности и содержания летучих в нем.

Для полного и быстрого протекания реакций в нижних зонах газогенератора необходимо, чтобы в реакцию вступало предварительно подготовленное топливо — подсушенное и карбонизированное, т. е. состоящее главным образом из углерода. Высокий слой топлива необходим также для полного выделения продуктов сухой перегонки из топлива, увеличивающих теплотворность газа. Чем выше влажность топлива, чем больше в нем летучих, тем больше времени требуется на подсушку топлива и сухую перегонку, тем толще должен быть слой топлива в газогенераторе и тем выше, следовательно, должен быть газогенератор.

Таблица 24

Зависимость толщины слоя топлива в газогенераторе от влажности и содержания летучих

Вид топлива	Содержание в %		Толщина слоя топлива в *м*
	влаги	летучих	
Дрова	30	75	3,0—7,0
Торф	40	70	3,0—7,0
Бурый уголь	20—30	40—45	1,0—2,0
Каменный уголь	5—10	15—40	0,6—1,0
Антрацит и кокс	5—8	4—8	0,6—1,0

Высокая температура, развивающаяся в результате происходящих в нижней части газогенератора реакций, может вызвать спекание золы топлива, что особенно нежелательно у стенок шахты. Приплавляясь к огнеупорной футеровке газогенератора, шлаки образуют на ней настыли. Это уменьшает площадь «живого сечения» газогенератора и снижает его производительность. Кроме того, при отбивании настылей от стенок газогенератора часто повреждается его огнеупорная футеровка.

Для предотвращения шлакования золы в нижней части шахты газогенератора устраивается водяное охлаждение в виде водяной или пароводяной рубашки, представляющей собой кольцевой кожух из листовой стали, полностью заполненный водой. На рабочей площадке газогенератора устанавливают паросборник, соединенный трубами с верхней и нижней частями кожуха

(рис. 51). Вода в замкнутой системе кожух — сборник все время циркулирует: горячая вода из кожуха поднимается в паросборник, где вскипает и превращается в пар; холодная вода

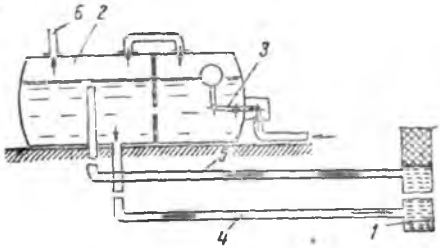


Рис. 51. Схема водяного охлаждения газогенератора: *1*—пароводяная рубашка; *2*—паросборник; *3*—питательный водяной клапан; *4*—подача холодной воды; *5*—отвод горячей воды и пара; *6*—отвод пара из паросборника.

из водопровода поступает в паросборник и из него по другой трубе спускается в нижнюю часть кожуха.

2. КОЛОСНИКОВЫЕ РЕШЕТКИ ГАЗОГЕНЕРАТОРОВ

Газогенераторы могут иметь неподвижные или вращающиеся колосниковые решетки.

Неподвижные колосниковые решетки в газогенераторах могут быть горизонтальными, ступенчатыми, крышеобразными или круглыми.

Газогенераторы с неподвижными, в частности, ступенчатыми колосниковыми решетками применяются главным образом при газификации дров и торфа, т. е. топлив с небольшим количеством нешлакующейся золы (рис. 52).

Ступенчатые колосниковые решетки дают возможность газифицировать и мелкое топливо — бурые и каменные угли, антрацитовую и коксовую мелочь и т. п.

Газогенераторы с неподвижными колосниковыми решетками строятся обычно в виде батарей, состоящих из нескольких шахт в одной кирпичной кладке. Они проще по конструкции, но производительность их меньше, а затраты труда на обслуживание больше, чем у газогенераторов с вращающимися колосниковыми решетками. Поэтому большинство газогенераторов имеет вращающиеся колосниковые решетки.

Применение вращающейся колосниковой решетки способствует равномерному распределению паровоздушного дутья по всей площади поперечного сечения газогенератора, обеспечивает хорошее размалывание образующихся кусков шлака и механическое удаление их из газогенератора.

Выбор типа вращающейся колосниковой решетки зависит от свойств топлива, главным образом от содержания в нем золы и температуры ее плавления. Газогенератор с вращающейся колосниковой решеткой и равномерно распределенной по площади сечения газогенератора подачей дутья изображен на рис. 53. Газогенератор имеет внизу вращающуюся чашу с водой, образующую гидравлический затвор, препятствующий выходу паровоздушного дутья наружу. Решетка состоит из эксцентрически положенных на дутьевую коробку колосников в виде колец,

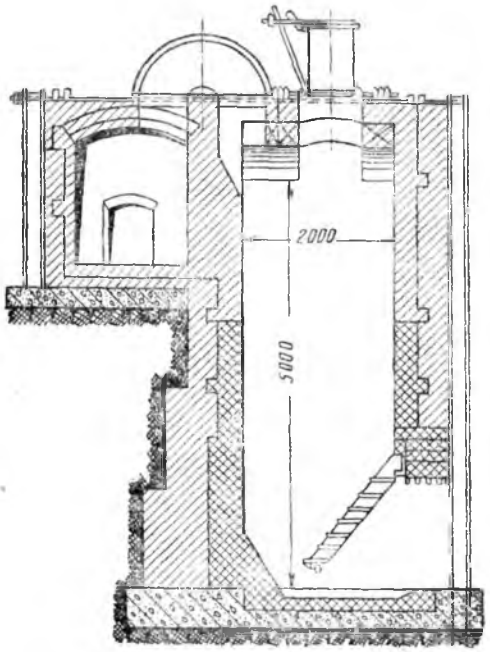


Рис. 52. Газогенератор для газификации торфа со ступенчатой решеткой.

между которыми имеются горизонтальные щели для выхода дутья из дутьевой коробки в шахту газогенератора. Чаша вращается со скоростью одного оборота в час. Эксцентриситет служит для лучшего размалывания кусков шлака.

Решетка этого типа характеризуется равномерным распределением дутья по сечению газогенератора. Для лучшего регулирования дутья она имеет двойной подвод дутья — центральный и периферийный. Благодаря этому можно создавать бо́льший напор воздуха в центральной части решетки, так как в середине газогенератора слой топлива оказывает большее сопротивление проходу дутья, чем по краям шахты.

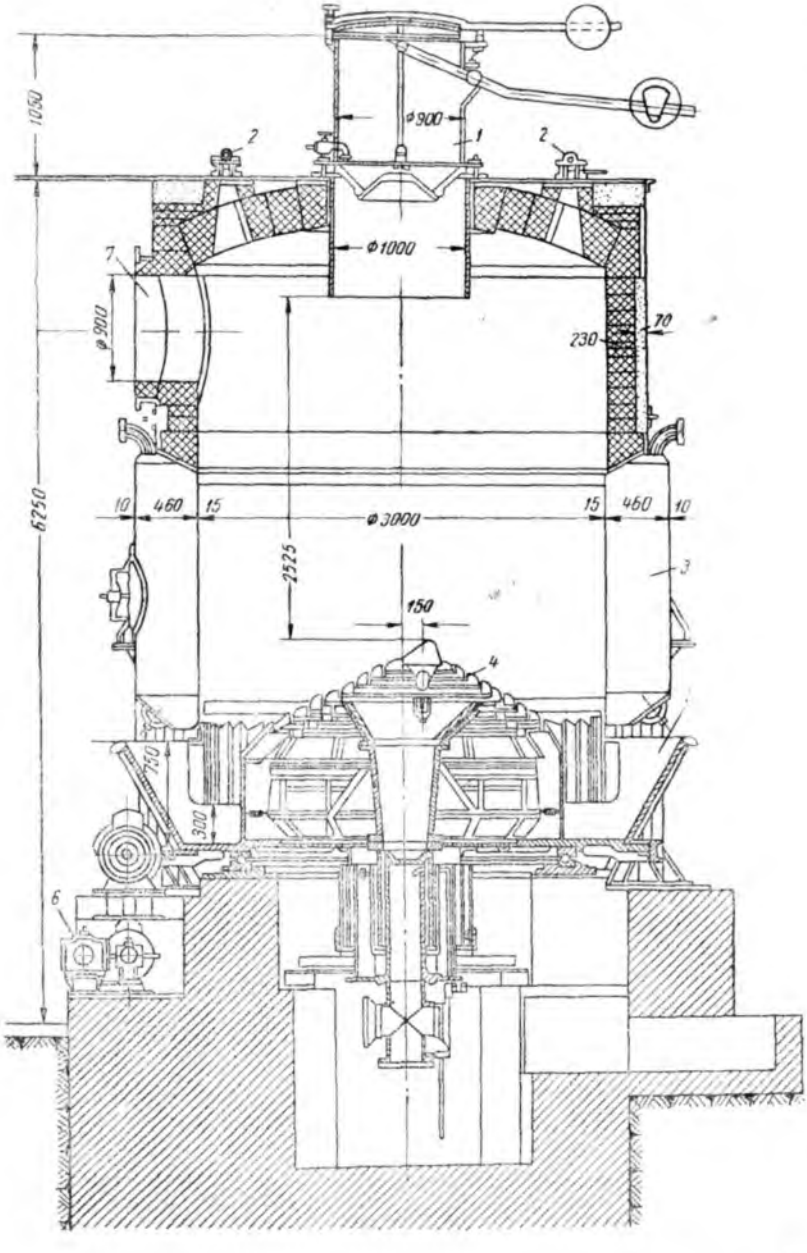


Рис. 53. Газогенератор с вращающейся колосниковой решеткой: *1* — загрузочная коробка; *2*—шуровочное отверстие; *3*—пароводяная рубашка; *4*—колосниковая решетка; *5*—чаша; *6*—привод; *7*—штуцер для отвода газа.

На рис. 54 представлен газогенератор со швельшахтой и с вращающейся колосниковой решеткой, имеющей только центральное дутье и так называемое фрезерное золоудаление. Верхняя часть газогенератора представляет собой так называемую швельшахту. В ней происходит подсушка топлива и сухая перегонка его при температурах до 500°. Этот процесс называется полукоксованием или швелеванием топлива. Газогенераторы со швельшахтой применяются для газификации древесины и торфа.

При швелевании образуется смола, которая улавливается затем в электрофильтрах или другим способом и является побочным продуктом газификации.

3. ЗАГРУЗОЧНЫЕ И ШУРОВОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА ГАЗОГЕНЕРАТОРОВ

Для загрузки топлива в газогенераторы применяют загрузочные коробки периодического действия и механические загрузчики непрерывного действия. Загрузочные коробки должны быть герметичны, чтобы газ не проникал в рабочее помещение.

Топливо загружается следующим образом: верхнюю крышку загрузочной коробки (рис. 56) отводят в сторону и топливо засыпают в коробку; затем закрывают верхнюю крышку, опускают с помощью противовеса нижний затвор, имеющий форму конуса, и топливо из коробки падает в газогенератор.

Автоматическая непрерывная загрузка топлива в газогенератор обеспечивает большую равномерность газогенераторного процесса. В этом ее преимущество перед ручной загрузкой.

На рис. 55 изображен механизированный газогенератор для газификации спекающихся каменных углей. Газогенератор имеет механический загрузчик топлива и мешалку для разрыхления верхнего слоя его.

Одной из основных операций при обслуживании газогенератора является шуровка топлива, которая производится с помощью металлических пик, опускаемых в газогенератор через шуровочные отверстия в крышке газогенератора.

Чтобы газ при шуровке не выбивался из газогенератора, в открытые шуровочные отверстия навстречу выходу газа выпускается струя пара, которая препятствует выходу газа в помещение.

4. ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ГАЗОГЕНЕРАТОРОВ

Производительность газогенераторов зависит от их конструкции, свойств газифицируемого топлива, режима газификации и обслуживания.

При технически грамотном обслуживании нормы производительности газогенераторов носят прогрессивный характер. Для сравнения производительности газогенераторов между собой при-

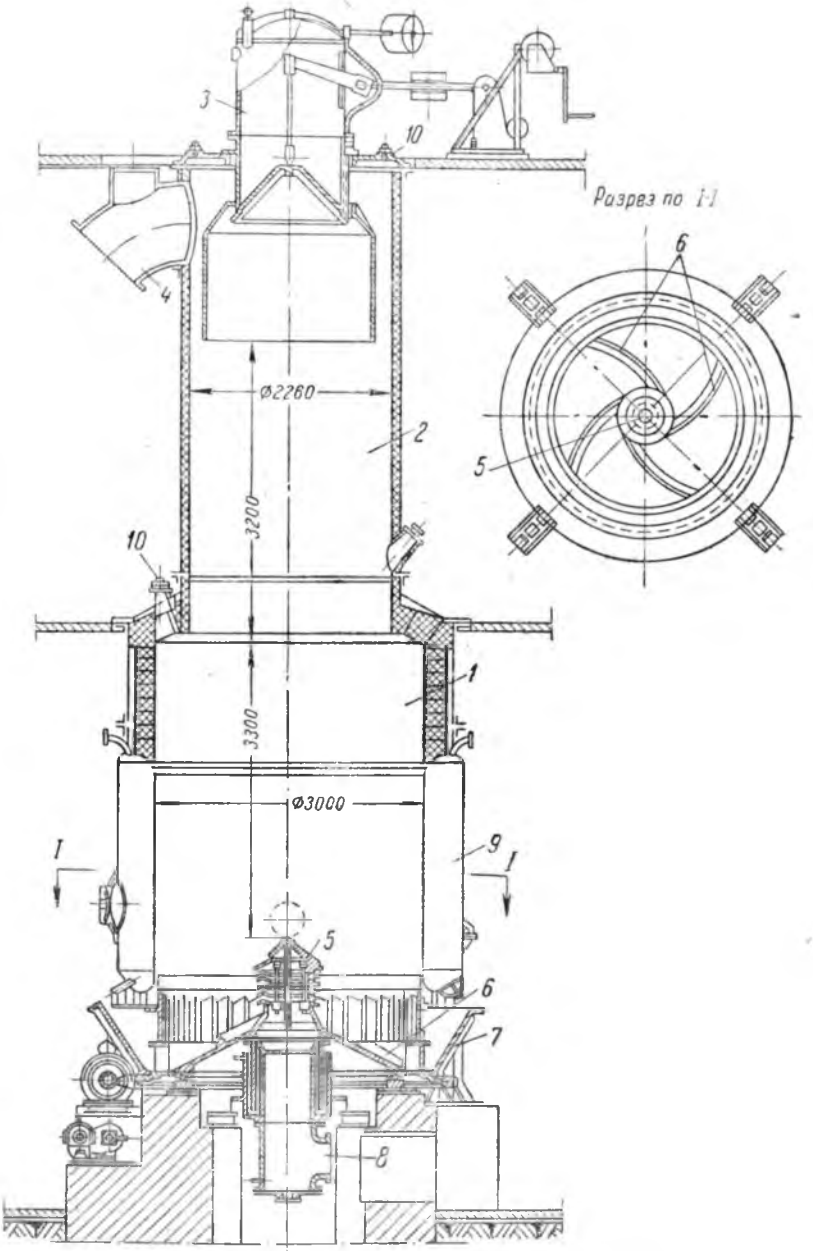


Рис. 54. Газогенератор со швельшахтой и фрезерной колосниковой решеткой: *1*—шахта газогенератора; *2*—швельшахта; *3*—загрузочная коробка; *4*—отвод газа; *5*—колосниковая решетка; *6*—фрезы чаши; *7*—чаша; *8*—воздухопровод; *9*—пароводяная рубашка; *10*—шуровочные отверстия.

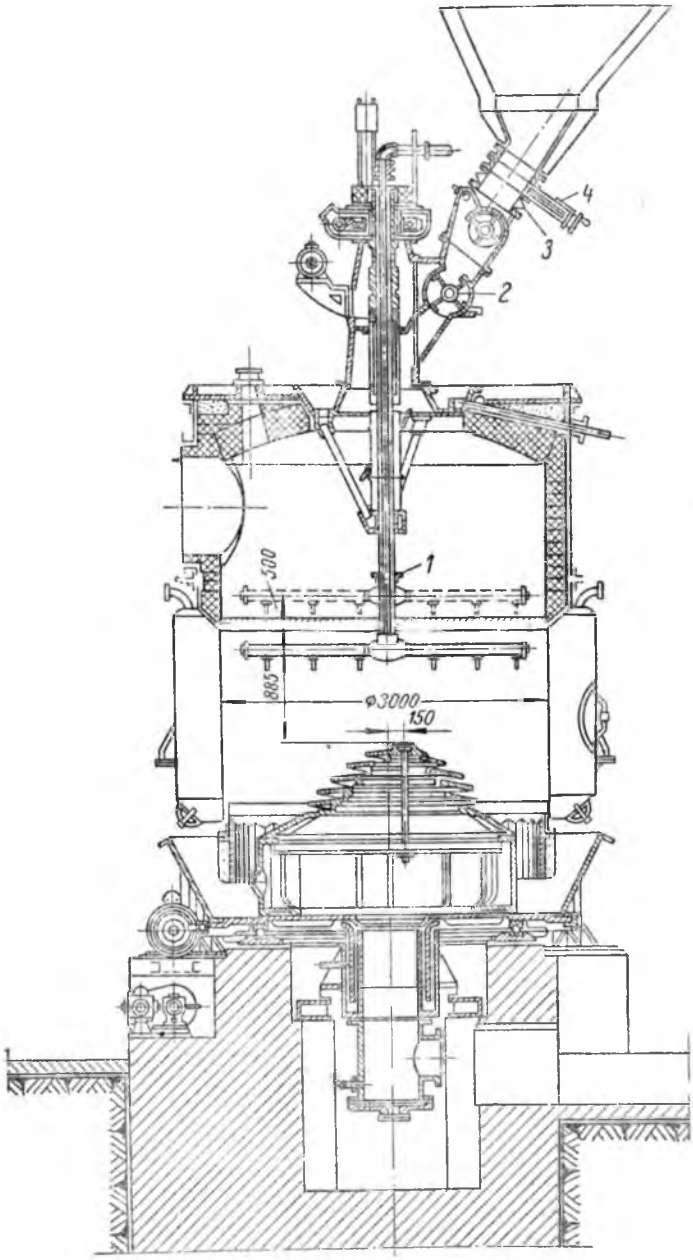


Рис. 55. Механизированный газогенератор с мешалкой: *1* — мешалка; *2*—загрузчик; *3*—компенсатор; *4*—шибер.

меняют понятие напряжения площади поперечного сечения шахты газогенератора, аналогичное понятию весового напряжения площади колосниковой решетки в топках.

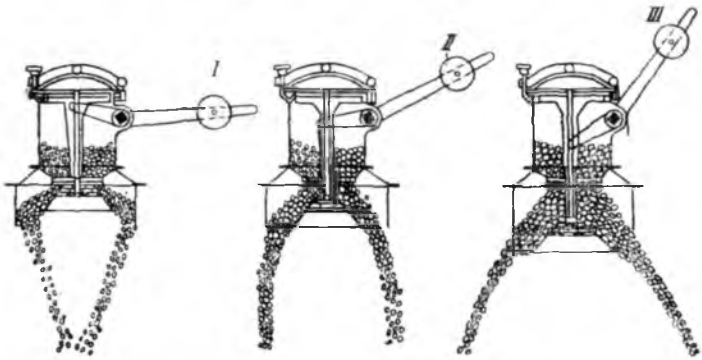


Рис. 56. Схема загрузки топлива в газогенератор при помощи ручной загрузочной коробки: *I, II, III*—последовательные положения конуса при загрузке.

Напряжение площади поперечного сечения шахты газогенератора представляет собой количество топлива в килограммах, газифицируемое на 1 $м^2$ площади сечения газогенератора в час.

В табл. 25 приведены напряжения площади поперечного сечения газогенераторов в *кг/м² час*, достигнутые при газификации различных видов топлива.

Одним из основных факторов увеличения производительности газогенераторов является повышение давления паровоздушного дутья. Для этого необходимо, чтобы гидравлические затворы газогенераторов имели достаточную высоту.

Следует помнить, что с повышением давления паровоздушного дутья обычно увеличивается унос мелкой топливной пыли из газогенераторов. В отдельных случаях это затрудняет возможность интенсификации газогенераторного процесса.

Глава III

ГАЗОГЕНЕРАТОРНЫЕ СТАНЦИИ

Газогенераторной станцией называется установка газогенераторов вместе с аппаратурой для очистки генераторного газа и другим вспомогательным оборудованием. Газогенераторы устанавливают непосредственно возле печей, отапливаемых генераторным газом, или же размещают в одном месте (на газогенераторной станции), откуда очищенный и охлажденный газ направляют в цехи к печам—потребителям газа.

Таблица 25

Напряжения площади поперечного сечения в газогенераторах в *кг/м² час*

Тип газогенератора	Древесина		Торф	Бурый уголь	Каменный уголь	Антрацит	Коксик
	дрова	щепа					
С естественной тягой, неподвижной решеткой и ручной шуровкой	100—150	—	50—75	50—100	35—70	—	—
С дутьем и неподвижной решеткой	150—300	300—400	100—200	75—150	60—120	60—120	60—120
С дутьем и вращающейся решеткой	—	400—700	200—600	200—500	100—200	150—250	150—250
С дутьем, вращающейся решеткой и автоматической шуровкой . .	—	—	—	—	250—450	—	—

В первом случае газ называют горячим, так как он непосредственно из газогенераторов с температурой до 500—600° поступает в печи; во втором случае газ называют холодным, так как он подвергается предварительному охлаждению до температуры 30—35°.

1. СХЕМА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Схема очистки генераторного газа зависит от вида и свойств газифицируемого топлива. При бессмольном топливе ограничиваются, обычно, только очисткой газа от пыли и влаги путем промывки его, а при смолистом топливе, кроме того, устанавливают электрофильтры. На рис. 57 приведена схема мокрой очистки генераторного газа, на которой показана последовательность включения аппаратов для охлаждения и очистки газа, получаемого в газогенераторе *1*.

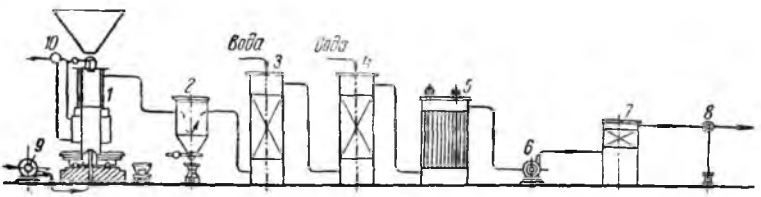


Рис. 57. Схема мокрой очистки генераторного газа.

Первая стадия очистки газа — выделение из него крупной пыли в пыльнике *2*. В скрубберах (газопромывателях) *3* и *4* газ охлаждается водой и содержащиеся в нем водяные пары конденсируются. Освобождение газа от смолы происходит в электрофильтре *5*.

Подача газа к горелкам печей производится вентилятором *6*.

Так как при прохождении через скрубберы газ увлекает капельки воды, которые при дальнейшем продвижении могут оседать в газопроводе, то после газового вентилятора устанавливается каплеуловитель *7*. Для поддержания постоянного давления газа при выходе его из газогенераторной станции применяют регулятор давления *8*.

Подача дутья в газогенератор производится вентилятором *9*.

Пар из пароводяной рубашки газогенератора собирается в паросборнике *10*.

На рис. 58 представлены план и разрезы газогенераторной станции для газификации каменного угля. Станция состоит из шести газогенераторов *1*, расположенных в один ряд: из них пять находятся в работе, а шестой — резервный. Над каждым газогенератором имеется бункер *2* для топлива. Топливо из бункеров загружается в газогенераторы механическими загруз-

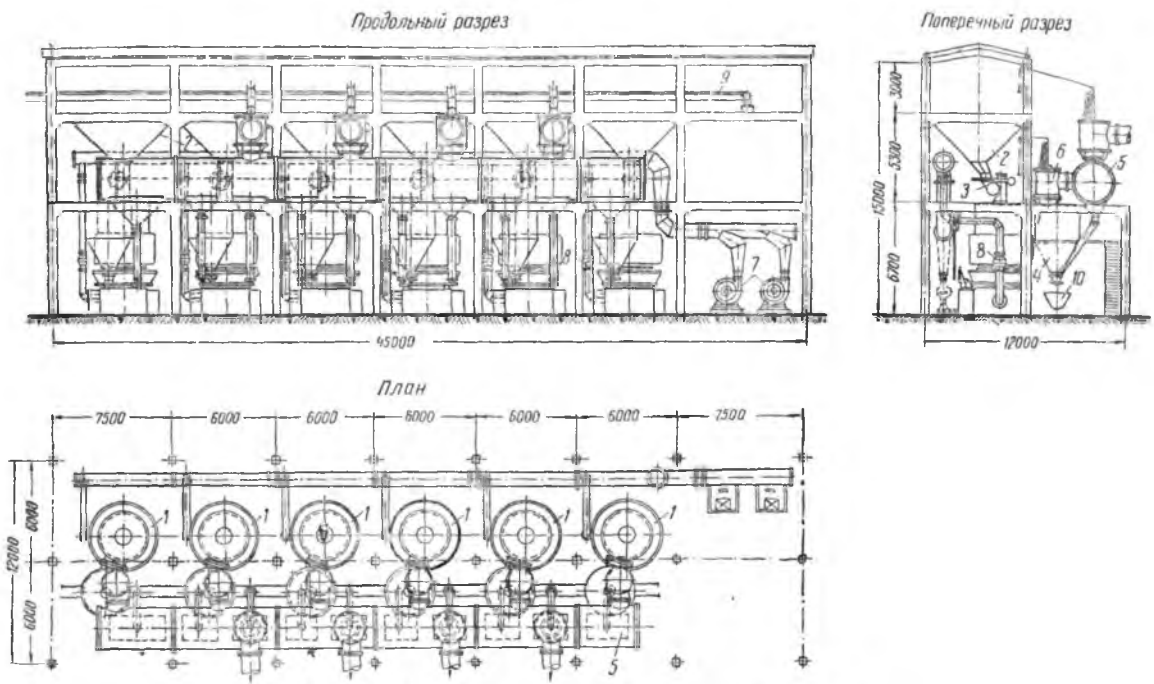


Рис. 58. План и разрезы газогенераторной станции.

чиками *3*. Выходящий из газогенератора газ, пройдя пылеуловитель *4*, поступает в газовый коллектор *5*, откуда направляется к печам для сжигания. Каждый газогенератор может быть отключен от коллектора при помощи тарельчатого затвора *6*. Подача воздуха в газогенераторы производится вентиляторами *7*, один из которых — рабочий, а другой — резервный. Для предотвращения взрывов в воздухопроводе предусмотрены обратные клапаны *8*. Подача топлива в бункеры производится ленточным транспортером *9*, а золоудаление — при помощи вагонеток *10*.

2. ОЧИСТКА ГЕНЕРАТОРНОГО ГАЗА ОТ ПЫЛИ, ВЛАГИ И СМОЛЫ

Первой стадией очистки выходящего из генератора газа является освобождение его от крупной пыли.

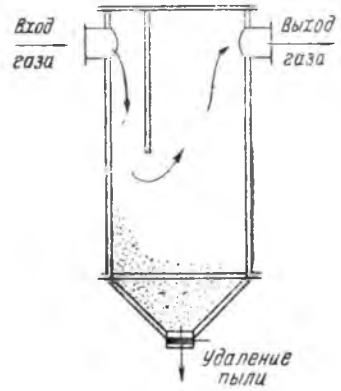


Рис. 59. Пылеуловитель (пыльник) для газа.

Простейшим устройством для очистки газа от пыли служит пыльник (рис. 59). Действие пыльника основано на уменьшении скорости и изменении направления газового потока. Благодаря этому пылинки, находящиеся в газе, под влиянием силы тяжести попадают в нижнюю коническую часть пыльника, откуда периодически, по мере накопления, удаляются в вагонетку.

Для выделения пыли из газа применяют еще так называемые стояки—вертикально поставленные цилиндры диаметром 1—2 *м* и высотой 3—6 *м*. При помощи особых форсунок в них вбрызгивается в виде мельчайших капелек вода, которая смачивает пылинки; вес их увеличивается и они выпадают из газа на дно стояка. Одновременно с выделением пыли в стояке происходит и предварительное охлаждение газа.

Для выделения крупной пыли применяют также циклоны, пылеотделительное действие которых основано на использовании центробежной силы.

Охлаждение газа для выделения из него влаги называется осушкой газа.

Осушка газа производится в газопромывателях — скруббера (рис. 60) — вертикальных металлических цилиндрах. Скрубберы работают обычно по принципу противотока. Газ входит в скруббер снизу, а выходит сверху. В верхнюю часть скруббера через форсунки подается холодная вода в мелкораспыленном состоянии; падая в виде дождя, вода встречает на своем пути газ и понижает путем теплообмена его температуру.

Для увеличения поверхности соприкосновения охлаждающей воды с газом, внутри скрубберов устраивается насадка. Чем больше поверхность насадки скрубберов, тем больше площадь соприкосновения охлаждающей воды и газа, тем интенсивнее теплообмен между газом и водой, тем лучше охлаждается газ.

Насадка скрубберов делается из керамических колец диаметром 25, 50 и 75 *мм* или крупных кусков кокса, вследствие большой пористости являющегося хорошим насадочным материалом, а также из деревянных реек (при холодном газе).

Проходя в промежутках между насадочными кольцами, кусками кокса или рейками, газ охлаждается, вследствие чего находящиеся в нем водяные пары конденсируются.

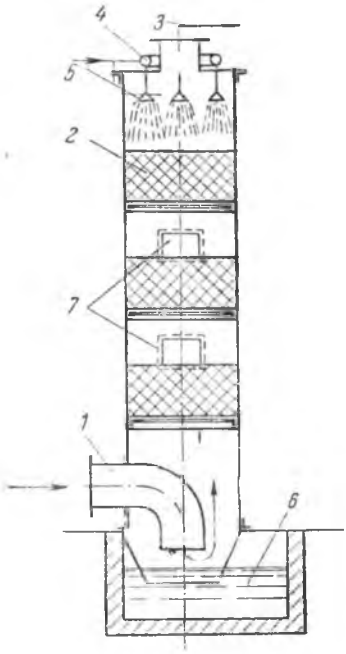


Рис. 60. Скруббер (газопромыватель): *1*—вход газа; *2*—насадка; *3*—выход газа; *4*—подача воды; *5*—форсунки для разбрызгивания воды; *6*—гидравлический затвор; *7*—лазы.

Генераторный газ очищается от смолы при помощи дезинтеграторных пылеуловителей или электрофильтров (рис. 61). В промышленности строительных материалов наиболее распространен электрический способ, сущность которого состоит в следующем: газ пропускается снизу вверх по вертикальным трубам, по оси которых располагаются проволоки—проводники электрического тока высокого напряжения (50 000—60 000 *в*); в трубах образуется электрическое поле, заряженное тем же знаком, что и проводник (обычно минусом); сами трубы, имеющие положительный заряд, заземляются и служат пассивным электродом. Попадающие в электрическое поле частички смолы и пыли заряжаются тем же знаком, что и проводники, и отбрасываются к противоположно заряженному электроду—к внутренней поверхности трубы. Освобожденный от смолы и пыли газ выходит из трубы вверх, а осевшая на внутренней поверхности труб смола стекает вниз.

Установка для электрической очистки газов от смолы состоит из трех основных частей:

1) камер электрофильтра для улавливания смолы из газа;

2) выпрямителя для превращения переменного тока в постоянный;

3) трансформатора для повышения напряжения тока до 50 000 — 60 000 *в*.

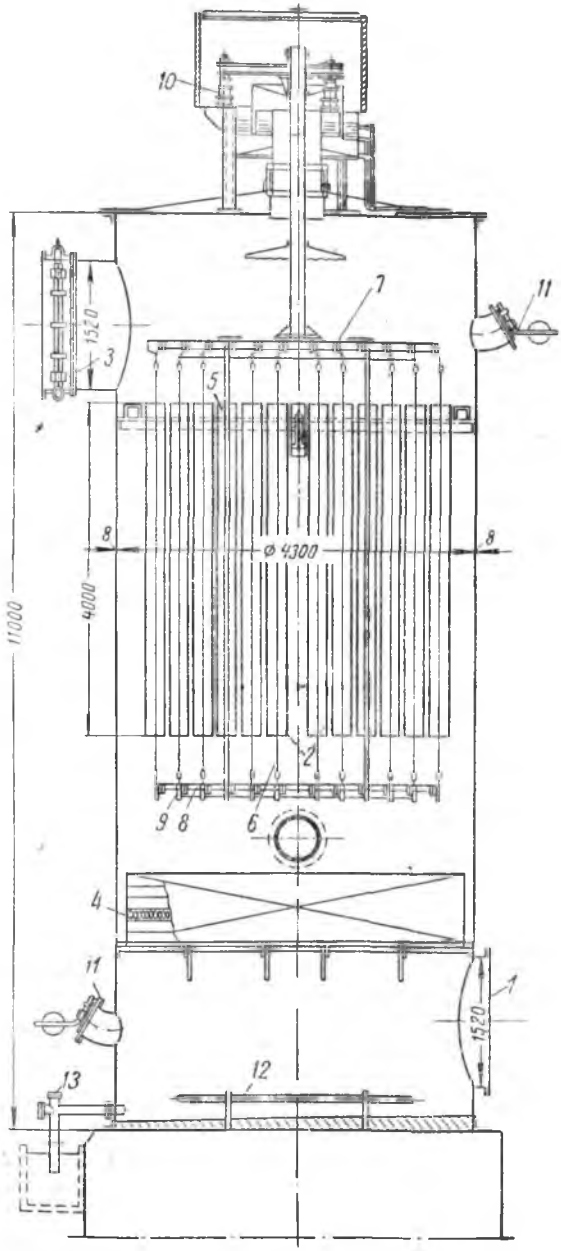


Рис. 61. Электрофильтр: *1*—вход газа; *2*—трубы; *3*—выход газа; *4*—распределительная насадка; *5*—перегородка; *6*—коронирующие электроды; *7*—верхняя рама; *8*—нижняя рама; *9*—грузы; *10*—изоляторы; *11*—предохранительные клапаны; *12*—паровой змеевик для подогрева смолы; *13*—труба для спуска смолы.

Электрическая очистка газов широко применяется в ряде производств строительных материалов (например, на цементных заводах для очистки воздуха от пыли при размоле угля и клинкера).

3. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ НА ГАЗОГЕНЕРАТОРНЫХ СТАНЦИЯХ

Генераторный газ обладает взрывчатыми и отравляющими свойствами.

Взрывчатые свойства генераторного газа обусловливаются присутствием в нем CO, H_2 и CH_4, которые в определенных соотношениях с кислородом воздуха образуют взрывчатые смеси.

Взрыв может произойти при определенной концентрации газа и воздуха и температуре газовоздушной смеси. В результате мгновенного сгорания газа, что и представляет собой взрыв, образуются большие объемы газообразных продуктов взрыва, которые производят разрушительные действия.

Взрывы чаще всего могут происходить:

а) при пуске и остановке газогенераторов;

б) при внезапном прекращении дутья в газогенераторы.

При пуске газогенераторов необходимо соблюдать следующее основное правило безопасности: включать газогенератор в газовую систему лишь тогда, когда давление газа в газогенераторе будет больше давления газа в газопроводе. При пуске вентиляторов сначала следует включать вентилятор, подающий воздух в газогенератор, а затем—газовый вентилятор.

При остановке газогенератора нельзя сразу прекращать подачу воздушного дутья, чтобы не вызвать разрежения в установке. Нужно постепенно уменьшить подачу дутья, отключить сборный газопровод, открыть клапан выходной трубы для газа—«свечи», выпустить газ в атмосферу и только после этого совсем прекратить дутье. При прекращении дутья газ может попасть в дутьевую камеру газогенератора и оттуда в воздухопровод. При включении воздушного вентилятора вновь, взрывчатая смесь газа и воздуха может попасть в газогенератор, и, соприкасаясь с раскаленным слоем топлива, вызвать взрыв.

Слабый взрыв может только выплеснуть воду из гидравлических затворов внизу газогенератора. Взрывы значительной силы могут разрушить газогенератор, воздухопровод и причинить другие повреждения.

Во избежание взрыва при внезапной остановке дутьевого вентилятора воздухопровод защищают обратным клапаном, который автоматически закрывается при прекращении подачи дутья и отключает воздухопровод от газогенератора.

На больших газогенераторных станциях обычно устанавливают два дутьевых вентилятора: рабочий и резервный. При остановке одного вентилятора другой автоматически включается в работу.

Основным условием безопасной работы газогенераторной станции является полная герметичность всей аппаратуры и газопроводов. Для предохранения от разрушения оборудования генераторных станций при взрывах служат предохранительные клапаны (рис. 62).

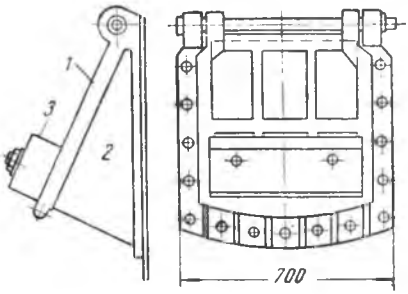


Рис. 62. Предохранительный клапан: *1*—крышка; *2*—седло; *3*—груз.

Взрыв может образоваться также при неправильном впуске генераторного газа в горелки печей.

Помимо взрывчатых свойств генераторный газ обладает также и отравляющими свойствами. При известных концентрациях генераторного газа в воздухе возникает опасность для здоровья обслуживающего персонала. Причина отравления—наличие в газе CO. Основные мероприятия в борьбе с отравлением на газогенераторных станциях—полная герметизация газогенераторов и всего оборудования, содержащего газ (скрубберы, газопроводы и т. д.), и вентиляция рабочих помещений.

Глава IV

РАСЧЕТЫ ГАЗОГЕНЕРАТОРНОГО ПРОЦЕССА

1 МАТЕРИАЛЬНЫЙ БАЛАНС ГАЗИФИКАЦИИ

Для получения генераторного газа в газогенератор загружают твердое топливо и вдувают пар и воздух. В результате газификации получаются: газ, смола, влага, пыль, зола и шлак, содержащий некоторое количество несгоревшего топлива.

Сопоставление количеств подаваемых в газогенератор материалов и веществ (топливо, воздух и пар) и получаемых продуктов газификации (газ, смола, шлак и др.) называется материальным балансом газификации.

Материальный баланс для действующего газогенератора может быть составлен на основании замеров расходуемых и получаемых материалов при теплотехническом балансовом испытании газогенератора.

Материальные балансы можно составлять не только суммарно для всех веществ, участвующих в процессе газификации, но и для отдельных химических элементов, например, для углерода, азота, водорода.

Пользуясь материальными балансами для отдельных элементов, можно подсчитывать различные величины, характеризующие газогенераторный процесс: выход сухого газа на 1 *кг* топлива — по балансу углерода; расход воздуха на газификацию — по балансу азота; влажность газа и выход влажного газа — по балансу водорода.

2. ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС ГАЗИФИКАЦИИ

Тепловой баланс газификации для действующего газогенератора составляется по результатам предварительного теплотехнического испытания его, а при проектировании — по данным о работе аналогичных газогенераторов.

В табл. 26 представлен тепловой баланс газификации 100 *кг* кускового торфа ($W^p = 35\%$).

Таблица 26

Тепловой баланс газогенератора

№ статьи	Статьи прихода тепла	*ккал*	%	№ статьи	Статьи расхода тепла	*ккал*	%
1	Химическое тепло торфа . .	336 000	97,2	1	Химическое тепло газа .	224 000	64,8
2	Теплосодержание пара дутья .	9 600	2,8	2	Физическое тепло сухого газа при 120°	5 400	1,6
				3	Физическое тепло влаги газа при 120°	32 700	9,5
				4	Химическое тепло смолы	54 000	15,5
				5	Теплота парообразования в пароводяной рубашке	9 500	2,8
				6	Потеря тепла во внешнюю среду (по разности) . .	20 000	5,8
	Итого . . .	345 600	100,0		Итого . . .	345 600	100,0

Примечание. Приход тепла с воздухом дутья за незначительностью не учтен.

На рис. 63 приведена диаграмма теплового баланса газогенератора.

При составлении баланса приняты:

1) расход пара при увлажнении воздушного дутья — 15% от веса торфа;

2) выход сухого газа — 1,4 *нм³/кг* при $Q_{газа}$ = 1600 *ккал/м³*;

3) влагосодержание газа — 300 *г/нм³* сухого газа;

4) выход генераторной смолы — 6% от веса торфа при $Q_{смолы}$ = 9000 *ккал/кг*;

5) съем пара в рубашке — 15 *кг* на 100 *кг* торфа при температуре питательной воды 15°.

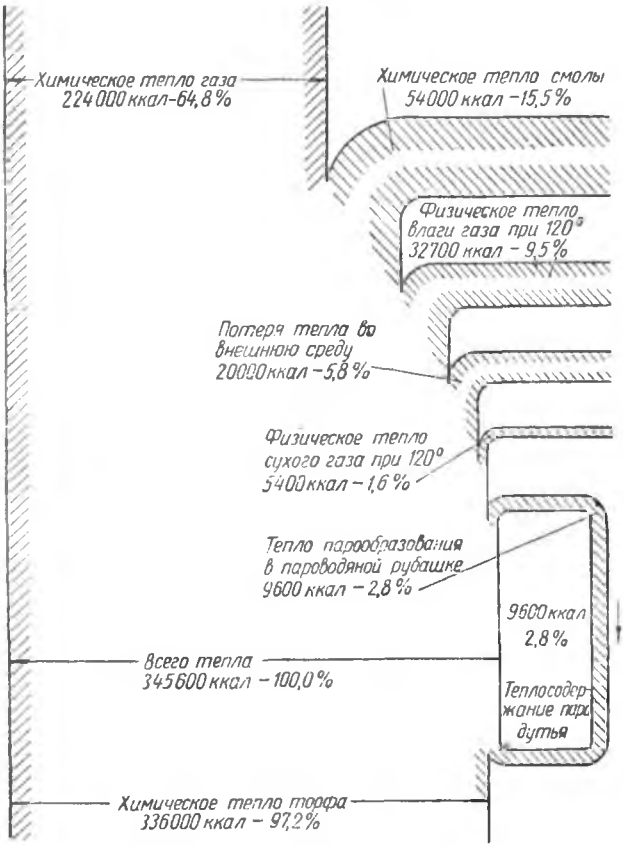


Рис. 63. Тепловой баланс газогенератора.

Из табл. 26 видно, что основное количество тепла поступает в газогенератор за счет теплотворности топлива (97,2%).

В зависимости от вида и свойств газифицируемого топлива относительное значение отдельных статей расходной части баланса колеблется в широких пределах.

По данным теплового баланса газогенератора можно определить коэффициент полезного действия газогенератора.

3. КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ГАЗОГЕНЕРАТОРА

К. п. д. газогенератора характеризует степень перевода тепла, заключенного в твердом топливе, в тепло, содержащееся в генераторном газе. Чем выше к. п. д., тем совершеннее процесс газификации, тем больше тепла, заключенного в твердом топливе, переходит в газ.

В теплотехнике различают химический и термический к. п. д. газогенератора.

Химическим к. п. д. называют отношение произведения теплотворности газа на выход газа к теплотворности твердого топлива.

Если обозначить через $Q_н^р$ теплотворность твердого топлива, через $Q_н^с$ — теплотворность сухого газа и через $V_{с.г}$ — выход сухого газа в $м^3$ из 1 *кг* топлива, то химический к. п. д. газогенератора равен:

$$\eta_x = \frac{Q_н^с \cdot V_{с.г}}{Q_н^р}.$$

Химический к. п. д. представляет, таким образом, отношение потенциального тепла газа к потенциальному теплу твердого топлива, зависящее только от химических составов их, чем и объясняется название к. п. д.

Термическим к. п. д. называется отношение всего полученного из 1 *кг* твердого топлива тепла в виде потенционального (химического) и физического тепла, заключенного в газе, смоле и пыли, к теплотворности твердого топлива и теплосодержанию паровоздушной смеси. Термический к. п. д. зависит в основном от температуры газа, вследствие чего является менее постоянной величиной, чем химический.

Химический к. п. д. иногда называют абсолютным, а термический — относительным к. п. д. газогенератора.

К. п. д. газогенератора, как уже указывалось, выявляется из теплового баланса.

Пример. Определить химический и термический к. п. д. газогенератора, тепловой баланс которого приведен в табл. 26.

Химический к. п. д. равен отношению статьи 1-й расхода к статье 1-й прихода, т. е.:

$$\eta_x = \frac{64,8}{97,2} = 0,67, \text{ или } 67\%.$$

Термический к. п. д. равен отношению суммы статей 1, 2 и 4 ко всему приходу тепла, т. е.

$$\eta_m = \frac{64,8 + 1,6 + 15,5}{100} = 0,82, \text{ или } 82\%.$$

4. РАСЧЕТЫ ОТДЕЛЬНЫХ ВЕЛИЧИН ПРОЦЕССА ГАЗИФИКАЦИИ

Определение выхода сухого генераторного газа из 1 *кг* топлива

По закону сохранения веса вещества количество углерода, содержащееся в 1 *кг* твердого топлива, должно быть равно содержанию углерода в газе, смоле, пыли и шлаках, получающихся при газификации этого топлива.

Обозначим:

$C_т$ —	содержание углерода	в 1 *кг* топлива;
$C_г$ —	То же	в газе, полученном из 1 *кг* топлива;
$C_{см}$ —	»	в смоле, полученной из 1 *кг* топлива;
$C_п$ —	»	в пыли, полученной из 1 *кг* топлива;
$C_ш$ —	»	в шлаках, полученных из 1 *кг* топлива.

Материальный баланс углерода, отнесенный к 1 *кг* топлива, выражается уравнением: $C_т = C_г + C_{см} + C_п + C_ш$.

Количество углерода, содержащееся в 1 $м^3$ различных углеродсодержащих составных частей газа, определяется следующим образом:

1 *кг мол* CO_2 и CH_4 занимает объем 22,4 $м^3$ и содержит 12 *кг* углерода. Следовательно, в 1 $м^3$ этих газов содержится углерода $\frac{12}{22,4} = 0,536$ *кг*.

Содержание углерода в 1 $м^3$ C_2H_4 будет в два раза больше, т. е. $2 \cdot 0,536$ *кг*.

Если обозначить через $V_{с.г}$ выход сухого генераторного газа в $м^3$ из 1 *кг* топлива, а через CO_2, CO, CH_4 и C_2H_4—содержание соответствующих горючих частей в газе, то получим:

$$C_г = (0,536\ CO_2 + 0,536\ CO + 0,536\ CH_4 + 2 \cdot 0,536\ C_2H_4) \cdot V_{с.г},$$

или, вынося 0,536 за скобку:

$$C_г = 0,536\,(CO_2 + CO + CH_4 + 2C_2H_4) \cdot V_{с.г}\,.$$

Подставляя это выражение в уравнение баланса углерода и решая его относительно $V_{с.г}$, получаем формулу:

$$\boxed{V_{с.г} = \frac{C_т - (C_{см} + C_п + C_ш)}{0,536\,(CO_2 + CO + CH_4 + 2C_2H_4)}\ м^3/кг.} \qquad (103)$$

Пример: Определить выход сухого газа при газификации донецкого антрацита марки АМ следующего состава:

$$C^р = 67,93\%,\ H^р = 1,84\%,\ O^р = 1,27\%,\ N^р = 0,72\%,$$
$$S^р = 2,73\%,\ W^р = 4,15\%,\ A^р = 21,36\%.$$

Состав полученного генераторного газа: $CO_2 = 7,2\%$, $CO = 23,4\%$, $CH_4 = 0,4\%$, $H_2 = 14,2\%$, $O_2 = 0,2\%$, $N_2 = 54,5\%$.

Потеря горючего в уносе (пыли) составляет 2,4% веса топлива.

Потеря горючего в шлаках—10% веса золы.

При газификации антрацита смола получается в незначительном количестве и в данном случае не учитывается.

Решение. Уравнение баланса углерода может быть отнесено также к 100 *кг* топлива. В таком случае все величины правой части формулы (103) должны относиться к 100, что не изменит результата определения $V_{с.г}$.

Принимая состав уноса (пыли) одинаковым с составом топлива, получаем $C_п$, отнесенное к 100 *кг* топлива:

$$C_п = \frac{67,93}{100} \cdot 2,4 = 1,68 \text{ кг};$$

допуская, что несгоревшая часть топлива в шлаках будет представлять чистый углерод, получаем $C_ш$:

$$C_ш = 0,1 \cdot 21,36 = 2,14 \text{ кг}.$$

Подставляя значения в формулу (103), имеем:

$$V_{с.г} = \frac{67,93 - (1,68 + 2,14)}{0,536\,(7,2 + 23,4 + 0,4)} = 3,85 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Определение расхода воздуха на газификацию

Определение расхода воздуха на газификацию производится по балансу азота. Обозначим:

$V_в$ — расход воздуха на газификацию 1 *кг* топлива в $м^3$;
$N_т$ — содержание азота в 1 *кг* топлива в *кг*;
$N_г$ — содержание азота в 1 $м^3$ газа в $м^3$;
$V_{с.г}$ — выход сухого газа из 1 *кг* топлива в $м^3$.

В генераторном газе, полученном из 1 *кг* топлива, содержится $N_г \cdot V_{с.г}$ $м^3$ азота. Такое количество азота поступает в газ из топлива и воздуха.

Так как в воздухе содержится по объему 79% азота, то из воздуха в газ перейдет 0,79 $V_в$ $м^3$ и из топлива $\frac{N_т}{1,25}$ $м^3$ азота, где 1,25 —объемный вес азота в $м^3/кг$.

Уравнение баланса азота в процессе газификации:

$$0,79\, V_в + \frac{N_т}{1,25} = N_г \cdot V_{с.г}.$$

Решая уравнение относительно $V_в$, получаем:

$$\boxed{V_в = \frac{N_г \cdot V_{с.г} - \frac{N_т}{1,25}}{0,79} \text{ м}^3/\text{кг}.} \qquad (104)$$

Пример. Определить расход воздуха для условий предыдущего примера.

Решение. Подставляя значения $N_г$, $V_{с.г}$ и N_m в формулу (104), получим:

$$V_в = \frac{0{,}545 \cdot 3{,}85 - \frac{0{,}0072}{1{,}25}}{0{,}79} = 2{,}66\ м^3/кг.$$

Расчет состава генераторного газа

Зная химические реакции, протекающие в газогенераторе, и задаваясь некоторыми практическими показателями процесса газификации, можно рассчитать состав генераторного газа, получаемого из твердого топлива, если состав топлива известен.

В настоящее время при расчетах состава генераторного газа по принятому составу топлива за основу обычно принимают метод проф. Н. Н. Доброхотова[1].

5. ВЫБОР ТОПЛИВА ДЛЯ ГАЗОГЕНЕРАТОРОВ

Выбор топлива для газогенераторов зависит часто от температуры, которую надо получить при сжигании генераторного газа.

В качестве примера ниже приводится расчет по выбору газогенераторного топлива для следующих условий:

а) необходимая температура в печах—1100°;

б) конструкция горелок печей допускает применение лишь холодного газа, т. е. осушенного и очищенного от смолы и пыли;

в) предварительный подогрев газа и воздуха исключается;

г) возможным газогенераторным топливом являются антрацит марки АМ и газовый уголь марки Г.

Первый вариант. Топливо—антрацит марки АМ.

1. По эксплуатационным данным газогенераторных станций газ, получаемый из антрацита, имеет примерно следующий состав:

$$CO_2 — 6{,}8\%;\ CO — 21{,}0\%;$$

$$CH_4 — 1{,}2\%;\ H_2 — 15{,}5\%;\ N — 55{,}5\%.$$

2. Теплотворность газа по формуле (7):

$$Q = \frac{3020 \cdot 21{,}0 + 2580 \cdot 15{,}5 + 8550 \cdot 1{,}2}{100} = 1140\ ккал/м^3.$$

---

[1] Подробное изложение метода расчета состава генераторного газа можно найти в специальных руководствах, например, в книге «Теплотехнические расчеты установок силикатной промышленности», под общей редакцией Д. Б. Гинзбурга и В. Н. Зимина, Промстройиздат, 1951.

3. Состав продуктов горения:

Единица измерения	CO_2	H_2O	$O_2 + N_2$	Итого
$м^3$	0,29	0,18	1,43	1,9
%	15,3	9,5	72,2	100,0

4. Теоретическая температура, которую можно достичь при горении данного газа, полученная расчетным путем, равна 1535°.

Необходимая же теоретическая температура горения в данном случае в печах должна быть $\frac{1100}{0,7} = 1570°$, где 0,7—пирометрический к. п. д. горения.

Следовательно, генераторный газ из антрацита не может обеспечить требуемой температуры горения в печах. Поэтому антрацит не может быть применен как топливо для газогенераторов.

Второй вариант. Топливо—газовый уголь марки Г.

1. По практическим данным, средний состав генераторного газа из газового угля таков: CO_2—12,2%; CO — 27,9%; CH_4 — 4,0%; H_2 — 8,2%; N_2 — 57,7%.

2. Теплотворность газа по формуле (7):

$$Q = \frac{3020 \cdot 27,9 + 2580 \cdot 8,2 + 8550 \cdot 4,0}{100} = 1410 \text{ ккал/м}^3.$$

3. Состав продуктов горения:

Единица измерения	CO_2	H_2O	$O_2 + N_2$	Итого
$м^3$	0,331	0,162	1,697	2,19
%	15,2	7,4	77,4	100,0

4. Теоретическая температура горения газа в данном случае по расчету равна 1680°.

Так как необходимая теоретическая температура горения в печи, как было определено выше, должна быть равна 1570°, то, очевидно, газовый уголь может быть применен в данном случае в качестве топлива для газогенераторов.

6. РАСЧЕТ КОЛИЧЕСТВА ГЕНЕРАТОРНОГО ГАЗА И ЧИСЛА ГАЗОГЕНЕРАТОРОВ ПО ЗАДАННОМУ РАСХОДУ ТОПЛИВА

Количество генераторного газа и необходимое для получения его число газогенераторов можно определить согласно нижеприведенному примеру расчета.

Пример. Определить количество газа и число газогенераторов для стекольного завода, исходя из следующих условий:

а) производительность завода по листовому стеклу—50 *т* в сутки;

б) удельный расход технологического топлива в переводе на условное топливо—0,9 *кг/кг*;

в) топливо—торф с влажностью $W^p = 35\%$.

г) калорийный эквивалент торфа при W^p — 0,43.

Определяем часовой расход натурального топлива—торфа по заданному удельному расходу условного топлива:

$$\frac{0{,}9 \cdot 50\,000}{0{,}43 \cdot 24} = 4350 \text{ кг}.$$

Далее определяем часовое количество генераторного газа, считая выход сухого газа из 1 *кг* торфа равным 1,5 $м^3$ (по табл. 23):

$$1{,}5 \cdot 4350 = 6525 \text{ нм}^3.$$

Принимаем для газификации торфа газогенераторы диаметром 3 *м* с вращающейся колосниковой решеткой и швельшахтой. Напряжения площади поперечного сечения шахты таких газогенераторов при газификации торфа составляет 400 $кг/м^2$ *час*.

Число рабочих газогенераторов при этих условиях равно:

$$\frac{4350}{400 \cdot 7{,}05} = 1{,}55,$$

где 7,05—площадь поперечного сечения шахты газогенератора диаметром 3 *м*.

Устанавливаем два рабочих газогенератора и один резервный.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОВТОРЕНИЯ К ШЕСТОМУ РАЗДЕЛУ

1. Какие физико-химические процессы происходят в газогенераторах?
2. Какие виды генераторного газа вам известны?
3. С какой целью добавляют водяной пар к воздушному дутью в газогенераторы?
4. От каких свойств топлива зависит высота слоя его в газогенераторах?
5. Как можно повысить теплотворность генераторного газа?
6. Назовите известные вам горючие составные части генераторного газа?
7. Какие типы газогенераторов вы знаете?
8. Для чего служат швельшахты в газогенераторах?
9. В чем преимущества вращающихся колосниковых решеток в газогенераторах по сравнению с неподвижными решетками?
10. Для чего служит пароводяная рубашка в газогенераторах?
11. Расскажите про известные вам способы очистки генераторного газа от пыли и смолы.
12. От каких условий зависит производительность газогенераторов?
13. Назовите меры предосторожности против отравления генераторным газом на газогенераторных станциях.
14. Что может явиться причиной взрывов на газогенераторных станциях?
15. Как определить выход генераторного газа, если известны состав газифицируемого топлива и состав газа?
16. Из каких главнейших статей состоит тепловой баланс газогенератора?
17. Что называется химическим и термическим коэффициентами полезного действия газогенератора?

РАЗДЕЛ СЕДЬМОЙ

СУШКА И СУШИЛКИ

Глава I

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СУШИЛЬНОГО ПРОЦЕССА

1. ВИДЫ СУШКИ И ОБЩАЯ СХЕМА СУШИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

В технике процесс удаления влаги из материала путем ее превращения в пар может осуществляться двумя путями: выпариванием и испарением. Как известно из физики, испарение представляет собой процесс парообразования, происходящий при температуре ниже точки кипения жидкости.

Сушка основана на удалении влаги из материала путем ее испарения.

В промышленности строительных материалов сушка, как вид тепловой обработки, имеет широкое распространение. В цементном производстве сушке подвергаются уголь и доменные шлаки. В стекольном производстве сушат песок; в производстве керамических изделий сушке подвергаются глина и сформованные изделия.

Тепло может подводиться к высушиваемому материалу всеми тремя способами передачи тепла: теплопроводностью—в контактных сушилках, излучением—в радиационных сушилках; конвекцией—в конвективных сушилках.

В промышленности строительных материалов наиболее распространены конвективные сушилки.

Горячий воздух или дымовые газы, применяемые при конвективной сушке, называют теплоносителем. Теплоноситель в виде воздуха или газа омывает материал, подлежащий сушке, и передает ему тепло. Под действием сообщенного тепла влага начинает испаряться с поверхности материала. Испарившаяся влага поглощается теплоносителем. Таким образом, теплоноситель служит как для передачи тепла, так и для поглощения испарившейся влаги.

Сушка может быть естественной и искусственной. При естественной сушке используется тепло наружного воздуха, без дополнительного его нагрева. При искусственной сушке необходимое тепло получается от сжигания топлива. Это тепло передается материалу дымовыми газами или горячим воздухом.

Схема сушильной установки, в которой теплоносителем служит воздух, изображена на рис. 64. Наружный воздух поступает в воздухоподогреватель (калорифер) *А*, где подогревается до требуемой температуры и подается в сушильную камеру *Б*.

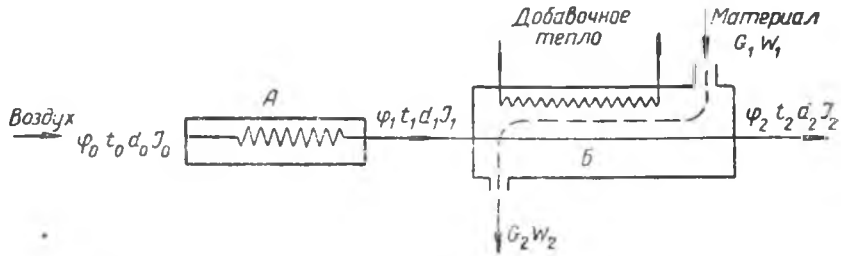


Рис. 64. Схема сушильной установки при сушке воздухом.

В сушилках с применением дымовых газов последние из топок или печей поступают в камеру смешения, где разбавляются наружным воздухом для понижения их температуры, и затем направляются в сушилку (рис. 65).

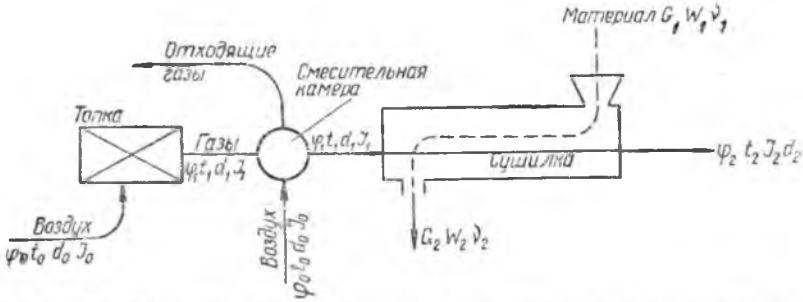


Рис. 65. Схема сушильной установки при сушке дымовыми газами.

В сушильной камере происходит сушка материала, т. е. испарение влаги и поглощение ее воздухом. Насыщенный влагой воздух отсасывается из камеры вентилятором, либо удаляется в трубу под действием естественной тяги. Вместо него поступают новые количества нагретого воздуха.

Таким образом, в большинстве случаев сушильная установка состоит из трех частей: 1) топки или калорифера; 2) сушильной камеры; 3) вентилятора или вытяжной трубы для отвода отработанных газов из сушилки.

В промышленности строительных материалов применяются разнообразные типы сушилок, отличающиеся между собой устройством сушильной камеры, видом теплоносителя, способом сушки и т. д.

Теория сушки делится на две части. Первая часть охватывает вопросы, рассматривающие физические свойства влажного воздуха, методы составления материальных и тепловых балансов сушильного процесса и основы расчета сушилок. Вторая часть рассматривает законы, которым подчиняется процесс испарения влаги из материала, а также устанавливает оптимальные (т. е. наиболее благоприятные) скорости и сроки сушки.

Советские ученые провели многочисленные работы по изучению сушки различных материалов. Особенно важное значение имеют работы лауреата Сталинской премии проф. А. В. Лыкова. Разработанная им теория дает возможность устанавливать оптимальный режим сушки различных материалов.

2. СВОЙСТВА ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА И ДЫМОВЫХ ГАЗОВ

Для сушки строительных материалов применяют атмосферный воздух и дымовые газы.

Атмосферный воздух всегда содержит некоторое количество водяного пара, равномерно распределенного в сухой части воздуха. Способность сухого воздуха поглощать водяной пар ограничена. Как известно из физики, содержание влаги в воздухе можно характеризовать абсолютной и относительной влажностью.

Абсолютной влажностью воздуха называют вес водяного пара, содержащегося в 1 $м^3$ воздуха, выраженный в килограммах. Максимальное количество водяного пара в 1 $м^3$ воздуха зависит от температуры. Воздух с максимальным количеством водяных паров называется насыщенным.

Если количество влаги в данном объеме воздуха превышает максимально возможное для данной температуры, то избыток влаги выделяется в виде водяных капель. Рядом исследований установлено, что для воздуха при температурах до 100° при состоянии насыщения вес содержащегося в нем водяного пара равен весу 1 $м^3$ нысыщенного водяного пара той же температуры. Иными словами, максимальный вес водяного пара, содержащегося в воздухе, равен удельному весу насыщенного пара при той же температуре.

Значение абсолютной влажности атмосферного воздуха при разных температурах дано в приложении VI.

Относительной влажностью или степенью насыщения воздуха φ называют отношение веса водяного пара, содержащегося в 1 $м^3$ воздуха при данной температуре $\gamma_п$, к весу водяного пара, который может содержаться в 1 $м^3$ воздуха при той же температуре и полном насыщении ($\gamma_н$):

$$\boxed{\varphi = \frac{\gamma_п}{\gamma_н} \cdot 100.} \qquad (105)$$

Относительная влажность выражается обычно в процентах.

Относительная влажность воздуха является одной из основных характеристик его как теплоносителя. Определение относительной влажности воздуха производится с помощью психрометра.

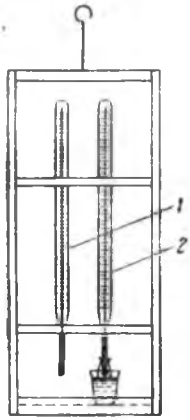


Рис. 66. Психрометр: *1*—сухой термометр; *2*—„мокрый" термометр.

Психрометр (рис. 66) состоит из двух одинаковых термометров, причем шарик одного из них окутан марлей, конец которой опущен в сосуд с водой. При полном насыщении воздуха оба термометра показывают одну и ту же температуру. При частичном же насыщении мокрый термометр вследствие испарения воды с марли показывает более низкую температуру, чем сухой, так как на испарение влаги затрачивается тепло, которое отнимается от тела термометра. Чем меньше влажность воздуха, тем больше разность показаний сухого и мокрого термометров.

По показаниям температуры сухого термометра t_c и разности температур сухого и мокрого термометров $\Delta t = t_c - t_м$ определяют значение относительной влажности по психрометрическим таблицам, приведенным в приложении V.

Величина относительной влажности находится на пересечении соответствующих значений t_c и Δt.

Пример. Определить относительную влажность воздуха, если $t_c = 25°$, а $t_м = 20°$.

Определяем $\Delta t = t_c - t_м = 25 - 20° = 5°$. В столбце таблицы, соответствующем $\Delta t = 5°$ на пересечении с $t = 25°$, находим относительную влажность $\varphi = 63\%$.

Определив относительную влажность φ по психрометрической таблице и зная показания сухого термометра, можно определить по таблице (приложение VI) и абсолютную влажность воздуха.

Пример. Определить абсолютную влажность воздуха, если $t_c = 35°$, а $\varphi = 50\%$.

В вертикальном столбце таблицы (приложение VI) находим температуру 35° и на пересечении этой строки со столбцом $\varphi = 50\%$ находим искомую абсолютную влажность воздуха $\gamma_п = 19{,}80$ *г/м*³.

Из физики известно, что общее давление смеси газов равно сумме парциальных давлений отдельных газов, каждое из которых равно тому давлению, которое имел бы данный газ, если бы он один занимал весь объем, заполненный смесью. Поэтому атмосферное давление, показываемое барометром, есть сумма парциальных давлений сухого воздуха и водяных паров, всегда содержащихся в воздухе:

$$\boxed{B = P_п + P_в,} \qquad (106)$$

где: B — барометрическое давление;

$P_п$ и $P_в$ — парциальные давления пара и воздуха, измеренные в одних и тех же единицах (*мм* рт. ст. или *кг/м²*).

Если считать водяной пар идеальным газом, что в пределах давлений, применяемых в сушилках, является достаточно точным, то можем применить к нему уравнение Клапейрона:

$$PV = RT.$$

Учитывая, что $V = \frac{1}{\gamma}$, получим:

$$\boxed{\frac{P_п}{\gamma_п} = R_п T,} \qquad (107)$$

$$\boxed{\frac{P_н}{\gamma_н} = R_п T,} \qquad (108)$$

где: $P_п$ и $P_н$ — парциальное давление водяного пара при данных условиях и в состоянии насыщения;

$R_п$ — газовая постоянная водяного пара;

T — абсолютная температура смеси, равная $273+t$.

Разделив выражение (106) на выражение (107), получим:

$$\frac{P_п}{P_н} = \frac{\gamma_п}{\gamma_н}.$$

Но так как

$$\frac{\gamma_п}{\gamma_н} = \varphi, \text{ то:}$$

$$\boxed{\varphi = \frac{\gamma_п}{\gamma_н} = \frac{P_п}{P_н},} \qquad (109)$$

т. е. относительную влажность воздуха можно выразить отношением парциального давления водяного пара во влажном воздухе и насыщенного водяного пара при той же температуре.

Абсолютная влажность воздуха также может быть выражена через парциальное давление находящегося в воздухе водяного пара.

Давление водяного пара $P_п$, содержащегося в воздухе, выражает собой абсолютную влажность воздуха при данной температуре и данной степени насыщения.

Точка росы. Если охлаждать ненасыщенный воздух, то при некоторой определенной температуре, зависящей от количества

влаги в воздухе, он станет насыщенным. Эта температура носит название точки росы. При дальнейшем охлаждении воздуха начнется конденсация влаги, т. е. водяные пары будут выделяться в виде отдельных капелек.

Давление насыщенного водяного пара при температуре точки росы равно давлению пара при данных температуре и степени насыщения. Точку росы для воздуха любой температуры можно определить при помощи таблицы (приложение VI).

Пример. Определить точку росы для воздуха при

$$t = 70^\circ \text{ и } \varphi = 20\%.$$

Из таблицы (приложение VI) находим, что для данных условий содержание водяного пара составляет $P = 39{,}59$ *г/м*³. Для определения точки росы находим в этой таблице (в графе $\varphi = 100\%$) наиболее близкое значение $P = 39{,}59$ *г/м*³, которое соответствует температуре 35°. Это и будет точка росы для данных условий.

Влагосодержание. Влажность воздуха в процессе сушки непрерывно увеличивается, но количество сухого воздуха в паровоздушной смеси остается постоянным. Поэтому о процессе сушки можно судить по тому, как изменилось количество водяного пара на 1 *кг* сухого воздуха. Количество водяного пара в граммах, содержащееся во влажном воздухе и отнесенное к 1 *кг* сухого воздуха, называется влагосодержанием воздуха и обозначается буквой d.

Если задан объем влажного воздуха V *м*³, в котором содержатся $G_в$ *кг* сухого воздуха и $G_п$ *кг* водяного пара, то

$$d = 1000 \frac{G_п}{G_в} \text{ г/кг}.$$

Значение d легко вычислить, зная парциальное давление водяного пара. Пусть парциальное давление водяного пара при температуре T и атмосферном давлении B в заданном объеме V влажного пара равно $P_п$, а сухого воздуха—$P_в$.

Согласно уравнению Клапейрона:

$$P_п V = G_п R_п T \text{ и } P_в V = G_в R_в T.$$

Разделив почленно эти уравнения, получим:

$$\frac{P_п}{P_в} = \frac{G_п R_п}{G_в R_в}, \text{ откуда } \frac{G_п}{G_в} = \frac{P_п R_в}{P_в R_п}.$$

Подставив значения газовых постоянных для воздуха $R_в = 29{,}27$ *кгм/кг град*, для пара $R_п = 47{,}1$ *кгм/кг град* и учитывая, что $P_п = B - P_в$, найдем:

$$\frac{G_п}{G_в} = 0{,}622 \frac{P_п}{B - P_п},$$

или, подставив в выражение для $d = 1000 \frac{G_п}{G_в}$, получим:

$$d = 622 \frac{P_п}{B - P_п}. \tag{110}$$

Теплосодержание влажного воздуха равно сумме теплосодержаний его составных частей, т. е. теплосодержанию сухого воздуха и водяного пара.

Теплосодержание паровоздушной смеси принято относить к 1 *кг* сухой части воздуха.

Теплосодержание сухого воздуха при температуре t составляет $I_в = Ct$ *ккал/кг*, где C—теплоемкость сухого воздуха, которую можно принять постоянной, не зависящей от температуры. $C_{св} = 0{,}24$ *ккал/кг град*.

Теплосодержание водяного пара составляет:

$$I_п = 595 + 0{,}47\,t \text{ ккал/кг},$$

где 595 — скрытая теплота испарения при 0°.

Теплосодержание паровоздушной смеси с влагосодержанием d равняется сумме тепла, заключенного в сухом воздухе и водяных парах:

$$I_{в.в.} = I_в + \frac{d}{1000} I_п = 0{,}24\,t + 0{,}001\,d\,(595 + 0{,}47\,t) \text{ ккал/кг}. \tag{111}$$

Теплосодержание влажного воздуха, следовательно, зависит от влагосодержания. Иными словами, теплосодержание влажного воздуха определяется температурой воздуха и его относительной влажностью.

Таким образом, состояние атмосферного воздуха можно характеризовать двумя его параметрами—d и I, которые зависят от одних и тех же величин — t и φ.

Значения теплосодержания I и влагосодержания d влажного воздуха для различных температур и степени насыщения можно определить либо по таблицам, либо графически с помощью I—d-диаграммы.

* *
*

В большинстве сушилок промышленности строительных материалов в качестве теплоносителя используют дымовые газы от сжигания топлива в топках или уходящие газы из печей. Для снижения температуры газов до требующейся по условиям сушки, их смешивают с наружным воздухом.

Влагосодержание дымовых газов. Дымовые газы, поступающие в сушилку, содержат водяные пары от сожженного топлива

и водяной пар от добавочного воздуха. Количество водяного пара, образующегося от сгорания топлива, подсчитывают по формуле:

$$G_п^р = \frac{9H^р + W^р}{100} \text{ кг/кг},$$

где: $\frac{9H^р}{100}$ — количество водяного пара, образовавшегося при сгорании водорода топлива;

$\frac{W^р}{100}$ — количество водяного пара, образовавшегося от испарения влаги топлива.

Вес водяного пара, поступающего с воздухом (для горения и понижения температуры газов), равняется:

$$G_в = \frac{\alpha L_0 d_0}{1000} \text{ кг/кг топлива},$$

где: α — коэффициент избытка воздуха;

L_0 — вес воздуха для горения и понижения температуры газов;

d_0 — влагосодержание этого воздуха в г/кг.

Полный вес водяных паров, поступающих в сушилку:

$$G_п = G_п^р + G_в \text{ кг/кг топлива}.$$

Влагосодержание дымовых газов при полном сгорании твердого и жидкого топлива получается от деления полного веса водяных паров на количество сухих газов, полученных при сжигании 1 кг топлива:

$$d = \frac{1000\, G_п}{G_{с.г}} = \frac{\left(\frac{9H^р + W^р}{100} + \frac{\alpha L_0 d_0}{1000}\right) 1000}{1 + \alpha L_0 - \frac{A^р + 9H^р + W^р}{100}} \text{ г/кг сухих газов.} \quad (112)$$

Теплосодержание дымовых газов. Зная состав дымовых газов, можно определить их теплоемкость как теплоемкость газовой смеси:

$$C_{с.г} = \frac{G_{CO_2} \cdot C_{CO_2} + G_{SO_2} \cdot C_{SO_2} + G_{O_2} \cdot C_{O_2} + G_{N_2} \cdot C_{N_2}}{G_{с.г}},$$

где: C_{CO_2}, C_{O_2} и т. д. — теплоемкость отдельных составляющих, определяемая по приложению II;

G_{CO_2}, G_{SO_2} и т. д. — вес составных частей дымовых газов.

Зная теплоемкость газов и количество их вычисляют теплосодержание при данной температуре.

Теплосодержание дымовых газов мало отличается от теплосодержания воздуха при одинаковой температуре и влагосодер-

жании. Поэтому при вычислениях теплоемкости и теплосодержания дымовых газов в пределах 100—800° можно с достаточной точностью пользоваться таблицами для воздуха. Это значительно упрощает расчеты.

3. *I—d*-ДИАГРАММА ДЛЯ ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА

Изменения состояния влажного воздуха, происходящие при сушке, можно представить графически при помощи *I — d*-диаграммы, предложенной впервые проф. Л. К. Рамзиным в 1918 г. Графический метод получил широкое применение при решении вопросов сушильной техники.

В качестве основных параметров в этой диаграмме приняты теплосодержание воздуха *I* и его влагосодержание *d*. Зависимость между параметрами влажного воздуха (d, φ, t, I) взята из таблиц, вычисленных на основании соотношений, приведенных выше.

Диаграммы (приложения IX и X) составлены для барометрического давления 745 *мм* рт. ст., что соответствует, примерно, среднему атмосферному давлению в центральных областях СССР. Практически диаграммой можно пользоваться с достаточной степенью точности во всех случаях расчета сушилок, так как при обычном изменении атмосферного давления значения *I* и *d* изменяются мало. С достаточной точностью *I—d*-диаграммой для влажного воздуха, можно пользоваться, применяя в сушилках дымовые газы и смеси их с воздухом.

Для лучшего взаимного расположения кривых *I—d*-диаграмма построена в косоугольной системе координат с углом между ними 135°.

Характеристика состояния влажного воздуха для различных случаев изображена на диаграмме в виде ряда линий. На рис. 67 показано взаимное расположение линий влагосодержания (вертикальные) и линий теплосодержания (наклонные). Все точки, обладающие одинаковым влагосодержанием, находятся на вертикалях, на концах которых по вспомогательной горизонтальной оси нанесены цифры, показывающие влагосодержание в граммах на 1 *кг*.

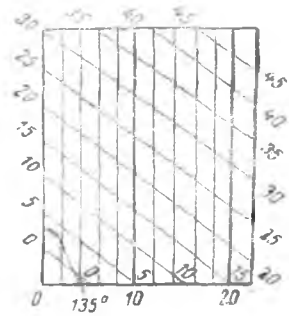


Рис. 67. Линии *I*=пост; *d*=пост.

Все точки с одинаковым теплосодержанием находятся на наклонных линиях, по обоим концам которых нанесены цифры, показывающие теплосодержание в калориях.

На рис. 68 показаны вторые два ряда линий, нанесенные на диаграмму. Прямые линии, на концах которых стоят градусы,—

изотермы, т. е. линии, соединяющие точки с одинаковой температурой. Пучок кривых представляет линии, соединяющие точки с одинаковой относительной влажностью или степенью насыщения. I—d-диаграмма ограничивается кривой $\varphi = 100\%$, точки которой характеризуют насыщенный воздух. Все точки, расположенные выше этой кривой, характеризуют ненасыщенный воздух.

При температурах выше 99,4° все линии φ = пост идут вертикально вверх. Это объясняется тем, что при этой температуре (температура кипения воды при давлении 745 *мм* рт. ст.) парциальное давление насыщенного пара равно атмосферному.

Согласно формуле (109)

$$\varphi = \frac{P_п}{P_н} = \frac{P_п}{745}$$

становится почти постоянной, зависящей только от парциального давления водяного пара для всех температур выше 99,4°.

Определенному парциальному давлению соответствует постоянное влагосодержание, что следует из формулы $d = 622\frac{P_п}{B - P_п}$. Поэтому кривая φ превращается в почти вертикальную прямую d = пост.

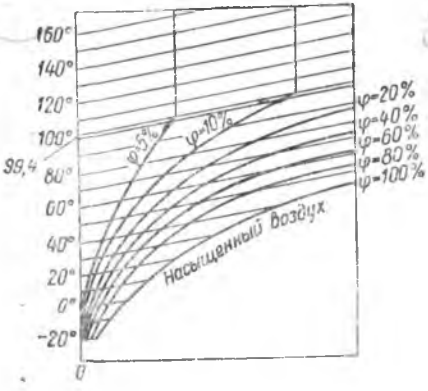


Рис. 68. Линии t = пост и φ = пост в I — d-диаграмме.

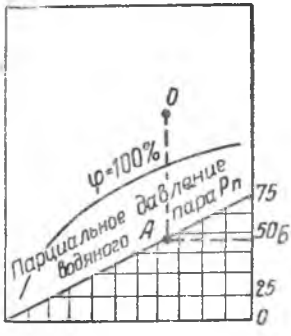


Рис. 69. Линия парциального давления $P_п$ в I — d-диаграмме.

В нижней части I—d-диаграммы нанесена самостоятельная подсобная диаграмма с линией парциального давления водяного пара $P_п$, которая выражена как функция влагосодержания (рис. 69) согласно уравнению (110).

Таким образом, на I—d-диаграмме нанесены все пять величин, характеризующих состояние влажного воздуха (I, d, φ, t $P_п$). Зная значения двух из них, можно найти значения остальных.

Пользование $I—d$-диаграммой поясним на следующих примерах (рис. 70).

Пример 1. Найти влагосодержание и теплосодержание воздуха при температуре 20° и относительной влажности $\varphi = 60\%$.

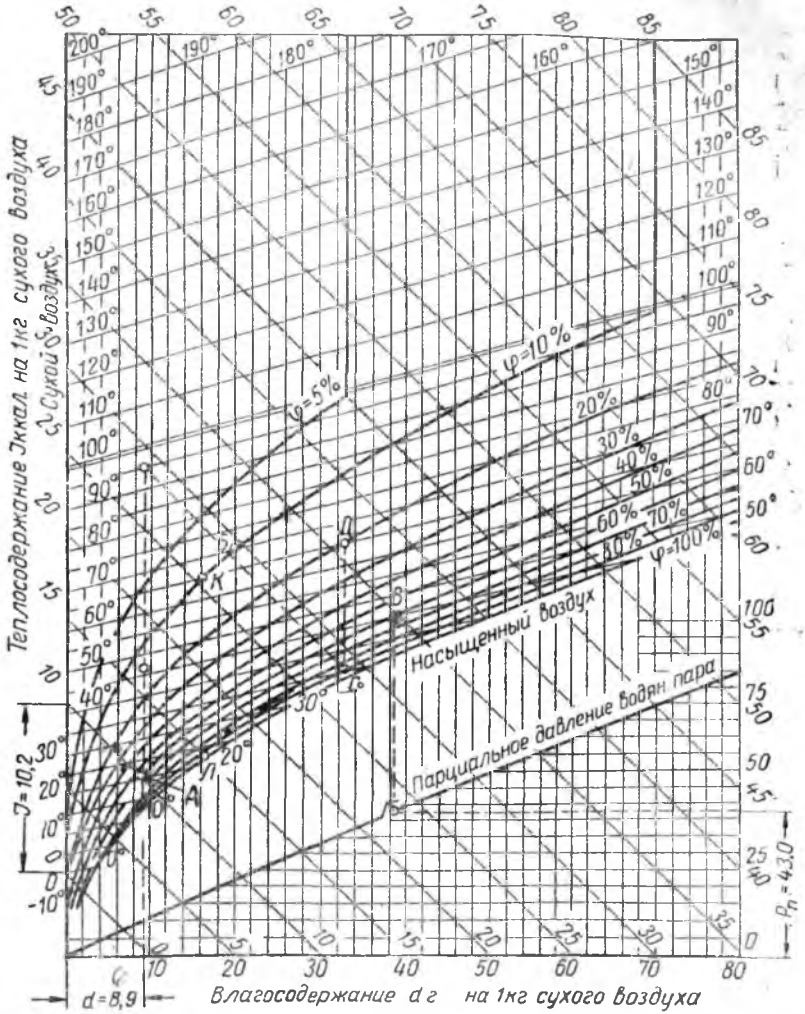


Рис. 70. I — d-диаграмма для влажного воздуха.

На изотерме 20° находим точку A пересечения ее с кривой $\varphi = 60\%$. Отсчет внизу по оси абсцисс дает точку со значением $d = 8{,}9$ *г/кг*. Отсчет по наклонной оси ординат дает $I = 10.2$ *ккал/кг*.

Пример 2. Найти относительную влажность воздуха при $t = 70°$, если влагосодержание его $d = 20$ *г/кг*.

На изотерме $t = 70°$ находим точку *Б* пересечения с перпендикуляром, восстановленным на оси абсцисс в точке $d=20$. Эта точка соответствует кривой относительной влажности 10%. Таким образом, относительная влажность воздуха равняется $\varphi = 10\%$.

Пример 3. Сравнить влагосодержание и теплосодержание воздуха при температуре 25° и $\varphi = 80\%$ с воздухом при температуре 75° и $\varphi = 10\%$.

Первую точку находим на пересечении изотермы $t = 25°$ и кривой $\varphi = 80\%$. Отсчетом на оси абсцисс определяем $d=16{,}3$; $I = 15{,}9$. Для второй точки, определяемой пересечением изотермы температуры $t=75°$ и $\varphi = 10\%$, находим на оси абсцисс соответственно точку $d=25{,}3$; $I=34$. Таким образом, влагосодержание воздуха во втором случае выше, чем в первом случае.

Пример 4. Определить парциальное давление водяного пара при температуре $t=45°$ и $\varphi = 60\%$.

Определяем положение точки *В*, соответствующей данным параметрам. Опустив перпендикуляр на ось абсцисс, получим точку *I* в пересечении перпендикуляра *ВГ* с линией парциальных давлений, которая определит искомую $P_п$. Значение $P_п$ находим на вертикальной шкале справа:

$$P_п = 43 \text{ мм рт. ст.}$$

Парциальное давление сухой части атмосферного воздуха при этих условиях составит $745 - 43 = 702$ *мм* рт. ст.

Пример 5. Определить влагосодержание воздуха при $t=35°$ и $\varphi=90\%$ и установить, как изменится относительная влажность, если подогреть воздух до 65°.

На пересечении изотермы $t = 35°$ и кривой $\varphi = 90\%$ находим точку *С* и, проведя линию $d =$ пост, находим на оси абсцисс значение $d = 33$ *г/кг*. Так как подогрев воздуха происходит без изменения влагосодержания, то для определения точки, соответствующей новому состоянию, продолжаем линию $d =$ пост до пересечения с изотермой $t=65°$ в точке *Д*. Через эту точку проходит линия $\varphi = 20\%$. Следовательно, относительная влажность воздуха равна 20%. С повышением температуры способность воздуха поглощать влагу сильно возрастает.

Выше было указано, что под точкой росы мы понимаем температуру, при которой пар, находящийся в воздухе, становится насыщенным. С помощью $I - d$-диаграммы можно легко определить точку росы. Для нахождения температуры насыщения достаточно из точки, характеризующей данное состояние воздуха, провести линию $d =$ пост (опустить перпендикуляр) до пересечения с кривой $\varphi = 100\%$. Изотерма, проходящая через точку пересечения, даст искомую температуру. Поясним это примером.

Пример 6. Найти точку росы водяного пара, содержащегося в воздухе при $t=65°$ и $\varphi=10\%$. Из точки K пересечения изотермы $t=65°$ и кривой $\varphi=10\%$ проводим линию $d=$ пост до пересечения в точке $Л$ с линией $\varphi=100\%$. Через эту точку проходит изотерма 21°. Следовательно, искомая температура точки росы равна 21°.

Приведенные примеры показывают простоту определения параметров воздуха для различных случаев по I—d-диаграмме и возможность замены таблиц I—d-диаграммой. Основное значение I—d-диаграммы заключается в чрезвычайном облегчении расчетов сушильного процесса.

4. I—d-ДИАГРАММА ДЛЯ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ

I—d-диаграммой, построенной для воздуха, можно с достаточной для технических целей точностью пользоваться и для дымовых газов. В этом случае удобнее пользоваться диаграммой, охватывающей область высоких температур.

Влагосодержание дымовых газов d_1 отличается от влагосодержания наружного воздуха d_0 количеством влаги, полученной от сгорания топлива, и определяется по формуле (112).

Для снижения температуры дымовых газов к ним добавляется наружный холодный воздух. Количество его зависит от требующейся температуры смеси и легко определяется графически с помощью I—d-диаграммы (приложение X).

На рис. 71 точка B соответствует характеристике дымовых газов с температурой t_1 и влагосодержанием d_1, а точка A — характеристике наружного воздуха с теплосодержанием I_0 и влагосодержанием d_0. Положение точки C, соответствующей характеристике смеси, лежащей на прямой AB, зависит от соотношения количества дымовых газов и воздуха. Обозначим через n количество воздуха (t_0, d_0), добавляемого на каждый килограмм дымовых газов (t_1, d_1), для получения смеси с температурой $t_{см}$ и влагосодержанием $d_{мс}$.

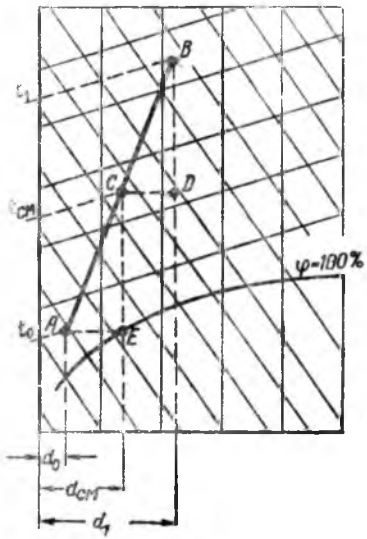


Рис. 71. Смешение воздуха и дымовых газов в I—d-диаграмме.

Влагосодержание смеси определится из соотношения:

$$(1+n)\,d_{см}=d_1+nd_0,$$

откуда

$$n = \frac{d_1 - d_{см}}{d_{см} - d_0},$$

но $d_1 - d_{см} = CD$, а $d_{см} - d_o = AE$ в масштабе диаграммы.

Следовательно

$$n = \frac{CD}{AE}.$$

Из подобия треугольников CBD и ACE следует:

$$\frac{CD}{AE} = \frac{BC}{AC},$$

откуда

$$n = \frac{BC}{AC}.$$

Для определения количества наружного воздуха, добавляемого к дымовым газам с целью получения требующейся температуры смеси, соединяем прямой точки диаграммы, выражающие состояние дымовых газов и наружного воздуха, и находим на ней точку пересечения с изотермой смеси. Отношение отрезков BC к AC в масштабе диаграммы дает количество добавляемого воздуха к газам.

5. ВИДЫ ВЛАГИ В МАТЕРИАЛЕ

Различают несколько видов связи влаги с материалом. Влага может быть связана с материалом химически в определенных количественных соотношениях. В процессе сушки такая влага обычно не удаляется.

Влага, удаляемая при сушке, делится на свободную и связанную с материалом силами сцепления и капиллярного притяжения.

Влажность материала, при которой давление водяного пара над поверхностью материала равно парциальному давлению водяного пара в окружающем воздухе называется равновесной влажностью. Она зависит от относительной влажности воздуха. Например, для часовярской огнеупорной глины равновесная влажность при относительной влажности воздуха 20% равняется 2,4% и доходит до 10% при относительной влажности воздуха 90%.

Гигроскопической влажностью материала называется влажность, при которой давление пара над поверхностью материала начинает уменьшаться по сравнению с давлением

пара над открытой поверхностью жидкости. Гигроскопическая влажность соответствует равновесной влажности при полном насыщении окружающего воздуха.

Гигроскопическая влага по силе связи с материалом занимает промежуточное место между связанной и свободной влагой. Связанная влага удерживается в материале силами сцепления и капиллярного притяжения более прочно, чем свободная.

Сушка материала может происходить только до равновесной влажности, соответствующей относительной влажности и температуре воздуха. Сушка начинается с удаления свободной влаги. Только после этого начинается удаление связанной влаги.

При сушке глины и глиняных изделий удаление части свободной влаги сопровождается усадкой. Удаление остальной свободной и связанной влаги происходит в дальнейшем без изменения размеров материала.

6. ОСНОВЫ ТЕОРИИ СУШКИ

Теория сушки изучает закономерности испарения влаги из материала при различных условиях, т. е. при изменениях температуры, скорости и влажности воздуха, а также физико-химические явления, происходящие в материале в процессе сушки.

Процесс сушки материала не является простым испарением влаги. Это—процесс сложный, включающий парообразование, переход пара с поверхности материала в окружающую среду и перемещение влаги внутри самого материала как в виде жидкости, так и в виде пара. Переход пара с поверхности материала в окружающую среду обычно называется внешней диффузией. Перемещение влаги внутри материала в виде жидкости или пара носит название внутренней диффузии. Оба процесса тесно связаны между собой. Взаимодействие внешней диффузии и внутренней диффузии и определяет общую картину процесса сушки.

Испарение влаги со свободной поверхности

Свободной поверхностью жидкости называется открытая поверхность ее, соприкасающаяся с газообразной средой (воздухом). При испарении влаги со свободной поверхности над ней образуется слой насыщенного пара, температура которого равна температуре жидкости.

Явление испарения влаги со свободной поверхности изучалось давно. Основной закон был установлен Дальтоном в 1803 г. и впоследствии подтвержден многочисленными исследователями, внесшими ряд уточнений. Закон Дальтона устанавливает, что количество влаги, испаряемое в единицу времени с единицы открытой поверхности, пропорционально разности парциальных

давлений насыщенного пара на поверхности материала и пара в окружающей среде.

$$W = \frac{C(P_н - P_п)\,760}{B}, \qquad (113)$$

где: W — количество влаги, испаряемое в 1 час с 1 $м^2$ открытой поверхности в *г*;

C — постоянный коэффициент, зависящий от скорости движения воздуха и его плотности в *г/м² час мм* рт. ст.

$P_н$ — давление водяного пара при температуре испаряющейся воды в *мм* рт. ст.;

$P_п$ — парциальное давление пара в окружающей среде, в *мм* рт. ст.;

B — барометрическое давление в *мм* рт. ст.

Значение коэффициента C определялось различными исследователями. По данным Всесоюзного теплотехнического института

$$C = 22{,}9 + 17{,}4v \text{ г/м}^2 \text{ час мм рт. ст.} \qquad (114)$$

где: v — скорость воздуха в *м/сек*.

При этом направление потока воздуха считается параллельным поверхности испарения. Для потока, перпендикулярного к поверхности, скорость испарения приблизительно вдвое больше. Основным фактором, влияющим на скорость испарения, является разность парциальных давлений.

Внутренняя диффузия влаги в материале

Условия движения влаги в материале в процессе внутренней диффузии очень сложны: они зависят от структуры высушиваемого материала, вязкости влаги, формы связи влаги с материалом, парообразного или жидкого состояния влаги.

В начале сушки поверхность материала сохраняет определенное время почти постоянную влажность, несмотря на значительное испарение. Это объясняется тем, что влага, испаряющаяся с поверхности, легко возмещается влагой изнутри. Как только начинается процесс сушки, испарение влаги с поверхности создает разность в содержании влаги (градиент влажности) между поверхностным слоем и следующими. Вследствие этого начинается перемещение влаги из внутренних слоев материала к поверхности.

Скорость и характер перемещения влаги зависят в значительной степени от вещества самого материала, его строения, характера связи влаги с материалом. В процессе сушки распределение влаги в материале неравномерное. На рис. 72 пока-

зано распределение влаги в кирпиче в процессе его сушки. Наибольшая влажность — в середине кирпича; она постепенно уменьшается по направлению к поверхности испарения.

Влага перемещается от мест с большей влажностью к местам с меньшей влажностью. Она может перемещаться как в виде жидкости, так и в виде пара. В обоих случаях скорость перемещения пропорциональна градиенту (перепаду) влажности, а само явление, по аналогии с теплопроводностью, называют влагопроводностью.

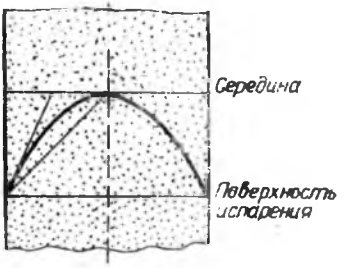


Рис. 72. Диаграмма распределения влаги в кирпиче (по проф. А. В. Лыкову).

Количество перемещаемой влаги в материале i, по расчетам проф. А. В. Лыкова, составляет:

$$i = -K\gamma_0 \nabla U,$$

где: ∇U* — градиент влажности материала;

γ_0 — удельный вес абсолютно сухого материала;

K — коэффициент влагопроводности;

Знак минус показывает, что движение влаги направлено в сторону уменьшения влажности.

Помимо влагопроводности, движение влаги, как экспериментально доказал А. В. Лыков, может происходить под влиянием разности температур по направлению потока тепла из мест с более высокой температурой к местам с более низкой.

Это явление называется термодиффузией (термовлагопроводностью). Количество перемещающейся влаги в этом случае равно:

$$i_t = -K\gamma_0 \delta \nabla t,$$

где: ∇t — температурный перепад;

δ — коэффициент термовлагопроводности.

При тепловой сушке воздухом движение влаги под действием градиента влажности направлено в сторону, противоположную движению влаги под действием температурного градиента. Это вызвано тем, что влажность в середине материала выше, чем на поверхности его. В то же время тепловой поток направлен от поверхности к середине материала. Поэтому термодиффузия тормозит перемещение влаги под действием влагопроводности. В обычных условиях сушки строительных материалов движение влаги происходит почти исключительно вследствие влагопроводности, а влияние термодиффузии незначительно.

---

* U обозначает влажность материала в данной точке в отличие от W — средней влажности по объему.

Кривые сушки

Процесс сушки может быть представлен графически в виде кривых изменения влажности материала во времени.

Скоростью сушки называется количество влаги, удаляемой в 1 час с 1 $м^2$ общей поверхности испарения материала. На рис. 73 изображена кривая сушки в координатах «влажность — время», а на рис. 74 — кривая сушки в координатах «влажность — скорость сушки».

Периоды сушки. Многочисленными исследованиями сушки ряда материалов установлено, что кривая скорости сушки различных материалов имеет свой определенный вид.

По данным А. В. Лыкова, процесс сушки протекает следующим образом. Вначале в течение очень короткого времени изме-

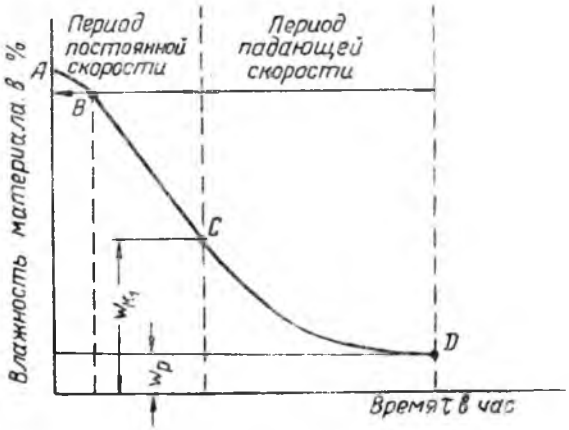


Рис. 73. Кривая сушки: «влажность — время».

нение влажности незначительно, материал подогревается, на что затрачивается почти все подводимое к нему тепло. Этому периоду соответствует участок *AB* (см. рис. 73). Скорость сушки при этом быстро возрастает до некоторой постоянной величины — точка *B* (см. рис. 73). В конце периода устанавливается постоянная температура поверхности и равновесие между количеством тепла, воспринимаемым материалом, и теплом, расходуемым на испарение влаги. Затем наступает период постоянной скорости сушки.

В этот период происходит испарение свободной влаги с открытой поверхности за счет поступления влаги из внутренних слоев материала. На рис. 73 этот период изображен прямой *BC*, а на рис. 74 — отрезком *BK*. Материал сохнет с постоянной скоростью при неизменной температуре поверхности. Давление

пара у поверхности материала не зависит от влажности и равно давлению пара над открытой поверхностью воды.

Когда влажность на поверхности материала станет ниже определенного предела, чему соответствует критическая точка *K*, скорость сушки начинает уменьшаться и при достижении равновесной влажности становится равной нулю. Этот период называется периодом падающей скорости. На рис. 73 он изображен кривой *CD*, а на рис. 74—кривой *KL*.

Кривая скорости сушки в период падающей скорости для различных материалов имеет неодинаковый вид. Это объясняется различным характером связи влаги с материалом, строением материала и связанным с этим перемещением влаги внутри материала. Имеет значение также и скорость внешней диффузии влаги—с поверхности в окружающую среду.

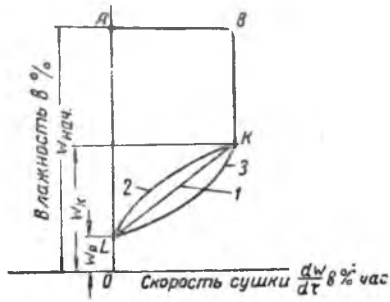


Рис 74. Кривая сушки: «влажность — скорость».

На рис. 74 показано несколько кривых скорости сушки для различных материалов (по исследованиям А. В. Лыкова):

кривая *1* (прямолинейная)—получается при сушке крупнопористых материалов;

кривая *2* (с выпуклостью, обращенной к оси влажности) — получается при сушке пористых капиллярных тел (глиняные изделия);

кривая *3* (с выпуклостью, обращенной к оси скорости сушки) получается при сушке коллоидных тел, содержащих адсорбционную и осмотически связанную влагу.

Процесс сушки значительно осложняется тем, что поверхность испарения не остается постоянной. Во многих случаях материал при сушке растрескивается, появляются новые поверхности испарения, в связи с чем и весь процесс испарения может сильно отличаться от описанного выше. Как было сказано, движение влаги внутри материала происходит главным образом за счет градиента влажности. Чем выше градиент влажности, тем интенсивнее происходит движение влаги.

В тех случаях, когда большой градиент (перепад) влажности может ухудшить качество материала, режим сушки должен состоять в том, чтобы задержать внешнее испарение и усилить движение влаги из внутренней части материала к его поверхности.

Основной задачей теории сушки является подбор оптимальных условий для сушки материала, т. е. выбор оптимальных температуры, скорости и относительной влажности воздуха. Совокупность этих условий и носит название режима сушки.

Сложность процесса сушки не дает возможности изучать его в промышленных условиях, и требует изучения на специальных опытных установках; полученные на опытной установке результаты приходится проверять на промышленной, а затем — использовать при конструировании сушилок.

Усадка изделий при сушке

Многие изделия в процессе сушки уменьшают свои размеры. Это явление называется усушкой или воздушной усадкой. Усадка глины происходит только в периоде постоянной скорости сушки, т. е. при удалении влаги до критической влажности.

Другие материалы (уголь, дерево) дают усадку только в периоде падающей скорости.

Между усадкой и влажностью при сушке глиняных изделий установлена следующая зависимость:

$$l = l_0 (1 + \alpha W),$$

где: l_0 — линейный размер тела при влажности W;
l_0 — размер абсолютно сухого тела;
α — коэффициент линейной усадки, показывающий относительное уменьшение размеров тела при удалении из него 1% влаги (для глины он равен приблизительно 0,005—0,007).

При равномерной сушке изделия будут сохранять свою форму, так как усадка одинакова по всем направлениям.

Неравномерность распределения влаги в изделии и неравномерность сушки вызывают неодинаковую усадку в различных направлениях и, как следствие, коробление, нарушение формы, а при большой разности возникающих усилий — разрывы и трещины изделий.

Определение оптимального режима сушки

Оптимальным режимом сушки являются условия сушки, при которых в короткий срок и при наименьшей затрате тепла получаются материалы и изделия необходимого качества. Причиной появления трещин является неравномерное распределение влажности внутри высушиваемых изделий. Для примера определим оптимальный режим сушки кирпича. Для этого необходимо найти зависимость поверхностного градиента влажности ∇U_n от параметров сушки: температуры t, относительной влажности воздуха φ и скорости V и определить критический градиент влажности, при котором в изделии образуются трещины.

По А. В. Лыкову критический градиент влажности:

$$\nabla U_n = \frac{(1+\alpha U_н) P_c}{\alpha E_c A},$$

где: $U_н$—начальная влажность сырца в %;

α — коэффициент линейной усадки в %;

P_c— предельное напряжение деформации сдвига в *кг/см²*;

E_c— модуль деформации сдвига в *кг/см²*;

A—постоянная величина, зависящая от соотношения геометрических размеров кирпича. Для нормального стандартного кирпича $A = \frac{l}{1.27}$, где l — наибольшая длина кирпича.

Поверхностный градиент влажности определяется экспериментальным путем по разности влажности кирпича в середине и на поверхности его:

$$\nabla U_п = \frac{2}{R}(U_ц - U_п),$$

где: $U_ц$ и $U_п$ — влажность в центре и на поверхности;

R—0,5 толщины кирпича в *см*.

Между поверхностным градиентом влажности $\nabla U_п$, интенсивностью сушки m и коэффициентом влагопроводности K существует простая зависимость:

$$\nabla U_п = \frac{100 \cdot m}{K \cdot \gamma},$$

где: m — интенсивность сушки в *кг/м²* час;

K— коэффициент влагопроводности в *м²/час*;

γ_0— удельный вес абсолютно сухого кирпича в *кг/м³*.

Для определения интенсивности сушки надо знать K—коэффициент влагопроводности, который изменяется в зависимости от параметров сушки.

При увеличении скорости движения воздуха v коэффициент влагопроводности остается постоянным, а интенсивность сушки повышается. Следовательно, чем больше скорость воздуха, тем больше отношение $\frac{m}{K \cdot \gamma_0}$, т. е. увеличивается поверхностный градиент, а это нежелательно.

С увеличением влажности воздуха φ интенсивность сушки снижается, а коэффициент влагопроводности K увеличивается, так как он увеличивается с повышением температуры материала. Поэтому с увеличением относительной влажности воздуха φ отношение $\frac{m}{K \cdot \gamma_0}$, т. е. поверхностный градиент $\nabla U_п$, резко уменьшается.

Следовательно, повышение φ благоприятно влияет на сушку и способствует уменьшению возможности появления трещин.

Увеличение температуры воздуха t повышает интенсивность сушки. Однако при этом увеличивается значение коэффициента влагопроводности K, сначала медленно, а затем очень быстро. Поэтому и поверхностный градиент $\nabla U_п$ сначала растет, дости-

гая максимума, а затем уменьшается. Таким образом, можно получить небольшие градиенты и при высоких температурах.

Для улучшения условий сушки надо увеличить влагопроводность материала, прогревая его путем пароувлажнения массы.

Глава II

РАСЧЕТ СУШИЛЬНОГО ПРОЦЕССА

1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА УДАЛЯЕМОЙ ВЛАГИ

Производительность сушильной установки определяется количеством влаги, удаляемой в определенный промежуток времени (час) из материала, подлежащего сушке. В общем случае количество абсолютно сухого вещества остается без изменения.

Примем следующие обозначения:

G_1 — вес сырого материала, поступающего в сушилку, в *кг* в час;

G_2 — вес высушенного материала после выхода из сушилки в *кг* в час;

G_c — вес абсолютно сухого вещества материала в *кг* в час;

W — количество испаренной влаги в *кг* в час;

w_1 — влажность материала до поступления в сушилку в %;

w_2 — влажность материала после выхода из сушилки в %.

W равняется разности весов материала до и после сушки:

$$\boxed{W = G_1 - G_2 \text{ кг/час.}} \tag{115}$$

В большинстве случаев задаются только начальный вес материала G_1 и начальная и остаточная влажность в процентах w_1 и w_2.

Выведем выражение для W в этом случае, пользуясь тем, что вес абсолютно сухого вещества материала при сушке не изменяется:

$$\boxed{G_c = \frac{G_1(100 - w_1)}{100} = \frac{G_2(100 - w_2)}{100},} \tag{116}$$

откуда

$$\boxed{\frac{G_1}{G_2} = \frac{100 - w_2}{100 - w_1}.} \tag{117}$$

Составив из этой пропорции производную, получим:

$$\boxed{\frac{G_1 - G_2}{G_1} = \frac{100 - w_2 - 100 + w_1}{100 - w_2} = \frac{w_1 - w_2}{100 - w_2},} \qquad (118)$$

откуда

$$\boxed{G_1 - G_2 = W = G_1 \frac{w_1 - w_2}{100 - w_2}.} \qquad (119)$$

Аналогично:

$$\boxed{W = G_2 \frac{w_1 - w_2}{100 - w_1}.} \qquad (120)$$

Выражением (120) можно пользоваться, если известен не начальный, а конечный вес материала.

В разобранных случаях содержание влаги в процентах выражено через вес влажного материала. Эта влажность носит название относительной влажности материала (w_0). Часто в технике применяется также понятие абсолютной влажности материала, под которой понимают количество влаги в процентах от абсолютно сухого вещества (w_a).

Во избежание ошибок, необходимо всегда уточнять, о какой влажности идет речь и уметь переходить от одной к другой.

Согласно определению, можно написать:

$$w_0 = \frac{W}{G_1}\ 100\% \quad \text{и} \quad w_a = \frac{W}{G_2}\ 100\%.$$

Делим эти равенства одно на другое, получаем:

$$\boxed{\frac{w_0}{w_a} = \frac{G_2}{G_1} = \frac{1}{\frac{G_1}{G_2}}.} \qquad (121)$$

Подставляя вместо $G_1 = G_2 + W$, получим:

$$\frac{w_0}{w_a} = \frac{1}{\frac{G_2 + W}{G_2}} = \frac{1}{1 + \frac{W}{G_2}}.$$

Для замены $\frac{W}{G_2}$ умножим числитель и знаменатель правой части равенства на 100:

$$\frac{w_0}{w_a} = \frac{100}{100 + \frac{W}{G_2} \cdot 100} = \frac{100}{100 + w_a},$$

откуда

$$\boxed{w_0 = \frac{100\,w_a}{100 + w_a} \text{ и } w_a = \frac{100\,w_0}{100 - w_0}.} \qquad (122)$$

Пример 1. Влажный кирпич весом 4 *кг* имеет начальное содержание влаги $w_1 = 20\%$. После сушки в течение 24 часов остаточная относительная влажность $w_2 = 4\%$. Определить среднее количество удаляемой в 1 час влаги.

Пользуясь уравнением (119), получим:

$$W = \frac{1}{24}\,G\,\frac{w_1 - w_2}{100 - w_2} = \frac{1}{24}\,4\,\frac{20 - 4}{100 - 4} = 0{,}277 \text{ кг/час.}$$

Пример 2. Чему равна абсолютная влажность гипсовой плиты, если относительная влажность ее равна 20%?

По формуле (122):

$$w_a = \frac{100 \cdot w_0}{100 - w_0} = \frac{100 \cdot 20}{100 - 20} = 25\%.$$

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС В СУШИЛКЕ

Аналитический метод

Расход воздуха. Разберем процесс сушки горячим воздухом. Считаем, что все количество воздуха и тепла, внесенное в сушилку, расходуется только на испарение влаги без потерь в окружающую среду, на нагрев материала или элементов сушилки. Температуру материала примем равной 0°. Такую сушилку будем называть теоретической.

Введем следующие индексы для величин, характеризующих сушильный процесс в зависимости от расположения точек отсчета:

0 — для наружного воздуха;
1 — при входе в сушилку;
2 — при выходе из сушилки.

Согласно схеме сушилки (см. рис. 64), процесс сушки протекает в следующем порядке. Атмосферный воздух с начальной температурой t_0 и влажностью φ_0 направляется в калорифер, где температура его повышается до t_1, а теплосодержание — до I_1. Весовое количество влаги d_0, содержащейся в воздухе на 1 *кг* сухой части (можно найти по I—d-диаграмме), остается без изменения во время нагрева, т. е. $d_1 = d_0$. Так как способность воздуха к поглощению тепла резко возрастает с повышением температуры, то влажность воздуха при нагреве сильно снижается. Следовательно, $\varphi_1 < \varphi_0$.

Воздух с температурой t_1 поступает из калорифера в сушильную камеру, где омывает материал, отбирая от него часть влаги. При поступлении в сушилку воздух содержит $d_0 = d_1$ *г* влаги на 1 *кг* сухой части (абсолютно сухого воздуха). После сушки это влагосодержание увеличится за счет поглощенной влаги материала и будет равно d_2 *г/кг* сухого воздуха. Следовательно, каждый килограмм сухого воздуха в процессе сушки поглощает $d_2 - d_0 = d_2 - d_1$ *г* влаги. Поэтому для удаления 1 *кг* влаги потребуется сухого воздуха:

$$\boxed{l = \frac{1000}{d_2 - d_0} \text{ кг/кг влаги.}} \qquad (123)$$

Расход наружного воздуха будет больше, так как в нем на 1 *кг* сухого воздуха приходится 0,001 d_0 *кг* водяных паров. Поэтому:

$$\boxed{l_0 = l(1 + 0{,}001\, d_0) = 1000 \frac{1 + 0{,}001 d_0}{d_2 - d_0}.} \qquad (124)$$

Величины l и l_0 носят название удельного расхода воздуха на сушку.

Из выражения (123) следует, что расход воздуха уменьшается при увеличении d_2. Так как d_2 увеличивается с повышением температуры отработанного воздуха и увеличением степени его насыщения, то l уменьшается с увеличением t_2 и φ_2.

Увеличение d_0 ведет к увеличению l. Поэтому вентиляционные устройства для удаления отработанного воздуха необходимо рассчитывать на летние условия, когда воздух содержит наибольшее количество водяных паров, т. е. d_0 имеет максимальное значение.

Расход тепла. Согласно определению, в теоретической сушилке процесс испарения влаги происходит без потерь тепла и без повышения температуры материала, следовательно без потерь заключенной в нем влаги. Все тепло, переданное воздухом материалу, идет на испарение влаги и содержится в водяных парах в виде скрытой теплоты парообразования.

Выделившиеся из материала водяные пары смешиваются с воздухом сушильной камеры. Отданное материалу тепло снова возвращается воздуху. Таким образом, общее количество тепла в воздухе при поступлении в сушильную камеру и при выходе из нее остается без изменения, т. е. начальное теплосодержание равно конечному:

$$I_1 = I_2.$$

Выше было определено, что удельный расход на испарение 1 *кг* влаги составляет l *кг* сухого воздуха. На нагрев этого ко-

личества воздуха от начального теплосодержания I_0 до теплосодержания I_1 при выходе из калорифера затрачивается в последнем количество тепла, равное:

$$\boxed{q = l(I_1 - I_0).} \tag{125}$$

Так как $I_2 = I_1$, то

$$\boxed{q = l(I_1 - I_0) = l(I_2 - I_0).} \tag{126}$$

Это и есть количество тепла, необходимое для испарения 1 *кг* влаги при теоретическом процессе в сушилке.

Если температура материала $t_м$ будет отлична от нуля, то помимо скрытой теплоты парообразования, внесенной водяными парами при сушке, воздух при выходе из сушилки будет содержать в себе еще физическое тепло воды, равное $t_м$, так как теплоемкость воды равна 1. Количество тепла, затраченное на сушку, равно:

$$\boxed{q = l(I_2 - I_0) - t_м.} \tag{127}$$

Приравнивая его количеству тепла, переданному в калорифере, получим:

$$\boxed{q = l(I_1 - I_0) = l(I_2 - I_0) - t_м.} \tag{128}$$

Графический метод

Определение расхода воздуха и тепла на сушку аналитическим путем представляет значительные трудности, так как приходится проделывать большую счетную работу. В настоящее время почти исключительно применяют графический метод расчета при помощи I—d-диаграммы.

Нормальный процесс в теоретической сушилке может быть представлен в I — d-диаграмме следующим образом (рис. 75).

Начальное состояние воздуха (t_0; φ_0) изображается точкой A на пересечении соответствующих изотермы $t =$ пост. и линии $\varphi =$ пост. Подогрев воздуха в калорифере при постоянном влагосодержании $d_0 = d_1$ изобразится прямой AB, параллельной оси ординат. Точка B, соответствующая конечной температуре в калорифере t_1, определится пересечением линии $d_0 = d_1$ с изотермой t_1.

Состояние воздуха по выходе из калорифера (t_1; φ_1; d_1; I_1) легко определить по значениям этих параметров для точки B.

Процесс сушки в сушильной камере протекает при постоянном теплосодержании $I_1 =$ пост. и изображается линией BC, параллельной линии $I =$ пост. (оси абсцисс).

Конечная точка линии BC, характеризующая состояние воздуха при выходе из сушилки, может быть найдена в зависимости от заданных условий. Если известна температура при выходе из сушилки, то искомая точка C будет находиться на пересечении линии I_2=пост. с изотермой t_2. Если же задана степень конечного насыщения воздуха φ_2, то эта точка будет находиться на пересечении той же линии I_2 = пост с кривой относительной влажности φ_2 = = пост.

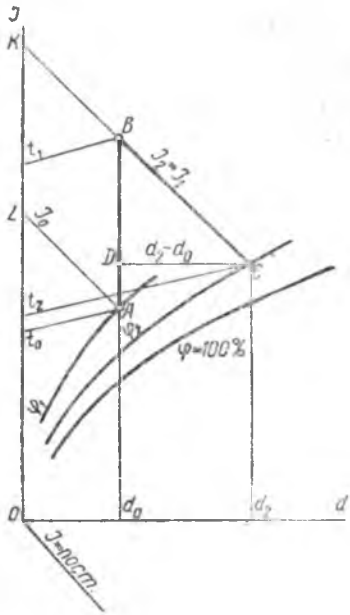


Рис. 75. Нормальный теоретический процесс в I—d-диаграмме.

В обоих случаях точка C выражает конечное состояние воздуха после сушки и дает значения остальных параметров d_2 и φ_2 или d_2 и t_2. Таким образом, нормальный сушильный процесс в теоретической сушилке изображается линией ABC. Теперь легко определить расход воздуха и тепла на сушку.

Расход воздуха по уравнению (123):

$$l = \frac{1000}{d_2 - d_0} \text{ кг/кг влаги.}$$

Величина $d_2 - d_0$ может быть найдена непосредственно из диаграммы; d_2—влагосодержание воздуха при выходе из сушилки—равняется в масштабе влагосодержания отрезку Od_2;

d_0 — начальное влагосодержание воздуха в том же масштабе—равно отрезку Od_0.

Так как $CD \parallel Od_2$, то $d_2 - d_0 = Od_2 - Od_0 = CD \cdot M_d$.

Следовательно, для теоретической сушилки

$$\boxed{l = \frac{1000}{CD \cdot M_d} \text{ кг/кг влаги,}} \qquad (129)$$

где CD выражено в *мм*, а M_d—масштаб влагосодержания диаграммы.

Для приложенной в книге диаграммы (прил. IX) масштаб влагосодержания $M_d = 0{,}2$.

Расход тепла на сушку в теоретической сушилке по уравнению (126) равен:

$$q = l(I_2 - I_0) = l(I_1 - I_0) \text{ ккал/кг испаренной влаги.}$$

Значение $I_2 = I_1$ на диаграмме в масштабе теплосодержаний изображается отрезком OK, значение I_0 — отрезком OL; разность $I_2 - I_0 = I_1 - I_0$ — отрезком LK или AB.

Следовательно,

$$q = l(I_2 - I_0) = l \cdot AB \cdot M_i \text{ ккал/кг испаренной влаги,}$$

где AB выражено в *мм*, а M_i — масштаб теплосодержания. Для приложенной диаграммы $M_i = 0{,}1$ *ккал/мм*.

Подставив вместо l его значение, получим:

$$\boxed{q = \frac{1000}{CD \cdot M_d} AB \cdot M_i = \frac{M_i}{M_d} \cdot 1000 \frac{AB}{CD} = m \frac{AB}{CD} \text{ ккал/кг влаги,}} \quad (130)$$

где $m = \frac{M_i}{M_d} \cdot 1000$. Для приложенной диаграммы $m = 500$.

Таким образом, для определения расхода воздуха и тепла с помощью $I - d$-диаграммы достаточно по данным параметрам процесса найти три точки (A, B и C), измерить (в *мм*) два отрезка (AB и $CД$) и подставить эти значения в приведенные формулы.

Пример. Определить расход воздуха и тепла на испарение 1 *кг* влаги наружным воздухом с $t_0 = 20°$ и $\varphi_0 = 60\%$, подогретым в калорифере до 95°, если температура воздуха при выходе из теоретической сушилки $t_2 = 35°$.

На диаграмме начальное состояние воздуха изображено точкой A, состояние после подогрева—точкой B, после выхода из сушилки — точкой C.

Для определения расхода сухого воздуха измерим отрезок CD в *мм* и умножим на масштаб влагосодержания.

Расход сухого воздуха равен:

$$l = \frac{1000}{CD \cdot M_d} = \frac{1000}{119{,}5 \cdot 0{,}2} = 41{,}8 \text{ кг/кг влаги.}$$

Расход наружного воздуха, учитывая содержание водяного пара, согласно уравнению (124), равен:

$$l_0 = l(1 + 0{,}001\, d_0) = 41{,}8(1 + 0{,}0089) = 42{,}4 \text{ кг/кг влаги.}$$

Для определения расхода тепла измерим отрезок AB:

$$q = \frac{AB \cdot 0{,}1}{CD \cdot 0{,}2} \cdot 1000 = 500 \frac{AB}{CD} = 500 \frac{183}{119{,}5} = 765 \text{ ккал.}$$

3. ПРАКТИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС В СУШИЛКЕ

При изучении теоретических сушилок принимают, что процесс сушки протекает без потерь тепла. Фактически же всегда имеются потери, неизбежно связанные с самим процессом сушки. К ним относятся: затраты тепла на подогрев высушенно-

то материала (поскольку температура при выходе никогда не равняется температуре продукта при поступлении в сушильную камеру); расход тепла на подогрев транспортных устройств, применяемых во время сушки; потери тепла в окружающую среду через ограждения самой сушильной камеры, потери тепла на прогрев ограждающих конструкций (стен, потолков и пр.) в периодических сушилках.

Если эти затраты будут учтены и отнесены также к 1 *кг* испаренной влаги, то практический расход тепла будет несколько отличаться от выведенного выше для теоретической сушилки. Количество тепла, связанное с этими потерями, подсчитывается аналогично затратам в других тепловых процессах.

В некоторых конструкциях сушилок, помимо калорифера, воздух подогревается дополнительно в самой сушильной камере. При определении расхода тепла этот дополнительный приток тепла необходимо учитывать.

Переходим к непосредственному определению расхода тепла в практической сушилке.

Обозначим величину тепловых потерь на 1 *кг* испаренной влаги через $q_п$, а добавочное тепло, сообщенное в самой камере на 1 *кг* влаги, через $q_д$.

В теоретической сушилке количество тепла, внесенное из калорифера в сушильную камеру на испарение 1 *кг* влаги, равно теплу, уносимому воздухом из сушильной камеры:

$$l(I_1 - I_0) = l(I_2 - I_0).$$

В практической же сушилке теплосодержание воздуха при вступлении в сушильную камеру отличается от теплосодержания воздуха при выходе на величину тепловых потерь и добавочного тепла:

$$\boxed{l(I_1 - I_0) = l(I_2 - I_0) + q_п - q_д.} \qquad (131)$$

Раскрыв скобки и сделав преобразование, получим:

$$l(I_2 - I_1) = q_п - q_д.$$

Обозначив $q_п - q_д = \Delta$,

получим: $$l(I_2 - I_1) = \Delta; \quad I_2 - I_1 = \frac{\Delta}{l},$$

$$\boxed{I_2 = I_1 + \frac{\Delta}{l}.} \qquad (132)$$

Таким образом, теплосодержание воздуха при практическом сушильном процессе при выходе из сушилки будет больше или меньше теплосодержания при входе, в зависимости от значения $\frac{\Delta}{l}$, т. е. от того, будут ли потери тепла на 1 *кг* воздуха боль-

ше или меньше тепла, дополнительно переданного воздуху в сушильной камере.

Для изображения практического сушильного процесса в I—d-диаграмме находят теоретический процесс, протекающий в тех же пределах, что и практический процесс, т. е. при тех же параметрах входящего и выходящего воздуха, и учитывают величину $\frac{\Delta}{l}$, вычисленную для практического процесса.

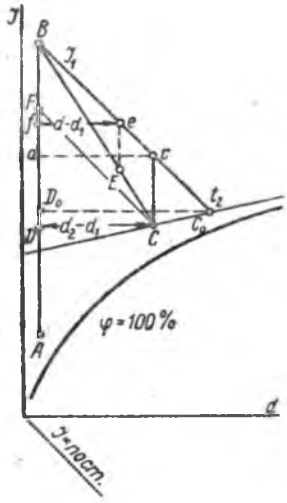


Рис. 76. Практический сушильный процесс в I—d-диаграмме.

На рис. 76 линия ABC_0 представляет теоретический сушильный процесс; отрезок AB—нагревание воздуха в калорифере, отрезок BC_0—испарение влаги в сушильной камере.

Теоретический процесс сушки изображается прямой BC_0, направленной параллельно оси абсцисс $I =$ пост., так как $I_1 = I_2$. Практический процесс сушки будет итти от начальной точки B по другой линии BC, выше или ниже BC_0, в зависимости от значения $\frac{\Delta}{l}$, так как $I_2 = I_1 + \frac{\Delta}{l}$.

Допустим, что теплосодержание уходящего воздуха I_2 меньше теплосодержания I_1 воздуха, поступающего в сушильную камеру, т. е. количество тепла, сообщенного в камере, меньше потерь сушилки ($\Delta < 0$).

Так как $I_2 < I_1$, то, очевидно, вторая точка, определяющая линию практического процесса сушки, должна лежать ниже прямой BC_0 теоретического процесса. Направление искомой линии сушки определится из условия, что для любой точки E этой линии с параметрами I и d справедливо уравнение $l(I - I_1) = \Delta$. Подставляя вместо l его выражение, получим:

$$\boxed{\frac{(I - I_1)\ 1000}{d - d_1} = \Delta.} \qquad (133)$$

Это следует из подобия треугольников BeE и BcC, а также Bef и Bcd. Отсюда можем написать:

$$\frac{Cc}{Ee} = \frac{cd}{ef},$$

т. е.

$$\frac{I_2 - I_1}{I - I_1} = \frac{d_2 - d_1}{d - d_1},$$

откуда

$$\frac{I_2 - I_1}{d_2 - d_1} = \frac{I - I_1}{d - d_1}.$$

Так как $I - I_1 = Ee \cdot M_I$ и $d - d_1 = ef M_d$, где M_I и M_d соответствующие масштабы для I и d в $I-d$-диаграмме, то, подставив в выражение для Δ, получим:

$$\frac{1000\, M_I}{M_d} \cdot \frac{Ee}{ef} = \Delta.$$

Приняв

$$\frac{1000 M_I}{M_d} = m,$$

получим

$$\boxed{Ee = ef \frac{\Delta}{m}.} \qquad (134)$$

В масштабах диаграммы (приложение IX) $m = 500$ и $Ee = \frac{ef\Delta}{500}$.

Это соотношение определяет искомое направление линии BC.

Для построения линии BC на луче BC_0 теоретического процесса сушки выбирают произвольную точку e. Затем измеряют ее расстояние до линии постоянного влагосодержания, проведенной через точку B (отрезок ef в *мм*), и откладывают от точки e по вертикали вниз, если $\Delta < 0$, или вверх, если $\Delta > 0$. Отрезок $eE = ef \frac{\Delta}{m}$ *мм*. Через полученную точку E проводят луч BE до пересечения с заданным значением t_2 или φ_2. Точка пересечения C является конечной точкой практического процесса ABC.

Построив практический сушильный процесс в $I-d$-диаграмме, находят для него расход воздуха и тепла тем же путем, как и для теоретической сушилки, т. е.

$$l = \frac{1000}{CDM_d} \text{ и } q = \frac{M_I}{M_d} 1000 \frac{AB}{CD} \text{ ккал/кг влаги.}$$

Это количество тепла вводится в сушильную камеру из калорифера. Если будет сообщено добавочное количество тепла $q_д$ в самой камере, то полный расход тепла будет равняться найденному плюс $q_д$.

4. ГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСХОДА ТЕПЛА И ГАЗОВ ПРИ СУШКЕ ДЫМОВЫМИ ГАЗАМИ

При сушке дымовыми газами процесс подогрева наружного воздуха отсутствует. Параметры смеси горячих дымовых газов с наружным воздухом определяются, как указано на стр. 199 гл. I.

Расчет теоретического сушильного процесса в этом случае ведется так. На рис. 77-*а* точка A соответствует состоянию наружного воздуха, точка B_1—состоянию горячих дымовых газов, поступающих в камеру смешения. Точка B_1 характеризует состояние рабочей смеси и определена по температуре и влагосодержанию газов и воздуха и изотерме $t_{см}$ смеси, заданной для данного процесса.

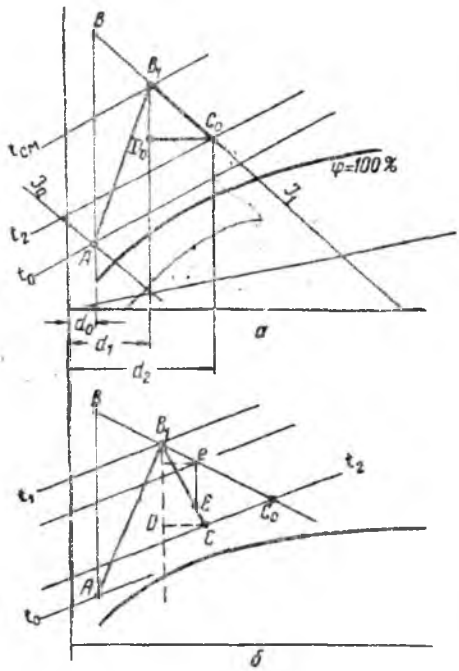


Рис. 77. Сушильный процесс при сушке дымовыми газами в $I-d$-диаграмме: *а*—теоретический процесс; *б*—практический процесс.

Процесс сушки изображается линией BC_0, где C_0—пересечение линии I=пост. с линией заданной температуры t_2 или насыщения φ_2 в конце процесса сушки. Расход рабочей смеси составит:

$$l_{см} = \frac{1000}{d_2 - d_1} = \frac{1000}{M_d \cdot C_0 D_0}$$

кг/кг испаренной влаги.

Расход тепла составит:

$$q = l_{см} \cdot I_1 - l_0 \cdot I_0,$$

где I_1 и I_0—теплосодержание дымовых газов при входе в сушилку и воздуха при входе в топку и камеру смешения; $l_{см}$ и l_0 — расход сухих газов и наружного воздуха, отнесенный к 1 *кг* испаренной влаги.

Так как весовые количества $l_{см}$ и l_0 мало отличаются друг от друга (не более 2% в зависимости от состава топлива), то можно принять их равными. Тогда расход тепла по $I-d$-диаграмме выразится:

$$q = l(I_1 - I_0) = \frac{1000}{M_d \cdot C_0 D_0} \cdot AB \cdot M_i = m \frac{AB}{C_0 D_0},$$

где:

$$m = 1000 \frac{M_i}{M_d}.$$

Для практического сушильного процесса с применением дымовых газов определение расхода количеств газа и тепла производится аналогично практическому процессу с использованием нагретого воздуха (рис. 77-*б*): строится вспомогательный луч B_1C; его пересечение с заданными параметрами t_2 или φ_2 определяет конечную точку процесса.

Расход газов $l = \frac{1000}{M_d \cdot DC}$ *кг/кг* испаренной влаги.

Расход тепла $q = m \frac{AB}{DC}$,

где $m = 500$ для диаграммы прил. IX.

5. ВАРИАНТЫ СУШИЛЬНОГО ПРОЦЕССА

Обычно все необходимое для сушки тепло доставляется в сушильную камеру теплоносителем извне. Этот же теплоноситель уносит с собой выделившуюся влагу. Процесс представляет так называемый нормальный сушильный процесс. Возможны и другие варианты сушильного процесса.

Процесс с возвратом отработанного воздуха. В этих сушилках, называемых сушилками с рециркуляцией (рис. 78), часть

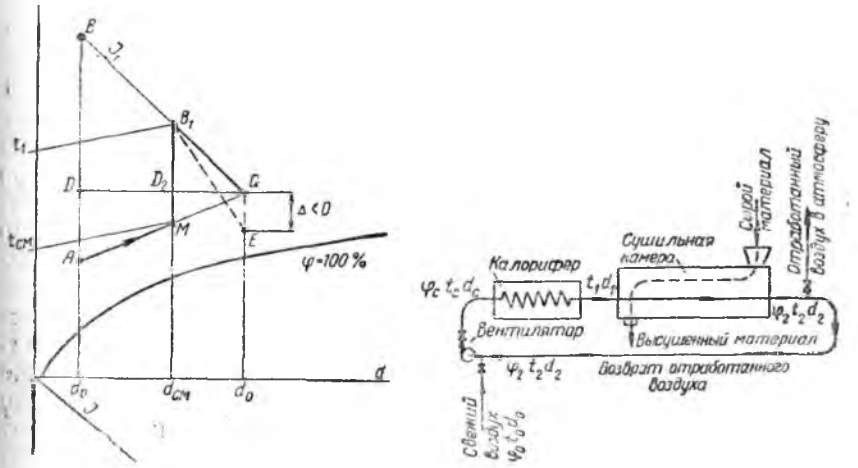


Рис. 78. Сушильный процесс с рециркуляцией в $I - d$-диаграмме.

отработанного воздуха по выходе из сушильной камеры снова подогревается и возвращается в сушилку. Другая часть выпускается в атмосферу, а вместо нее подается дополнительное количество свежего воздуха.

Теоретический процесс сушки с подогревом в $I—d$-диаграмме изображается линией AMB_1C, которая строится по данным точкам A, C и M или A, C и B_1. Точка M соответствует состоянию смеси отработанного и свежего дополнительного воздуха (т. е. d_c, I_c и t_c), а точка B_1—температуре смеси после подогрева ее в калорифере.

Вся испарившаяся влага уносится из сушилки уходящим отработанным воздухом, взамен которого поступает свежий допол-

нительный. Эти расходы равны между собой и могут быть определены по формуле:

$$l = \frac{1000}{d_2 - d_0} = \frac{1000}{M_d \cdot DC} \text{ кг на 1 кг влаги.}$$

Количество воздуха, циркулирующего в сушилке, т. е. отработанного с добавкой свежего, определяется из условия, что влагосодержание 1 *кг* смеси $d_{см}$ увеличивается в сушилке до влагосодержания уходящего воздуха d_2:

$$l_ц = \frac{1000}{d_2 - d_{см}} = \frac{1000}{M_d D_2 C} \text{ кг на 1 кг влаги.}$$

Расход тепла

$$q = l(I_2 - I_0) = m \cdot \frac{AB}{CD} \text{ ккал на 1 кг влаги}$$

или

$$q = l_ц\ (I_2 - I_м) = m\ \frac{MB_1}{CD_2} \text{ ккал на 1 кг влаги.}$$

Из выражения для $l_ц$ следует, что применение рециркуляции увеличивает количество циркулирующего воздуха и, следовательно, расход энергии на вентилятор. Однако при этом снижается температура сушки (точка B_1 против точки B процесса ABC).

Рециркуляция воздуха позволяет уменьшить перепады температур в сушильной камере. Благодаря этому в большинстве случаев улучшается качество сушки материала, и можно очень легко и гибко регулировать влажность воздуха в сушильной камере.

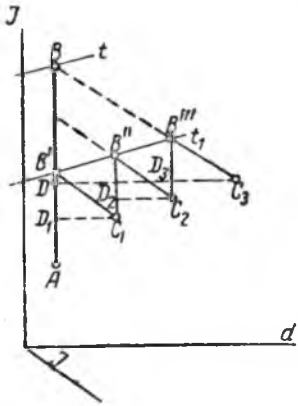


Рис. 79. Сушильный процесс с промежуточным подогревом воздуха в $I - d$-диаграмме.

При применении рециркуляции расход тепла в теоретическом процессе остается без изменения. В действительном же процессе, благодаря увеличению скорости теплоносителя, повышается коэффициент теплопередачи, легче прогревается материал. Этим облегчается продвижение влаги к поверхности материала и уменьшается срок сушки и расход тепла.

Построение практического процесса сушки с рециркуляцией производят как и для обычных сушилок; на линии BC от произвольной точки откладывают соответствующий отрезок CE и проводят линию BE до пересечения ее с линией заданного значения t_2 или φ_2.

Процесс с промежуточным подогревом воздуха в сушильной камере (рис. 79). Эта сушилка состоит из нескольких зон, в которых установлены отдельные калориферы, нагревающие воздух до начальных температур t_1'; t_2; t_3, или до одной и той же начальной температуры t_1.

Теоретический процесс сушки с подогревом в $I—d$-диаграмме изображается ломаной линией $AB'C_1$, $B''C_2B'''C_3$. Расход воздуха одинаков для всех ступеней сушилки и равняется:

$$l=\frac{1000}{(C_1D_1+C_2D_2+C_3D_3)M_d}=\frac{1000}{DC_3M_d}\ кг/кг \text{ влаги.}$$

Расход тепла на 1 *кг* воздуха по каждой ступени подогрева определяется отрезками AB', C_1B'' и C_2B''', а расход за весь процесс составляет на 1 *кг* испаренной влаги:

$$q=l(AB'+C_1B''+C_2B''')M_i=1000\,\frac{(AB'+C_1B''+C_2B''')M_i}{C_3D\cdot M_d}.$$

Так как сумма отрезков $AB'+C_1B''+C_2B'''=AB$, то

$$q=\frac{1000\,AB\cdot M_i}{C_3D\cdot M_d}.$$

Отсюда следует, что одноступенчатый теоретический процесс имеет тот же расход воздуха и тепла, что и многоступенчатый при тех же параметрах наружного воздуха (точка A) и отработанного воздуха (точка C_3). Однако максимальная температура воздуха для многоступенчатого процесса меньше, чем для одноступенчатого процесса, т. е. для получения тех же результатов сушки может применяться воздух пониженной температуры. Это существенно в тех случаях, когда материал почему-либо не может подвергаться действию высоких температур. Кроме того, при этом достигается большая равномерность самого процесса сушки.

Построение действительного процесса для этих сушилок ведут для каждой ступени отдельно, как и для простой сушилки с одноступенчатым подогревом.

Глава III

ТИПЫ СУШИЛОК

1. САРАИ ДЛЯ ЕСТЕСТВЕННОЙ СУШКИ

Естественная сушка, применяемая еще в кирпичной промышленности, производится в сушильных сараях. Ширина сараев различна и доходит до 10—12 *м*, длина—до 100 *м*. Сырец подается вагонетками по главному коридору посредине, с раздачей в боковые проходы. Применяется также подача транспортерами.

Помимо сараев с ручной загрузкой и разгрузкой, имеются сараи, где эти операции механизированы. Внутри таких сараев про-

ложены рельсовые пути для сбрасывающей вагонетки, которая подвозит рамки с сырцом.

Применение скоростного метода естественной сушки, разработанного лауреатом Сталинской премии И. Г. Картавцевым, значительно увеличило производительность простых бесполочных сушильных сараев на сезонных кирпичных заводах.

По методу Картавцева вместо полной разгрузки сарая после окончания сушки всего сырца вводится непрерывная отборка высохшего сырца с боков и сверху клеток. Одновременно на оставшуюся часть наращивается свежесформованный сырец. Работа идет в следующем порядке: на пол сарая ставят клетки высотой 6—8 рядов сырца; после того как верхние 3—4 ряда подсохнут, их снимают и на оставшиеся недосушенные нижние ряды устанавливают новые 6—8 рядов. У этой клетки через несколько дней снимают высушенные верхние 3—4 ряда и ставят на их место новые 6—8 рядов. За это время успевает высохнуть сырец в нижних рядах, и тогда одновременно разбирается вся клетка.

При такой системе в два-три раза улучшается использование сушильной площади сарая. Высушенный сырец оставляют на месте и укладывают по всей площади сарая в плотную «брус-подушку». Полученную подушку используют для сушки на ней сырца так же, как и на обыкновенном полу сарая, с постепенным наращиванием по высоте.

Таким образом достигается использование сарая для сушки и складирования. При этом сушка свежесформованного сырца на «брус-подушке» происходит более интенсивно, чем на полу сарая.

Применение естественной сушки в настоящее время сокращается. Предприятия кирпичной промышленности переходят на круглогодовую работу с устройством искусственных сушилок, вместо сезонной естественной сушки кирпича в сараях. Однако рациональное использование сушильных сараев имеет большое значение для увеличения выработки кирпича в средних и южных районах Советского Союза.

2. ИСКУССТВЕННЫЕ СУШИЛКИ

Основное отличие искусственной сушки от естественной — возможность изменять ее режим в зависимости от свойств материала.

По режиму работы искусственные сушилки делят на две группы: периодического и непрерывного действия.

В сушилках периодического действия все связанные с процессом сушки операции — загрузка сырца в сушилки, собственно сушка, т. е. удаление влаги, и выгрузка высушенного сырца из сушилки проходят последовательно. Весь материал сушилки разгружают полностью по окончании сушки. Температура и влажность теплоносителя изменяются по времени.

В сушилках непрерывного действия загрузка и выгрузка происходят непрерывно или через определенные промежутки времени. Загрузка и выгрузка ведутся частями. Количество разгружаемого материала равно количеству вновь загружаемого влажного материала. Общее количество материала в сушилке остается постоянным. Изменение температуры и влажности происходит по длине сушилки по мере перемещения материала по сушильному устройству.

По роду теплоносителя различают сушилки, работающие с применением чистого воздуха и дымовых газов. Воздух можно подогревать либо в самой камере (сушилки с паровым обогревом), либо в воздухоподогревателях до ввода его в сушилку.

Дымовые газы поступают из обжигательных печей или из отдельных топок. Сушилки с использованием дымовых газов получают все более широкое применение в промышленности стройматериалов. Они более экономичны сравнительно с сушилками, работающими на горячем воздухе.

По направлению движения воздуха в сушильной камере различают сушилки, работающие с параллельным потоком и противотоком воздуха.

По виду сушимого материала различают сушилки для сыпучих и кусковых материалов и сушилки для изделий определенной формы.

Сушилки периодического действия

К сушилкам периодического действия относятся камерные сушилки, применяемые для сушки глиняного кирпича и других изделий.

Камерные сушилки представляют собой камеры длиной 10—12 *м*, в которые загружают изделия, подлежащие сушке. Камерные сушилки широко распространены на кирпичных и черепичных заводах. Наиболее часто встречаются сушилки системы «Росстромпроекта».

В этой сушилке (рис. 80) под полом вдоль всей камеры проложены три канала: по двум крайним *А* подается горячий воздух, а по среднему *Б* удаляется насыщенный влагой воздух. Через отверстия в плитах, перекрывающих каналы *А*, горячий воздух поднимается вверх, омывая сырец. Насыщаясь влагой и охлаждаясь, струйки воздуха опускаются вниз к вытяжному каналу. По пути движения они встречаются с новыми струйками восходящего воздуха, частью смешиваются с ними и опять увлекаются наверх. При смешивании постепенно выравнивается температура по высоте камеры. Кроме того, получается многократная циркуляция за счет подсасывающего действия струй горячего воздуха.

Камерные сушилки обычно соединяют в блоки с объединенной подачей воздуха из одного канала, а часто и с объединенным отводом отработанных газов. В большинстве конструкций камерных сушилок с помощью клапанов в подводящем канале можно регулировать количество воздуха, поступающего в отдельные камеры.

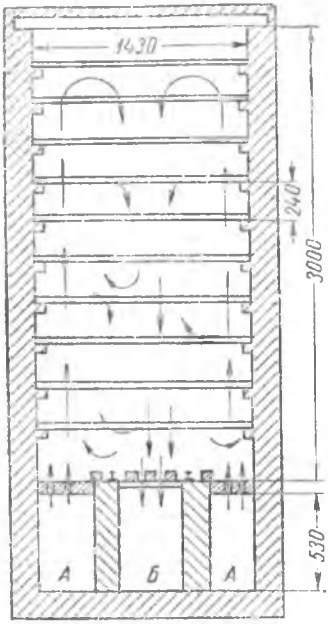


Рис. 80. Сушилка Росстромпроекта.

В начале сушки воздух подают в небольшом количестве, скорость его мала и поэтому рециркуляции почти нет. Но в этот период она особенно желательна, так как сырец следует сушить влажным воздухом. Действие многократной циркуляции усиливается к концу сушки, когда увеличиваются количество и скорость воздуха. Однако в этот период сушку можно проводить горячим сухим воздухом.

Таким образом эти сушилки, отличаясь простотой управления, не дают, по существу, возможности устанавливать нужный режим, — изменять его можно только в очень ограниченных пределах.

Схема работы сушилки с рециркуляцией части воздуха представлена на рис. 81. Отводящий канал блока камер *1* соединяется с подводящим каналом *2* при помощи канала *3*, по которому отработанный воздух возвращается в подводящий канал. Если требуется добавить

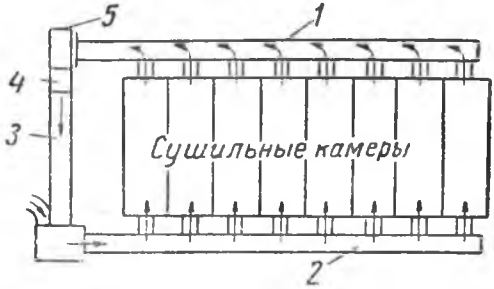


Рис. 81. Схема рециркуляционной сушилки.

только часть влажного воздуха, то излишек его выбрасывается в атмосферу через трубу *4* за отсасывающим вентилятором *5*.

Эжекционные (подсасывающие) сушилки, хорошо зарекомендовавшие себя при сушке самых разнообразных изделий и

материалов, устроены следующим образом (рис. 82): по одну сторону вдоль камеры расположен канал *1*, в который вентилятором *2* нагнетается воздух, выходящий в камеру с большой скоростью через конические сопла *3*, размещенные в стенах канала. Благодаря большой скорости, струя горячего воздуха подсасывает воздух, находящийся в камере, в результате чего возникает сильная циркуляция. Отработанный воздух можно частично удалять через нижний канал *4* и заменять свежим или направлять снова для подогрева.

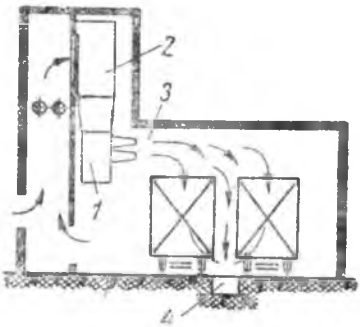


Рис. 82. Схема эжекционной сушилки.

Сушилки непрерывного действия

В сушилках непрерывного действия материал перемещается во время сушки. При этом его температура и влажность изменяются в различных зонах сушилки. Направление движения материала может либо совпадать с направлением теплоносителя (воздуха или газа), либо быть противоположным ему. В первом случае сушилки называются прямоточными, во втором—противоточными.

Прямоточные сушилки применяют в тех случаях, когда материал во влажном состоянии менее чувствителен к высокой температуре, чем в подсушенном, а высушенный материал наиболее чувствителен к высоким температурам, например, глина, уголь и др.

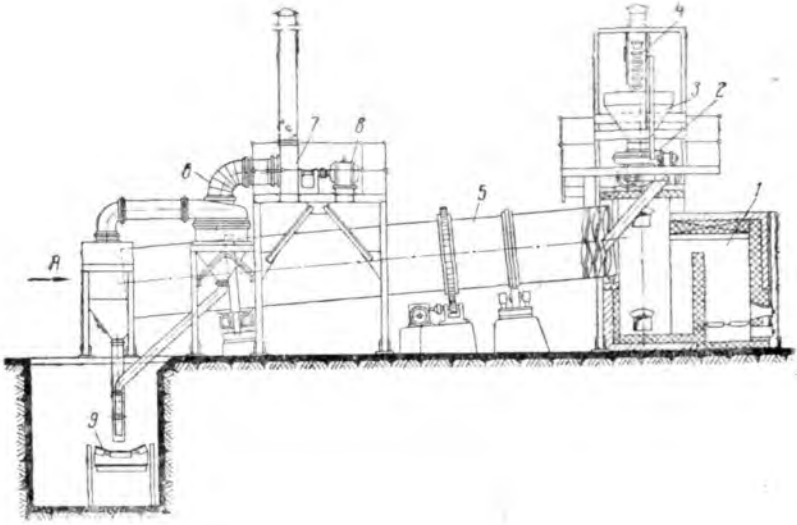
Противоточные сушилки применяют в тех случаях, когда материал в период высокой влажности не переносит резкой сушки, а высушенный материал нечувствителен к высоким температурам.

Сушилки непрерывного действия бывают шахтные, барабанные, туннельные, конвейерные и пневматические.

Для сушки сыпучих и кусковых материалов применяют шахтные сушилки. Материал поступает в верхнюю часть шахты и под действием собственной тяжести опускается вниз навстречу дымовым газам. Последние, омывая материал и отнимая от него влагу, насыщаются ею и удаляются через верхнюю часть сушилки.

В настоящее время эти сушилки применяются редко, поскольку они мало экономичны и вытесняются барабанными, производительность и экономичность которых выше, а обслуживание проще и удобнее.

Барабанные сушилки имеют широкое распространение в промышленности строительных материалов (стекольной, кирпичной и других). Они применяются для сушки сыпучих и кусковых материалов.



Вид по стрелке А

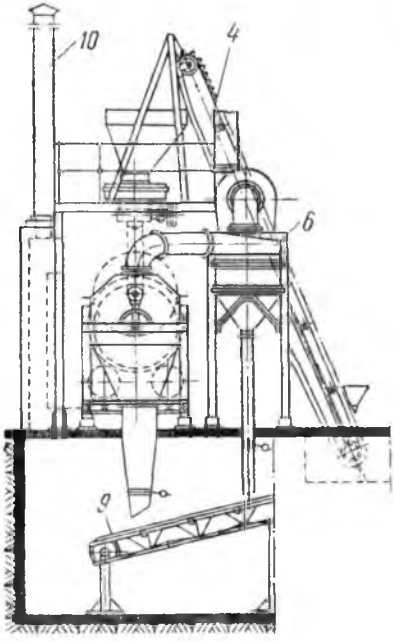


Рис. 83. Установка сушильного барабана: *1*—топка; *2*—загрузчики; *3*—бункер; *4*—элеватор; *5*—сушильный барабан; *6*—циклон; *7*—дымосос; *8*—электродвигатель; *9*—ленточный транспортер; *10*—труба для отвода газов.

Барабанная сушилка (рис. 83) представляет собой цилиндрический барабан длиной 8—14 *м* и диаметром от 1 до 3 *м*, наклоненный к горизонту под углом 5—6° и медленно вращающийся (2—8 об/мин.). Загружаемый материал поступает через течку в наиболее высокую часть барабана и при своем движении, медленно перекатываясь по периферии, просушивается дымовыми газами, проходящими через барабан. Для лучшего перемешивания и удлинения пути движения материала барабан внутри имеет лопатки по стенам или заполнен ячейками различного устройства (рис. 84). Ячейки уменьшают высоту падения материала и удлиняют общий путь его прохождения по барабану, улучшая тем самым условия сушки. Со стороны выхода в конце барабана устраивают подпорное приспособление. Увеличивая степень заполнения барабана и удлиняя время пребывания в нем материала, подпорное приспособление также способствует улучшению сушки.

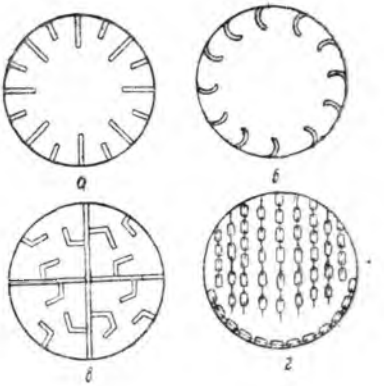


Рис. 84. Типы внутреннего устройства сушильных барабанов.

Движение материала может быть параллельным движению воздуха или газа (прямоточное) или встречным (противоточное).

Для отопления барабанов применяют любые виды топлива, сжигаемого в топках, расположенных со стороны входа газов в барабан.

Для достижения соответствующей температуры (обычно не выше 800°) продукты горения топлива до поступления в барабан смешивают с холодным воздухом. Со стороны выхода материала устраивают пылеотделительное и вытяжное устройство (циклоны или пылеотделительные камеры).

Техническая характеристика барабанных сушилок приведена в табл. 27.

Основной величиной для определения размеров сушильного барабана служит напряжение сушильного объема по съему влаги, т. е. количество влаги в килограммах, испаряемой за 1 час в 1 $м^3$ объема барабана.

Эта величина зависит от рода материала, его влажности, размеров кусков, температуры и степени насыщения теплоносителя и скорости движения газов.

Для ускорения и улучшения равномерности сушки куски материала, поступающего в барабан, должны быть небольшой величины (для глины не более 40—50 *мм*). Загрузка барабана материалом должна происходить равномерно. При правильной

конструкции внутренних перегородок и устройстве подпорного приспособления степень заполнения барабана может доходить до 25% его объема. Степень заполнения барабана следует по возможности повышать, так как это увеличивает его производительность. Температура газов при входе в барабан зависит от свойств высушиваемого материала. При изменении влажности поступающего материала соответственно изменяют тепловое напряжение топки. Для этого уменьшают или увеличивают количество поступающих газов. Особое внимание должно быть уделено плотности присоединения к барабану загрузочной воронки и выгрузочного люка. Для уменьшения подсосов воздуха барабан должен быть достаточно герметичен.

Таблица 27

Техническая характеристика барабанных сушилок

Показатели	Размер барабана в *м*					
	1,5×8	1,8×12	2,2×12	2,2×14	2,8×12	2,8×14
Вес в *т*	13,6	24,7	42,0	45,7	65,0	70,0
Потребная мощность в *л. с.*	8	14	17	20	28	36,0
Объем сушильного барабана в $м^3$	14,1	30,5	45,6	53,2	74,0	86,2
Уклон барабана в град.	5—6	5—6	5—6	5—6	5—6	5—6
Число оборотов барабана в 1 мин.	5	5	5	5	5	5
Напряжение сушильного объема в *кг* испаряемой влаги в 1 $м^3$/*час*	40—60 (для угля) 50—65 (для глины и трепела)			45—65 (для известняка) 50—60 (для гранулированного шлака)		

Длительность сушки зависит от рода материала и режима сушки и может быть установлена только опытным путем. Расход тепла и воздуха в сушильном барабане при принятых условиях сушки определяется по методу, изложенному в главе «Расчет сушильного процесса».

Расход тепла в сушильных барабанах при температурах газов 400—800° колеблется от 900 до 1300 *ккал/кг* испаренной влаги.

В табл. 28 приведен тепловой баланс сушильного барабана при сушке глины (по результатам испытания).

Как видно из баланса, расход тепла равен 1148 *ккал/кг*. Наибольшие затраты тепла составляют потери с отходящими газами. Малая величина потерь тепла в окружающую среду объясняется применением тепловой изоляции.

Таблица 28

Тепловой баланс сушильного барабана при сушке глины (на 1 *кг* испаренной влаги)

Приход тепла	Единица измерения		Расход тепла	Единица измерения	
Наименование статьи	*ккал*	%	Наименование статьи	*ккал*	%
1. Тепло от сжигания топлива	1136	98,9	1. На испарение влаги .	634	55,0
2. Тепло, вносимое воздухом	12	1,1	2. Потери тепла в топке	165	14,4
			3. Потери тепла с высушенной глиной . .	96	8,4
			4. Потери тепла с отходящими газами . .	216	18,8
			5. Потери тепла в окружающую среду . .	37	3,4
Итого . . .	1148	100,0	Итого . . .	1148	100,0

Пневматические сушилки. Принцип работы этих сушилок следующий: измельченный материал подается в вертикальную трубу, где горячий воздух или газы поднимают его кверху; по пути материал высыхает и поступает в циклон или другие осадительные устройства, а воздух удаляется в атмосферу.

Скорость воздуха зависит от размера частиц материала и колеблется от 10 до 40 *м/сек* в зависимости от вида и свойств материала. Она должна быть больше скорости витания частиц. Под скоростью витания понимают скорость, при которой частицы будут находиться во взвешенном состоянии.

Для отделения крупных и влажных кусков устанавливают сепаратор. Если материал не успевает высохнуть по пути до циклона, то после дополнительного дробления его снова направляют в трубу.

Как показал опыт, сушка в основном происходит на небольшом участке трубы. Высота труб в настоящее время не превышает 10—12 *м*.

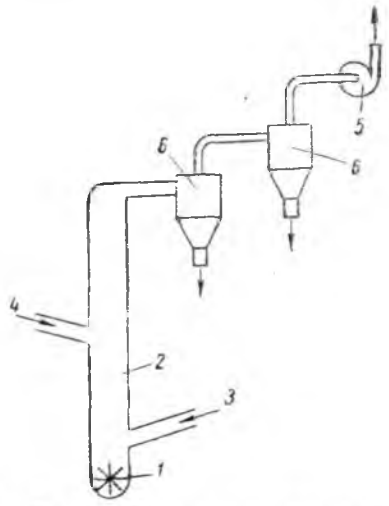


Рис. 85. Схема шахтно-мельничной сушилки.

Шахтно-мельничная сушилка (рис. 85) представляет собой мельницу *1* с вертикальной шахтой *2*, куда поступают горячие газы или смесь их с воздухом *3*. Предварительно раздробленный материал из бункера поступает через питатель по желобу *4*

в шахту и падает навстречу газовому потоку, поднимающемуся вверх по шахте под действием вентилятора, установленного в конце системы *5*. Газовый поток, проходя через шахту, сушит материал и подхватывает наиболее мелкие сухие частицы, унося их из мельницы. Более крупные частицы выпадают из потока и возвращаются в мельницу для повторного размола. Размолотый и высушенный материал оседает в пылеуловителях *6*, а оттуда поступает в бункеры.

Такие системы одновременного размола и сушки применяют для подготовки угля при пылеугольном отоплении и производстве гипса. В настоящее время проводятся опыты по одновременному размолу и сушке глины.

Сушилки, работающие по принципу распыления материала. Для сушки различных жидких материалов применяют сушилки, работающие по принципу распыления. Материал подается в особую сушильную камеру-башню, где распыляется специальными приборами на мельчайшие частицы. Жидкость распыляют механическими форсунками, сжатым воздухом, центрифугами.

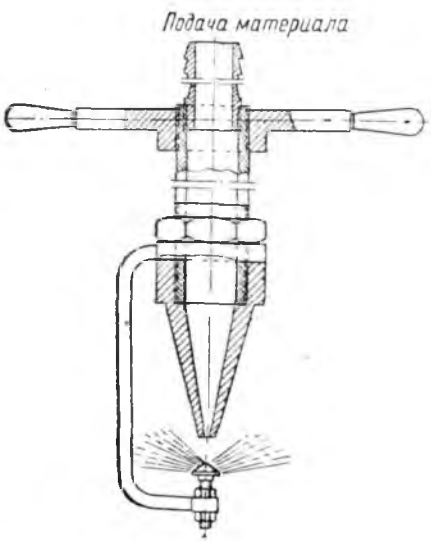


Рис. 86. Механический распылитель.

Механические форсунки различных конструкций работают под давлением 30—200 *ат*.

Распыление сжатым воздухом также производят форсунками под давлением 1,5—5 *ат*.

Центробежное распыление осуществляется быстро вращающимся диском с числом оборотов от 4000 до 10000 в минуту.

Наиболее экономичным способом распыления жидкости является механический. На рис. 86 показан механический распылитель.

Основными преимуществами распыливающих сушилок является весьма быстрый (несколько секунд) процесс сушки и получение материала в виде тонкого порошка. Распыливающие сушилки могут применяться для сушки суспензий в производстве тонкокерамических изделий.

На рис. 87 показана распыливающая сушилка для сушки шликера. Шликер распыливается пневматической форсункой и подсушивается в рабочей камере сушилки горячими топочными

газами, которые поступают в камеру через многочисленные отверстия вверху. Жидкость и горячие газы движутся прямотоком сверху вниз. Высушенный порошок собирается скребками и поступает в бункер.

Отработанные и охлажденные газы из сушилки отсасываются вентилятором.

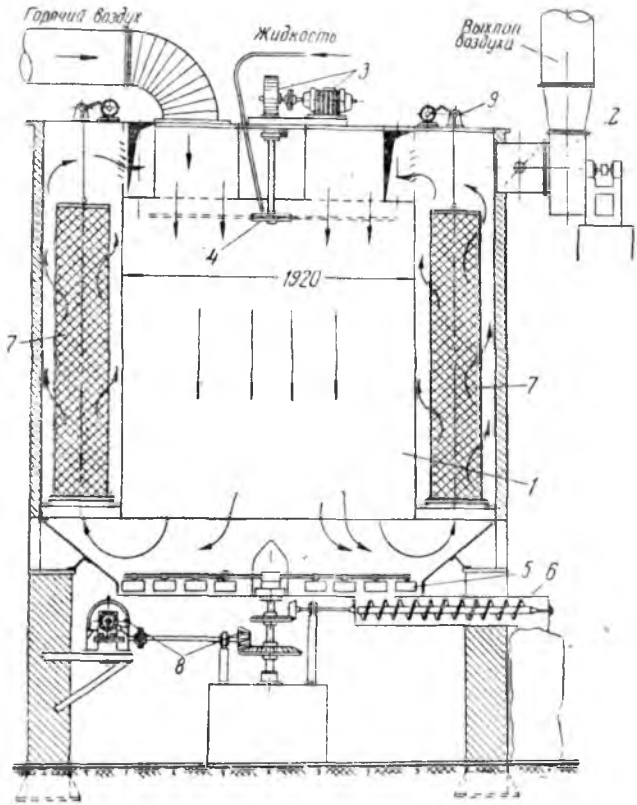


Рис. 87. Распыливающая сушилка для сушки шликера: *1*—сушильная камера; *2*—вентилятор; *3*—привод распыливающего устройства; *4* — распыливающее устройство; *5*—скребки; *6*—шнек; *7*—фильтры; *8*—привод; *9*—механизм для встряхивания фильтров.

Туннельные сушилки. Простой противоточный туннель (рис. 88) представляет собой коридор прямоугольного сечения длиной 30—35 *м*, вдоль которого проходит рельсовый путь для вагонеток. В некоторых установках применяют многоколейные туннели с 2—5 путями. Вагонетки со свежим сырцом поступают с одного конца туннеля и передвигаются по нему к противопо-

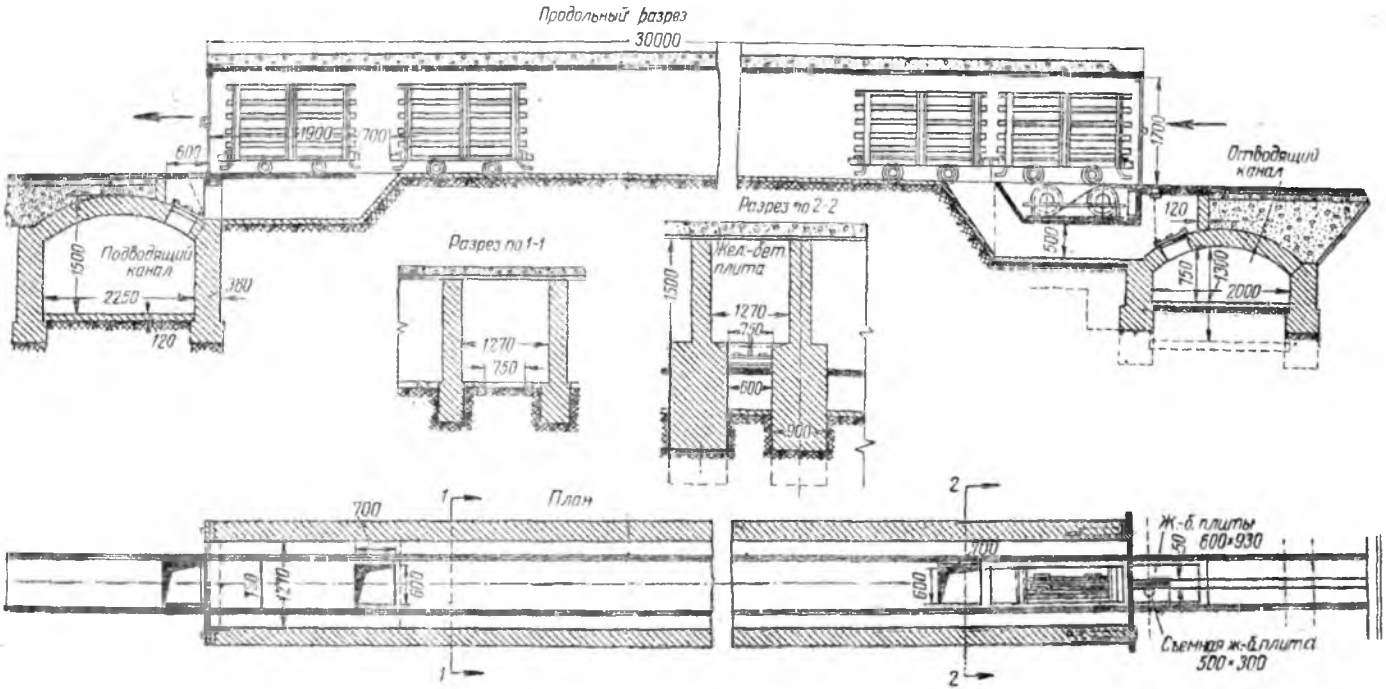


Рис. 88. Туннельная противоточная сушилка (план и разрезы).

ложному, откуда подаются горячий воздух или дымовые газы для сушки.

Для улучшения работы противоточного туннеля рекомендуется, чтобы зазоры между перекрытием туннеля и верхним рядом садки на вагонетках, а также между боковыми стенками и садкой были минимальными—не более 40—50 *мм*. Это влияет на равномерность сушки. Чем меньше величина зазоров и чем больше количество проходящих газов, тем равномернее сушится сырец в туннеле.

Для достижения определенной производительности сушилки и равномерной сушки необходимо пропускать через сушилку большие объемы газов с возможно большей скоростью.

При загрузке и выгрузке кирпича из туннеля необходимо прекращать подачу в него газов. В противном случае получаются большие потери воздуха и тепла, а при использовании дымовых газов воздух в рабочих помещениях загрязняется продуктами горения топлива.

Сушилка Н. И. Артемкина (рис. 89) является противоточной туннельной сушилкой с оригинальным устройством для устранения неравномерности сушки по высоте туннеля. Это достигается путем перемены направления движения воздуха, для

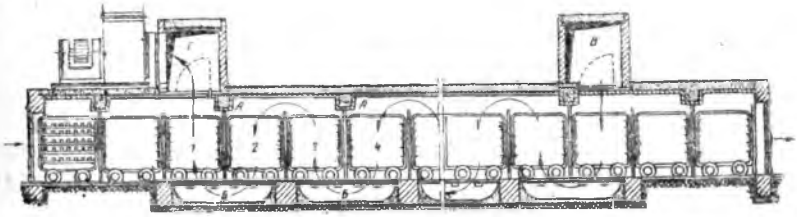


Рис. 89. Сушилка системы Н. И. Артемкина.

чего по длине туннеля в потолке устраивают поперечные выступы *А*, а в полу, под рельсовыми путями,—приямки *Б*. Каждый выступ приходится посредине приямка, а расстояние между двумя выступами точно соответствует длине двух вагонеток с сырцом. С одной торцовой стороны все вагонетки снабжены сплошными съемными щитами, закрывающими пространство от выступов *А* до головки рельсов. Благодаря щитам, выступам и приямкам, воздух, подаваемый в туннель из канала *В*, идет зигзагами (показано стрелками) и удаляется в канал *Г*. По мере продвижения вагонеток по туннелю изменяется направление движения воздуха через сырец.

Если в положении, показанном на рис. 89, воздух через сырец в вагонетке *1* проходит снизу вверх, а в вагонетке *2*—сверху вниз, то при перемещении всего состава на одну вагонетку вперед вагонетка *3* станет на место вагонетки *2*, а вагонетка

2—на место вагонетки *1*. При этом в вагонетке *3* воздух будет уже проходить сверху вниз, а в вагонетке *2*—снизу вверх. Таким образом сырец каждой вагонетки омывается воздухом то сверху вниз, то снизу вверх. Благодаря этому обеспечивается равномерность сушки по высоте туннеля.

Многоярусные роликовые сушилки для листовых материалов. Для сушки плит больших размеров (гипсовой штукатурки, древесно-волокнистых плит и др.) применяют туннельные сушилки, в которых плиты перемещаются не на вагонетках, а на роликовых транспортерах. На заводах гипсовых досок применяется сушилка следующего устройства (рис. 90).

Сушилка общей протяженностью 81 *м* разделяется на три отделения (зоны), каждая из которых имеет свою самостоятельную систему нагрева, нагнетания и циркуляции горячего воздуха. По высоте туннеля, внутри каркаса сушилки, расположены шесть рядов (ярусов) роликов, по которым перемещаются плиты, последовательно подаваемые на каждый ярус специальным загружателем. Ролики представляют собой пустотелые трубы диаметром 76 *мм*, на концах которых насажены звездочки, приводимые в движение цепями через редуктор от электродвигателя.

В зависимости от числа оборотов роликов (в соответствии с продолжительностью сушки) скорость движения плит изменяется в пределах от 0,85 до 1,7 *м/мин*. Срок сушки — от 40 до 80 мин. при начальной влажности плит 30% и конечной—1,5%. Сушку плит производят горячим воздухом. Температура воздуха в сушилке: в первой зоне при входе—145—150°, при выходе—130—140°; во второй зоне при входе—150—160°, при выходе—130—140°; в третьей зоне при входе—130—135°, при выходе—60—70°.

Воздух в сушилке нагревают радиаторами и калориферами. Радиаторы располагаются горизонтальными батареями над и под каждым из шести ярусов рольганга. Всего в сушилке 7 ярусов труб. Они располагаются секциями по 182 трубы с поверхностью нагрева 67,6 $м^2$. В первой зоне 7 секций, во второй—9, в третьей—16.

Калориферы установлены вне сушилки, на перекрытии каждой зоны. Поверхность нагрева калорифера 255 $м^2$. Воздух, нагнетаемый вентилятором, проходит между трубами калорифера, нагревается и поступает в сушилку.

В начале первой зоны создается воздушный затвор для ограничения засоса наружного воздуха в сушилку. Свежий воздух необходим для замены части увлажненного воздуха, удаляемого из сушилки в атмосферу. Количество воздуха, поступающего в сушилку для воздухообмена и удаляемого в атмосферу, автоматически регулируется.

Воздух в этой зоне сушилки циркулирует под действием вентилятора, засасывающего воздух из первого отделения и нагне-

тающего его через калорифер по боковым отводам вновь в сушилку. Через сопла, расположенные по семи ярусам сушилки, воздух распределяется параллельными потоками над высушиваемыми изделиями.

Проходя между ярусами, воздух нагревается воздухонагревателями. Количество поступающего воздуха в каждый ярус можно регулировать шибером у каждого сопла.

Вторая и третья зоны устроены аналогично первой, но отличаются от нее устройством воздухоподогревателей и длиной.

В первой зоне движение изделий и воздуха происходит по принципу противотока, а во второй и третьей — прямотока.

3. СРАВНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ СУШИЛОК

Оценка системы сушилки производится, главным образом, по качеству выпускаемой продукции и по экономичности ее работы. Сушилки должны выпускать определенное количество высококачественного материала при наименьшей затрате топлива и энергии.

Для сравнительной оценки работы сушилок различных систем могут служить следующие показатели: 1) равномерность сушки; 2) тепловая экономичность работы сушилки; 3) легкость регулирования режима сушки; 4) стоимость сооружения и обслуживания сушилки.

Равномерность сушки

В результате сушки количество влаги, оставшейся в материале, расположенном в различных местах сушилки, может быть неодинаково. Это объясняется неравномерностью процесса сушки в различных местах сушилки.

Равномерность сушки в камерных сушилках. Сырец, размещенный в разных частях сушильной камеры, сушится неодинаково. В местах, где сырец омывается более горячим или сухим воздухом, или большим количеством его, он сохнет быстрее, чем в местах, куда попадает мало воздуха. Разница в скорости сушки в различных местах камерной сушилки характеризует равномерность сушки и измеряется коэффициентом неравномерности сушки.

Отношение срока, в течение которого высыхает сырец в месте самой медленной сушки, к сроку сушки сырца в месте самой быстрой сушки, называется коэффициентом неравномерности сушки.

Чем больше коэффициент неравномерности, тем хуже работа камерной сушилки, так как общий срок сушки увеличивается. Это вызывает излишний расход тепла.

Неравномерность сушки сильно зависит от длины пути, который должен проходить воздух в камере, от способа подачи воздуха, а также от циркуляции воздуха в сушилке.

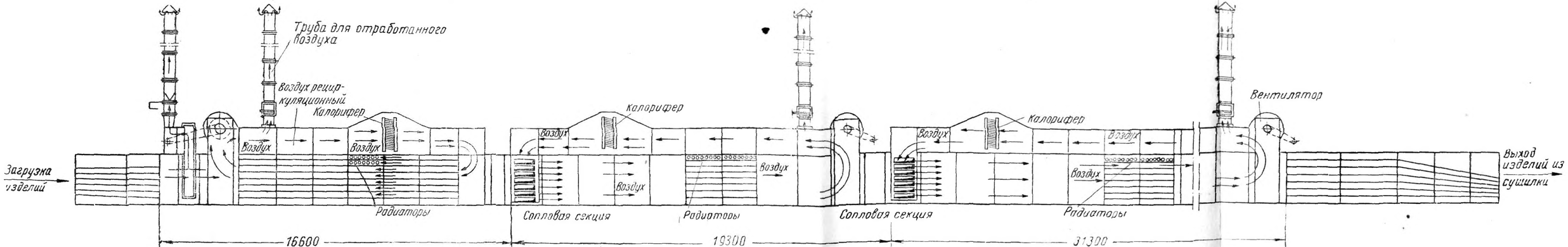


Рис. 90. Многоярусная роликовая сушилка для листовых материалов.

Зак. 1058

Сырец, находящийся в начале пути воздуха, сохнет скорее, чем сырец, расположенный в конце пути. Это происходит потому, что по мере омывания сырца воздух охлаждается и насыщается влагой, а это понижает его сушильные свойства. Чем длиннее путь, проходимый воздухом в камере, тем больше времени будет сохнуть сырец в конце камеры.

Практикой работы камерных сушилок кирпичных заводов установлено, что из-за большой неравномерности сушки невыгодно делать камеры длиной более 15 *м*. Обычно длина камер принимается 8—10 *м*.

В средней части поперечного сечения камеры сырец высыхает значительно медленнее, чем в остальных ее частях. Процесс сушки протекает неравномерно не только по поперечному сечению, но и по длине камер. Для обеспечения равномерной сушки по длине камеры необходимо, чтобы количество газов, входящих в камеру через отверстие, было одинаковым по всей длине камеры. Это зависит от правильного подбора величины отверстий для подачи и отвода газа и распределения их. Для того, чтобы обеспечить достаточную скорость выхода газа в камеру, площадь подводящих отверстий должна составлять $^1/_3$—$^1/_4$ площади поперечного сечения канала, проходящего вдоль камеры. Площадь отдельных отверстий по длине канала различная.

В сушилке Росстромпроекта перекрытие подводящих каналов устраивается из керамических плит, а перекрытие отводящего канала—из деревянных дощечек, укладываемых поперек камер. Часто встречающееся на заводах перекрытие отводящего канала, устроенное из досок, расположенных вдоль камеры между рельсами для въезда вагонетки, следует признать совершенно неприемлемым.

Коэффициент неравномерности для сушилок «Росстромпроекта» в среднем равен 2,5.

Так как равномерность сушки в значительной степени определяется количеством газов, циркулирующих в камере, то большое значение имеет степень постоянства количества газов, поступающих в камеру. Всякого рода неплотности в дверях и в ограждающих поверхностях сушилки способствуют подсасыванию в камеру наружного воздуха. Необходимо принимать все меры к обеспечению герметичности сушильной камеры.

Равномерность сушки в туннельных сушилках. В отличие от камерных сушилок в туннельных сушилках при установившемся процессе работы принятый режим поддерживается автоматически. Для этого достаточно соблюдать порядок загрузки вагонеток и сохранять постоянные параметры и количество теплоносителя. В туннельных сушилках неравномерность сушки по поперечному сечению туннеля может получиться вследствие естественного стремления наиболее горячих и, следовательно, наиболее легких газов подниматься кверху. Особенно это явление заметно при движении небольшого количества нагретых газов,

когда они заполняют не все сечение туннеля, а только верхнюю часть его. Вследствие этого сырец вверху вагонеток сохнет быстрее, чем внизу, т. е. сушка идет неравномерно.

Чем большее количество газов протекает по туннелю, тем больше он заполняется и, следовательно, тем равномернее сушка сырца по высоте туннеля.

Практика работы противоточных туннельных сушилок с полочными вагонетками показывает, что для устранения неравномерности по высоте туннеля скорость газов должна быть не менее 1,8—2 *м/сек*.

Тепловая экономичность сушилок

Тепловая экономичность сушилки, определяемая расходом тепла и воздуха на испарение 1 *кг* влаги, зависит от степени насыщения и температуры воздуха. Чем выше степень насыщения воздуха, уходящего из сушилки, тем больше его использование и тем лучше работает сушилка.

Повышенный расход воздуха в сушилках влечет за собой увеличение объемов вентиляции и расхода энергии на вентилятор, т. е. также требует дополнительных затрат топлива.

Так как с повышением температур способность воздуха поглощать влагу резко возрастает, то в тепловом отношении выгодно повышать температуру воздуха, входящего в сушилку, если это допускают свойства высушиваемого материала.

Тепловая экономичность туннельных сушилок значительно выше камерных, из которых воздух к концу процесса сушки уходит с очень небольшим насыщением и с повышенной температурой. В туннельных же сушилках уходящий воздух используется лучше.

Регулирование режима сушки

Возможность получения определенного режима сушки является очень важным моментом, характеризующим совершенство конструкции сушилки. Если в сушилке можно легко изменять температуру, степень насыщения и количество воздуха во время сушки, то в ней легко установить требуемый режим, который дает возможность получить высококачественную продукцию.

Длительность сушки определяется оптимальным режимом, т. е. совокупностью величин, обеспечивающих наивыгоднейшие условия сушки. К ним относятся: температура, степень насыщения, скорость движения теплоносителя, а также влажность и свойства самого материала.

Увеличение скорости сушки может быть достигнуто повышением температуры и увеличением количества теплоносителя. Температура теплоносителя зависит от природы и свойств высушиваемого материала, определяется технологическими условиями

и не должна отражаться на качестве высушенного материала. Например, при очень высоких температурах сушки материал может потерять пластичность; возможны также физико-химические изменения его (потеря летучих при сушке угля) и т. п.

У некоторых материалов при интенсивном испарении на поверхности может образоваться корка, замедляющая в дальнейшем ход испарения. Она же может стать причиной порчи формованных изделий. При сушке же кусковых и сыпучих материалов, где появление трещин и распадение отдельных кусков не играет роли, можно с самого начала сушки применять высокие температуры.

При одной и той же влажности материала и интенсивном перемешивании температура теплоносителя может быть сильно повышена. Например, при сушке угля в барабанных сушилках при параллельном токе температура газов может достигать 700°, а в трубосушилке дробленый мелкий уголь оказалось возможным сушить при температуре газов до 1000°.

Насыщая теплоноситель водяными парами, можно замедлить влагоотдачу с поверхности изделия, одновременно ускорив прогрев его, повысить температуру и тем самым усилить движение влаги к поверхности изделия и предотвратить образование трещин и короблений.

Увеличение скорости и количества теплоносителя сокращает длительность сушки, так как ускоряется влагообмен между материалом и газом и улучшаются условия теплопередачи при увеличении коэффициента теплоотдачи. При большой скорости движения теплоносителя материал интенсивно омывается, с поверхности его удаляется образующийся тонкий слой насыщенного влагой газа.

Большое значение имеют при этом условия обтекания материала и соответствие циркуляции теплоносителя способу укладки материала. При сыпучем, пористом или волокнистом материале наиболее интенсивная сушка получается при продувке газа через слой. Длительность сушки при этом сокращается в несколько раз по сравнению с сушкой при направлении теплоносителя вдоль слоя.

При расположении материала параллельными рядами на некотором расстоянии друг от друга (при сушке плит; при сушке изделий в туннельных сушилках) минимальная длительность сушки получается при продувании газа вдоль слоя.

При большой скорости теплоносителя повышается средняя температура сушки, уменьшается температурный перепад, что благоприятно отражается на всем процессе.

Повышенная скорость значительно уменьшает неравномерность сушки в отдельных частях сушилки, благодаря этому сокращается общий срок сушки.

За последние годы длительность искусственной сушки сырца в производстве кирпича и других изделий строительной керамики

резко сокращена. Это достигнуто применением пароувлажнения глиняной массы и изменением прежних режимов сушки.

Применение пара для увлажнения глиняной массы повышает ее температуру до 45—50° за счет выделения скрытой теплоты парообразования при конденсации пара. Повышение температуры массы уменьшает вязкость воды, облегчает продвижение ее внутри сырца и резко ускоряет процесс сушки. Кроме того, повышение температуры сырца устраняет необходимость предварительного прогрева. Как показал опыт работы ряда заводов, срок сушки сокращается до 50%, а качество сырца намного улучшается.

В качестве теплоносителя при сушке строительных материалов используется главным образом смесь дымовых газов с наружным воздухом. Сушка дымовыми газами значительно сокращает расход топлива и дает возможность применять высокие температуры, тем самым сокращая и длительность сушки. При этом особое внимание должно быть обращено на обеспечение полного сгорания топлива и очистки газов от золы и сажи. Это достигается соблюдением правильного топочного режима в зависимости от применяемого топлива, а также устройством улавливателей пыли и золы.

Глава IV

УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПОДАЧИ И ОТВОДА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В СУШИЛКАХ

Движение газа в сушилках может происходить естественным путем или при помощи искусственной тяги.

1. ВЫТЯЖНЫЕ УСТРОЙСТВА

Для получения естественной тяги служат дымовые трубы и вытяжки. Так как разность температур внутри сушилки и наружного воздуха невелика, то и разрежение, создаваемое естественными устройствами, весьма незначительно.

Очень высокие вытяжки неудобны в строительном отношении, поэтому применяют специальные усилители тяги. К числу их относятся так называемые дефлекторы.

В настоящее время весьма распространен дефлектор «Звезда» (рис. 91). Он представляет собой цилиндрическую насадку. Цилиндр не сплошной, он образован несколькими (семью) согнутыми специальным образом металлическими пластинками, между которыми остаются щели расширяющегося сечения. Принцип ра-

боты дефлектора основан на том, что воздух, омывающий цилиндрическую поверхность, вызывает положительное давление на одной части окружности цилиндра и отрицательное—на остальной. В то время как в часть щелей будет нагнетаться воздух, в остальных происходит усиленная вытяжка. Изогнутая форма пластин уменьшает сопротивление воздуха при входе в насадку. Разрежение, создаваемое дефлектором подобного типа при высоте его 2 *м*, составляет около 1—2 *мм* вод. ст.

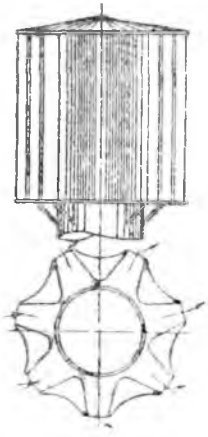


Рис. 91. Дефлектор «Звезда».

Для искусственного передвижения газов в сушильных установках применяют центробежные или осевые вентиляторы, описанные в третьем разделе учебника.

2. РАБОТА СУШИЛОК ПОД ПОЛОЖИТЕЛЬНЫМ И ОТРИЦАТЕЛЬНЫМ ДАВЛЕНИЕМ

Сушильная камера обычно не может быть сделана герметически закрытой: неплотности в дверях, заслонках и других частях конструкции неизбежны. При отрицательном давлении в сушилке через эти неплотности засасывается воздух в сушилку, а при положительном давлении—выбивается воздух из сушильной камеры. Засасывание холодного воздуха, вызывая значительное снижение температуры, влечет за собой удлинение срока сушки материала. Выбивание воздуха при положительном давлении меньше влияет на равномерность сушки, но может вызвать весьма нежелательные последствия при сушке дымовыми газами, так как в этом случае создаются антисанитарные условия для работы обслуживающего персонала.

Необходимо следить за герметичностью сушильных камер. Для обеспечения чистоты воздуха в помещении сушилки при сушке дымовыми газами следует поддерживать в камерах небольшое отрицательное давление, порядка 1—2 *мм*.

3. ИСТОЧНИКИ ТЕПЛА ДЛЯ СУШИЛОК

В качестве источника тепла для сушилок применяют специальные топки или используют отходящие газы печей.

Топки сушильных установок несколько отличаются от топок печей. Они всегда являются топками полного сгорания: сжигание топлива в них всегда происходит с большим избытком воздуха. Дымовые газы после выхода из топки должны освобождаться от искр и пыли в пылеосадительных камерах и искрогасителях. Такая топка показана на рис. 92. Искрогаситель представляет собой циклон, сложенный из кирпича. Газы поступают

через окна в нижней его части. При большой скорости входа газов в циклон и большой длине соприкосновения с раскаленными стенками несгоревшие частицы догорают, а зола выпадает в карманы.

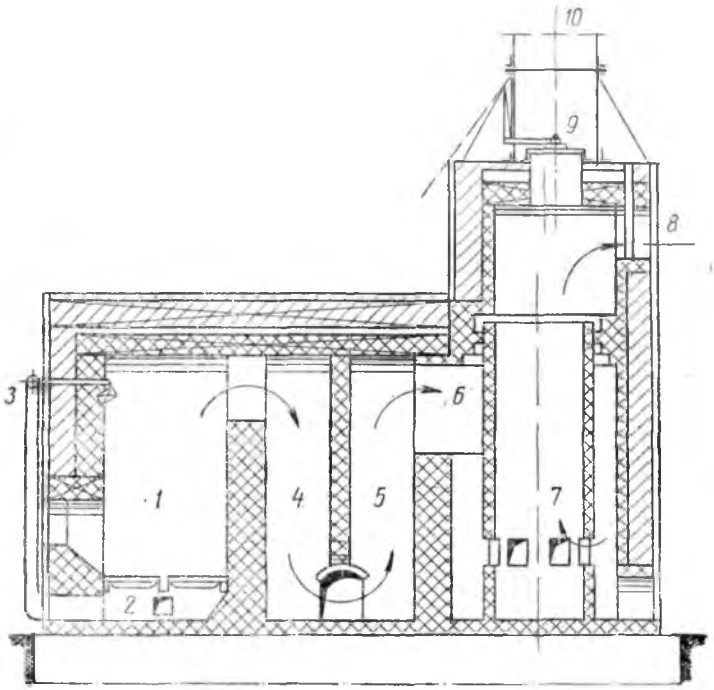


Рис. 92. Топка для сушилки: *1*—топка; *2*—зольник; *3*—труба для подачи вторичного воздуха; *4* и *5*—пылеосадительные камеры; *6*—вход в искрогаситель; *7*—искрогаситель; *8*—выход газа в сушилку; *9*—клапан; *10*—труба для растопки.

Температура дымовых газов, образующихся в топке, значительно выше, чем требуется для сушки материалов. Поэтому после выхода из топки газы смешиваются с холодным воздухом. Не следует пропускать все количество воздуха через топку: при этом увеличивается неполнота горения и резко повышается унос золы из топок.

Для нагревания воздуха применяют огневые или паровые калориферы.

Огневые калориферы. Трубчатые калориферы, обогреваемые дымовыми газами, сходны с рекуператорами, описанными выше (в четвертом разделе). Они состоят из топки и калориферной камеры (рис. 93).

На рис. 94 показан трубчатый воздухонагреватель, устанавливаемый на некоторых кирпичных заводах для отопления сушилок. Стальные трубы длиной 4,3 *м* ввальцованы в две решетки, образуя систему с общей поверхностью нагрева 295 $м^2$.

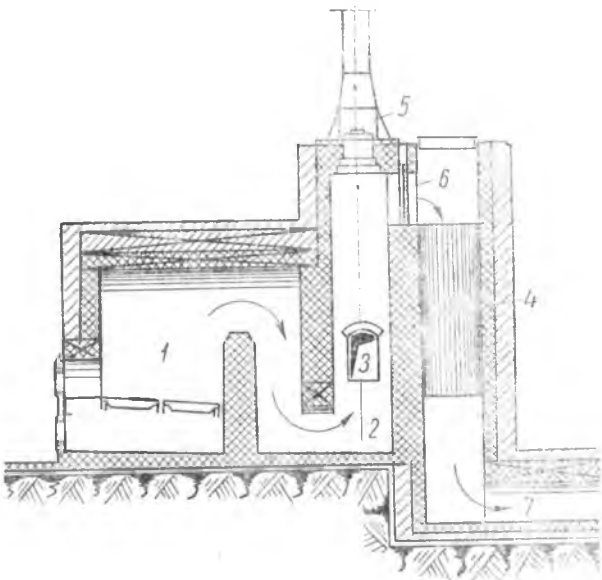


Рис. 93. Установка трубчатого воздухонагревателя для сушилки: *1* — топка; *2* — смесительная камера; *3*—окно для входа наружного воздуха; *4*—трубчатый воздухонагреватель; *5*—труба для удаления газов; *6*—шибер; *7*—дымоход.

Дымовые газы из подтопка проходят внутри труб и удаляются наружу вентилятором. Трубы заключены в металлический кожух, разделенный горизонтальной перегородкой на две части. Холодный воздух поступает в верхнюю часть кожуха, омывает трубы снаружи, проходит в нижнюю часть и отсасывается другим вентилятором в сушилку. Для лучшего и равномерного омывания труб при проходе воздуха в кожухе установлены направляющие лопатки.

Паровые калориферы. Различают несколько видов паровых калориферов: калориферы из гладких и ребристых труб и пластинчатые.

Наибольшее распространение получили пластинчатые калориферы (рис. 95). Отличительная особенность их состоит в том, что на параллельные пучки трубок, в которых проходит горячий пар или вода, надеты и припаяны плоские пластинки прямоугольного сечения. Воздух протекает мимо пластин и благода-

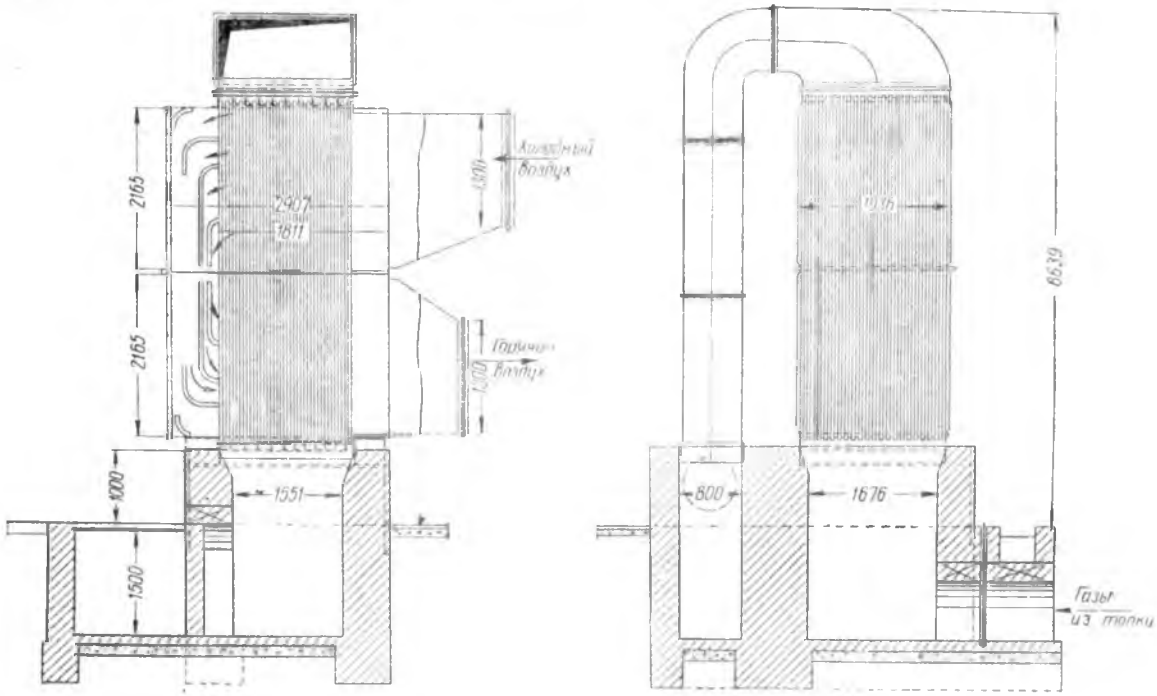


Рис. 94. Трубчатый воздухонагреватель.

ря их большой поверхности быстро нагревается. Одним из достоинств этих калориферов является также их компактность.

Использование тепла отходящих из печей газов для сушилок. Большое количество тепла для использования в сушилках на за-

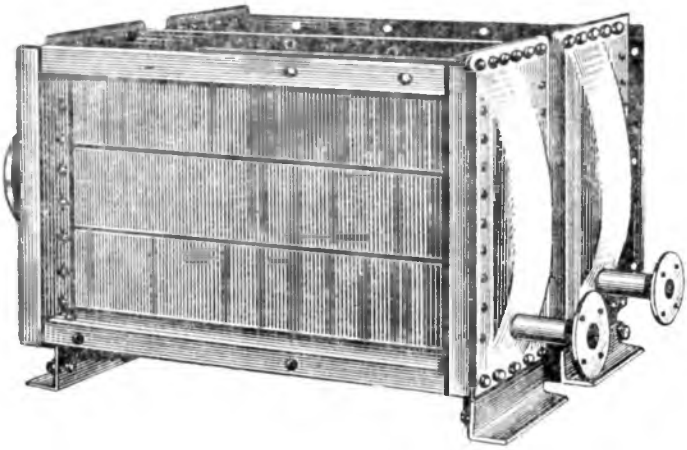


Рис. 95. Пластинчатый калорифер.

водах строительных материалов могут дать обжигательные печи. При правильной организации теплового хозяйства завода этого тепла может оказаться достаточно для полного покрытия потребности сушилок в нем.

В случае недостатка тепла необходимо иметь запасное устройство. Для этого устраивают дополнительные топки, конструкции которых приведены выше.

Глава V

РАСЧЕТ СУШИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТРЕБНОЙ СУШИЛЬНОЙ ПЛОЩАДИ

Размер сушильной площади определяется в зависимости от производительности завода и срока сушки.

При естественной сушке определение числа сараев производят в зависимости от вида применяемых сараев. Для стеллажных сараев учитывают число оборотов сарая в сезон; для простых бесстеллажных сараев расчет ведется по съему в штуках в сезон с 1 $м^2$ площади сушильного сарая. Число оборотов равняется продолжительности сезона (в днях), деленной на длительность (в днях) сушки сырца в сарае. Число оборотов и съем с 1 $м^2$ меняются в зависимости от климатических условий

района. Данные по различным областям приведены в приложении VIII.

Длина стеллажных сараев определяется по формуле:

$$L = \frac{A}{B \cdot n},$$

где: A—производительность завода за сезон в шт.;
B—емкость сарая на 1 *м*, в шт.;
n — число оборотов за сезон.

Длина каждого сарая должна быть: стеллажного—не более 100 *м*, механизированного—не более 25 *м*.

Площадь бесстеллажных сараев определяется по формуле:

$$F = \frac{A}{m},$$

где: F—общая площадь сараев в $м^2$;
A—производительность завода за сезон;
m— съем с 1 $м^2$ сарая в сезон.

Ширина бесстеллажного сарая составляет 4—8 *м*. Соответственно определяется и длина сараев.

При искусственной сушке определение числа камер для периодических сушилок производится по формуле:

$$\boxed{N = \frac{AC}{B},} \qquad (135)$$

где: N — число сушильных камер;
A — суточная производительность завода в шт.;
C — срок сушки в сутках;
B — емкость камеры в шт.

Кроме того, 2—3 камеры находятся под загрузкой и разгрузкой.

Для сушилок непрерывного действия расчет производительности туннеля ведется по формуле:

$$\boxed{A = \frac{B}{C},} \qquad (136)$$

где B—вместимость туннеля в шт. (значения A и C те же, что и выше).

Вместимость туннеля B зависит от его длины:

$$B = KL,$$

где: K—емкость туннеля в шт. на 1 *м* длины;
L—общая длина туннелей для данной производительности завода.

Подставляя выражение для B в уравнение (136), получаем выражение для длины туннеля:

$$L = \frac{AC}{K}.$$

Обычно общая расчетная длина туннельной сушилки разбивается на несколько туннелей, число которых n равно всей длине, деленной на длину отдельного туннеля l:

$$n = \frac{L}{l}.$$

2 ВЫБОР УСТАНОВКИ ДЛЯ ПОДАЧИ ТЕПЛА И ВОЗДУХА

Расход тепла и воздуха определяется по принятым начальным и конечным параметрам воздуха. Способ определения удельных расходов воздуха и тепла был изложен в главе II «Расчет сушильного процесса». Тепловой расчет необходимо производить как для зимнего, так и для летнего времени, причем расходы тепла и воздуха принимаются по наибольшим значениям. Сначала определяют теоретические расходы воздуха и тепла, затем переходят к определению действительного расхода с учетом потерь в сушилке.

Зная расход тепла на испарение 1 *кг* влаги и производительность сушилки, можно определить мощность установки для получения соответствующего количества тепла. При этом необходимо учесть возможность использования тепла отходящих газов из печей.

Сушилка может работать под давлением или под разрежением; в зависимости от этого выбирают производительность дутьевого и вытяжного вентиляторов.

Пример сокращенного теплового расчета сушильного барабана. Рассчитать сушильный барабан для сушки гранулированного шлака производительностью 10 *т* в час. Начальная влажность шлака $W_н = 30\%$ при температуре $t'_{шл} = +5°$, конечная — $W_к = 1\%$ при температуре $t''_{шл} = 125°$.

Сушка смесью дымовых газов и воздуха $t_{см} = 700°$. Температура газов при выходе из барабана $t_г = 150°$.

Выбор барабана

При часовой производительности барабана в 10 *т* высушенного шлака с остаточной влажностью 1% абсолютно сухого шлака в час будет выходить:

$$\frac{10000 \cdot 100}{100 + 1} = 9800 \text{ кг}.$$

Часовое количество удаляемой влаги:

$$\frac{9800\ (30-1)}{100} = 2870 \text{ кг}.$$

Принимая объемное напряжение барабана по влаге 50 *кг/м³* час, получим объем барабана:

$$2870 : 50 = 57{,}4 \ м^3.$$

Это соответствует (см. табл. 27) барабану 2,2 · 14 *м*. Число оборотов барабана $n=5$ об/мин и потребная мощность—20 *л. с.*

Определение потерь тепла

1. На нагрев материала и остаточной влаги. На 1 *кг* испаренной влаги приходится:

а) абсолютно сухого шлака:

$$9800 : 2870 = 3{,}47 \ кг;$$

б) остаточной влаги

$$(10000 - 9800) : 2870 = 0{,}07 \ кг.$$

Потери на нагрев шлака и остаточной влаги, отнесенные к 1 *кг* испаренной влаги, составят:

$$q_m = (3{,}46 \cdot 0{,}2 + 0{,}07 \cdot 1)(125 - 5) = 0{,}76 \cdot 120 = 92 \ кг/кг.$$

2. Потери в окружающую среду. Точная величина потери определяется по законам теплопередачи в отдельных участках барабана. При этом задаются средней температурой на каждом участке. В среднем можно принять, по данным испытаний, общую потерю на излучение 50 *ккал/кг*.

Всего теплопотери на 1 *кг* испаренной влаги составят:

$$\Sigma_q = 92 + 50 = 142 \ ккал/кг.$$

Определение расхода тепла и газов на 1 *кг* испаренной влаги

Удельный расход воздуха и тепла рассчитываем графически по *I—d*-диаграмме.

Сушка производится смесью дымовых газов от сжигания антрацита с наружным воздухом (расчет горения топлива см. разд. II). Действительная температура горения 1100°.

Влагосодержание топочных газов подсчитываем по формуле:

$$d_{газ} = \frac{d_в G_в + G_{в.п.}}{G_{с.г.}},$$

где: $d_в$ —влагосодержание воздуха, поступающего на горение; в среднем при 0° принимаем равным 3 *г/кг*, т. е. $\varphi = 80\%$;

$G_в$ —количество воздуха в *кг* на 1 *кг* топлива (равно 15,3 *кг/кг*);

$G_{в.п}$ —вес водяных паров, образовавшихся от сгорания водорода и при испарении гигроскопической влаги топлива $(9H+W)$, равен 0,4 *кг/кг*;

$G_{с.г}$ —вес сухих газов из 1 *кг* топлива равен 15,9 *кг/кг*.

$$d_{газ} = \frac{3 \cdot 15{,}3 + 0{,}4 \cdot 1000}{15{,}9} = 28 \ г/кг.$$

Характеристику смеси топочных газов при $t=1100°$ и $d=28$ *г/кг* с наружным воздухом определяем по *I —d*-диаграмме, исходя из метеорологических условий 0° и $\varphi = 80\%$.

Согласно построению процесса смешения в *I—d*-диаграмме (рис. 96), получим точку *B'*, характеризующую параметры газовоздушной смеси $t=700°$ и $d=18$ *г/кг*.

Строим процесс теоретической сушки $B'C_0$ и определяем расход сухих газов на 1 *кг* испаренной влаги:

$$l = \frac{1000}{C_0D_0} = \frac{1000}{225} = 4{,}46 \text{ кг/кг}.$$

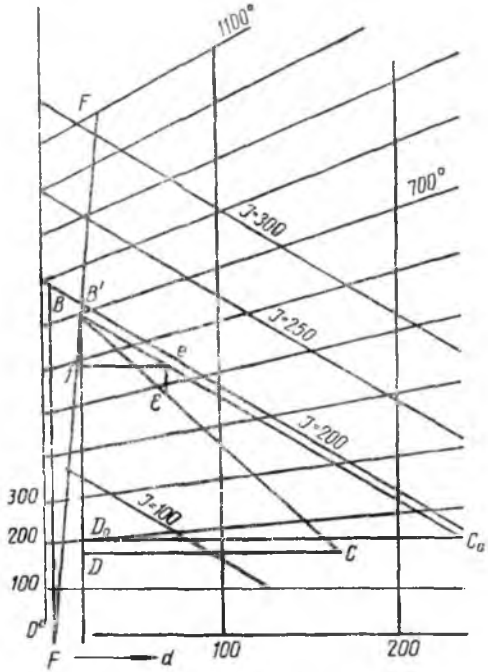


Рис. 96. Построение процесса сушки в I—d-диаграмме.

Расход тепла по топливу при начальной температуре влаги +5°:

$$q = 500\,\frac{AB}{C_0D_0} - 5 = 500\,\frac{380}{225} - 5 = 750 \text{ ккал/кг}.$$

Для построения действительного процесса сушки отложим вспомогательный отрезок:

$$eE = \frac{ef \cdot 142}{500} = \frac{150 \cdot 142}{500} = 4{,}26 \text{ мм},$$

где 500=m—для малой диаграммы.

Отложив его вниз, получим направление луча действительного процесса сушки. Пересечение луча $B'E$ с заданной температурой процесса t=150° определит точку C конечного состояния газов при выходе из барабана.

Удельный действительный расход сухих газов

$$l' = \frac{1000}{201} = 5{,}0 \text{ кг/кг}.$$

Расход газов с начальным влагосодержанием $d_0=28$ *г/кг*:

$$l_0 = 5{,}0\,(1 + 0{,}001 \cdot 28) = 5{,}13 \text{ кг/кг}.$$

Расход тепла топлива:

$$q = 500\,\frac{AB}{CD} = 500\,\frac{380}{201} = 950 \text{ ккал/кг}.$$

Часовой расход газов:

$$L = l_0 \cdot W = 5{,}1 \cdot 2870 = 17\,500 \text{ кг}.$$

Часовой расход тепла:

$$Q = q \cdot W = 950 \cdot 2870 \sim 2740000 \text{ ккал}.$$

По величине $Q=2740000$ *ккал/час* выбирают размеры топки, а по величине $L=17500$ *кг/час*—производительность вентилятора.

Определение размеров топки

Принимая к. п. д. топки равным 0,9, получим расход условного топлива в час:

$$\frac{2740\,000}{0{,}9 \cdot 7000} = 435 \text{ кг}.$$

При натуральном топливе донецкий антрацит с $Q_н^р=7100$ *ккал/кг* часовой расход топлива составит:

$$\frac{435 \cdot 7000}{7100} = 430 \text{ кг}.$$

Напряжение горизонтальной колосниковой решетки при ручной загрузке топлива с искусственным дутьем принимаем 100 *кг/м²*, откуда площадь колосниковой решетки:

$$\frac{430}{100} = 4{,}3 \text{ м}^2.$$

Принимаем три топки с колосниковой решеткой шириной 1 *м* и длиной 1,5 *м*.

Подбор вентилятора

Для подачи воздуха в топку устанавливаем дутьевой вентилятор. Производительность его определяем по часовому расходу топлива и возможности получения избытка воздуха $\alpha=2$. Для антрацита теоретическое количество воздуха:

$$L_m = \frac{1{,}1 \cdot Q^р}{1000} = 7{,}8 \text{ м}^3/\text{кг},$$

следовательно, часовая производительность дутьевого вентилятора составит:

$$7{,}8 \cdot 2 \cdot 430 = 6\,650 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Учитывая сопротивление слоя топлива и преодоление сопротивления по пути движения воздуха, принимаем общее сопротивление в 90 *мм* вод. ст.

По номограмме (см. рис. 22) подбираем вентилятор № 4 среднего давления. Мощность электродвигателя составит:

$$N = 1{,}2\,\frac{Q \cdot h}{3600 \cdot 102 \cdot 0{,}55 \cdot 0{,}9} = 1{,}2\,\frac{6650 \cdot 90}{3600 \cdot 102 \cdot 0{,}55 \cdot 0{,}9} = 4{,}1 \text{ квт}.$$

Производительность вентилятора для удаления отработанных газов определяем по количеству газов для сушки с учетом 15% подсосов.

Объем газов при температуре 150° составит:

$$V_г = 1{,}15\ \frac{17500 \cdot 423}{1{,}3 \cdot 273} \cong 24000\ м^3/час$$ (1,3 — объемный вес газов при 0°).

Характеристика вентилятора определяется с учетом всех сопротивлений по пути движения газов. В общее сопротивление, преодолеваемое вентилятором, входят:

1) сопротивление газовых путей от топки до входа в сушильный барабан;

2) сопротивление сушильного барабана;

3) сопротивление от места выхода газов из барабана до вентилятора;

4) сопротивление пылеотделительных устройств.

Подсчет сопротивлений по пунктам 1 и 3 производится по общим правилам, изложенным в разделе III. Сопротивление сушильного барабана составляет от 10 до 15 *мм* вод. ст., а сопротивление пылеотделительных устройств определяют в зависимости от выбранного типа устройств.

По суммарному сопротивлению и производительности подбирают номер и тип вентилятора аналогично тому, как это показано для дутьевого вентилятора.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОВТОРЕНИЯ К СЕДЬМОМУ РАЗДЕЛУ

1. Какова роль воздуха при воздушной тепловой сушке?
2. Как выражается абсолютная и относительная влажность воздуха?
3. Что такое влагосодержание воздуха и как оно измеряется?
4. Чему равняется теплосодержание влажного воздуха?
5. Опишите устройство *I—d*-диаграммы.
6. Как изображается в *I—d*-диаграмме процесс смешения дымовых газов с воздухом?
7. На какие периоды распадается процесс сушки материалов?
8. Что характеризуют кривые сушки?
9. Как изображается в *I—d*-диаграмме процесс сушки с возвратом отработанного воздуха?
10. Как изображается в *I—d*-диаграмме процесс с подогревом воздуха?
11. Напишите формулу для определения числа сушильных камер.
12. Опишите сушилки системы Росстромпроекта.
13. Опишите работу сушильного барабана; как определить его размеры?
14. Как устроена туннельная сушилка?
15. Какие источники тепла для сушилок применяются в промышленности строительных материалов?

РАЗДЕЛ ВОСЬМОЙ

ПЕЧИ ДЛЯ ОБЖИГА СТРОИТЕЛЬНОЙ КЕРАМИКИ

Глава I

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПЕЧАХ

Промышленные печи представляют собой устройства для высокотемпературной обработки материалов, при которой в них происходят физико-химические изменения.

В подавляющем большинстве в печах используется тепло от сжигания топлива.

В ряде случаев применяется электронагрев.

Печи обычно состоят из топки, где происходит образование тепла и рабочей камеры, в которой тепло передается нагреваемому материалу. Кроме того, в печах всегда предусматривают тяговые устройства для удаления отработанных газов после окончания процесса передачи тепла.

Перечисленные элементы не всегда одинаково развиты в отдельных типах печей. В некоторых случаях отдельные элементы могут быть объединены: например, топка и обжигательный канал в кольцевых печах и т. п.

Топка. Топочное устройство должно соответствовать виду топлива, для сжигания которого оно предназначено, и обеспечивать получение необходимого количества тепла. Взаимное расположение топки и рабочей камеры печи зависит от конструкции и назначения печи (наиболее распространенные конструкции топок были рассмотрены в шестом разделе).

Обжигательная камера является рабочей частью печи. В ней происходит процесс передачи тепла обжигаемому материалу. Размеры и форма обжигательной камеры должны обеспечивать бесперебойное движение газов в камере и равномерную передачу тепла.

Передача тепла может происходить, как известно, теплопроводностью, конвекцией и излучением. В зависимости от конструкции печей каждый из этих способов используется в различной степени.

Режим обжига определяется температурной кривой. Так называют график в прямоугольной системе координат, изображающий изменение температуры в печи во время обжига (рис. 97).

На оси абсцисс откладывают время—длительность обжига в часах, на оси ординат—температуру, соответствующую определенным моментам времени.

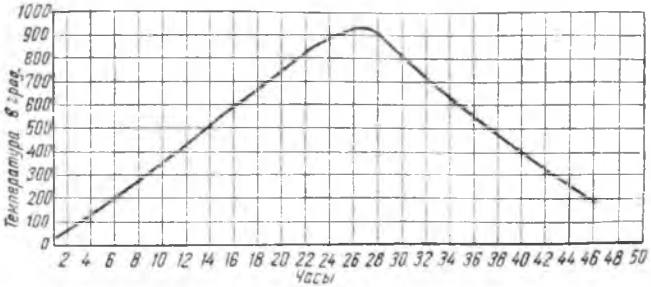


Рис. 97. Температурная кривая обжига кирпича в туннельной печи.

Форма и размеры обжигательной камеры зависят от вида обжигаемых материалов и выбираются в соответствии с мощностью и характером производства так, чтобы обеспечить высокое качество изделий и необходимую производительность печи.

Тяговые устройства также зависят в известной мере от мощности и характера производства. В простейших печах отходящие газы направляются непосредственно из печной камеры в

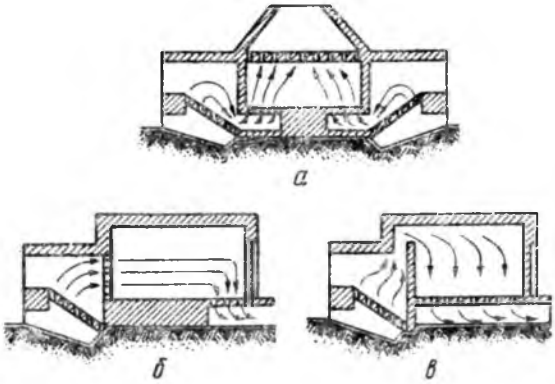


Рис. 98. Типы печей периодического действия.

атмосферу (напольные печи), но в большинстве печей газы перемещаются по системе каналов с помощью специальных тяговых устройств (дымовые трубы и вентиляторы). Независимо от типа, тяговое устройство должно обеспечивать полное удаление газообразных продуктов.

Классификация печей. Все печи, применяющиеся в промышленности строительных материалов для обжига, могут быть разделены на печи периодического и непрерывного действия.

В печах периодического действия в каждый данный момент по всей печи происходит только одна какая-нибудь стадия процесса обжига (загрузка, нагрев, охлаждение, выгрузка). В печах непрерывного действия процесс обжига протекает непрерывно, причем в разных частях печи одновременно происходят различные стадии обжига. Оба типа печей могут быть, в свою очередь, разделены на несколько групп в соответствии с особенностями конструкции. Печи периодического действия делятся на три группы: а) печи с восходящим движением газов; б) печи с горизонтальным движением газов и в) печи с нисходящим движением газов (рис. 98). Печи непрерывного действия делятся на: 1) печи, в которых обжигаемый материал неподвижен, а перемещается зона обжига, и 2) печи, в которых зона обжига остается неизменной, а перемещается материал.

Глава II

ПЕЧИ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

Печи периодического действия применяют для обжига керамических изделий. Печи состоят из обжигательной камеры, в которой происходит нагрев изделий за счет сжигания топлива в топках, расположенных по периферии печи; в этой же камере происходит и охлаждение изделий. Горизонтальное сечение камер—круглое или прямоугольное. Камеры загружают для обжига и выгружают обожженную продукцию через ходки в стенах.

По окончании загрузки эти ходки закладывают временными кирпичными стенками, которые разбирают по окончании обжига. Основное различие между отдельными конструкциями печей заключается в направлении движения пламени в обжигательной камере (см. рис. 98).

Печи периодического действия—наименее экономичные из всех видов печей. Расход топлива в них очень велик, так как процессы обжига идут без использования тепла отходящих из печи газов. Нормальный расход условного топлива на обжиг черепицы в таких печах составляет 8—10%, шамотных изделий—28—35% от веса обожженных изделий; для канализационных труб расход топлива достигает 90%. В печах большого объема расход топлива несколько меньше, чем в малых печах, так как потери топлива на аккумуляцию стенами и в окружающую среду на единицу изделий уменьшаются с увеличением объема печи.

Основным достоинством печей периодического действия является возможность осуществлять в них требуемый режим обжига в зависимости от качества сырья, как в отношении температуры обжига, так и характера пламени, поскольку в этих печах легко получить окислительную и восстановительную атмосферу.

Камерные печи периодического действия применяют для обжига изделий большого размера и сложной формы, требующих особо тщательного режима обжига, а также в производствах с разнообразным ассортиментом изделий, изготовляемых в небольших количествах.

1. РАВНОМЕРНОСТЬ ОБЖИГА В ПЕЧАХ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ И МЕРЫ ДЛЯ ЕЕ ПОВЫШЕНИЯ

Наиболее распространены периодические печи с нисходящим потоком газов (рис. 99). Они применяются преимущественно для обжига глиняной черепицы, гончарных труб, огнеупорных и кислотоупорных изделий. По сравнению с другими типами периодических печей, они отличаются наибольшей равномерностью обжига.

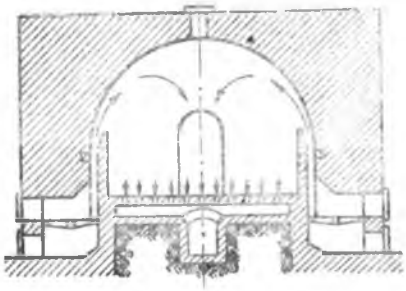


Рис. 99. Печь периодического действия с нисходящим потоком газов.

Причинами неравномерного распределения температур по высоте печи могут быть: 1) плохое перемешивание газов при выходе из топки в обжигательную камеру и расслоение газов из-за этого (горячие газы будут всегда стремиться кверху, а к поду печи будут опускаться только наиболее холодные потоки); 2) остывание опускающегося потока газов по мере отдачи тепла материалу; 3) разрежение на поду печи, вызывающее подсос холодного воздуха через неплотности в кладке.

Неравномерности в вертикальном направлении устраняются прежде всего улучшением обслуживания топок. В первый период обжига рекомендуется пропускать через печь по возможности большее количество газов. Для обеспечения тщательного перемешивания воздуха и топочных газов скорость выхода их из топочных вылетов в печь должна быть значительной. В периоды наивысшего подъема температур хорошие результаты дает перенесение горения непосредственно в обжигательную камеру с применением полугазовых топок и при подводе вторичного воздуха.

Неравномерность температур по горизонтальным сечениям печи является следствием главным образом конструктивных

недостатков самой печи—неправильного отвода газов. Из-за этого получается неравномерное распределение газов при выходе в отдельных частях пода. В зависимости от сопротивлений, которые встречают газы при своем движении, в различных участках горизонтального сечения протекает неодинаковое количество газов. Сопротивления эти складываются из сопротивления садки, подовых отверстий и подподовых каналов. Наибольшее значение имеет сопротивление подовых отверстий.

Устранение или уменьшение неравномерности температур в горизонтальных сечениях может быть достигнуто уменьшением общего сечения подовых отверстий (для получения в них значительного сопротивления сравнительно с сопротивлением дымовых и подподовых каналов) или изменением сечений отверстий в отдельных частях пода печи.

Сечения подподовых каналов выбирают так, чтобы скорость в них была не более 2—3 *м/сек*. Отводящий канал следует располагать таким образом, чтобы разрежение в различных местах пода было одинаковым.

Неравномерность распределения температур в периодически действующих печах наблюдается не только во время нагрева и обжига, но и при охлаждении. Для устранения неравномерности охлаждения рекомендуется подвод холодного воздуха делать снизу, а отвод нагретого—сверху. Вход холодного воздуха можно расположить на дымовом канале между шибером и стенами печи, а отбор производить через отверстия в своде. В этом случае помимо равномерности достигается также значительное ускорение процесса охлаждения печи.

2. РАЗМЕРЫ И КОНСТРУКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ПЕЧЕЙ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

Тепловая мощность топок определяется по максимальной потребности в тепле, совпадающей обычно с периодом получения наивысшей температуры обжига, когда топки в течение короткого промежутка времени работают наиболее интенсивно.

Площадь колосниковых решеток, размер дымовых каналов, мощность вытяжных установок для обеспечения нормальной работы необходимо определять по максимальному расходу топлива. Средний часовой расход топлива равен отношению полного расхода топлива за все время обжига к продолжительности обжига:

$$B_{ср} = \frac{G}{Z}, \qquad (137)$$

где: $B_{ср}$ —средний расход топлива на весь обжиг в *кг*;
G —вес сожженного топлива в *кг*;
Z —длительность обжига в часах.

Отношение между максимальным и средним расходом топлива меняется в зависимости от рода топлива и обжигаемых материалов. Это отношение при сжигании дров и каменных углей составляет: для кирпича и черепицы—1,5—2,5; кислотоупорных сосудов—2,5; канализационных труб—4—5.

По характеру обжига часто бывает необходимо перенести частично дожигание продуктов неполного горения из топки непосредственно в рабочую камеру печи. Для этих печей часто применяют полугазовые топки.

Камеры периодических печей выполняются круглой и прямоугольной формы. В печах круглой формы поверхность и вес стен, приходящиеся на единицу объема, меньше, чем в печах прямоугольной формы. Вследствие этого расход тепла на аккумуляцию кладкой и потери через стенки в круглых печах меньше. Такие печи более экономичны.

Влияние формы печи на удельный расход топлива сказывается сильнее в печах небольшого объема (до 100 $м^3$). С увеличением объема периодических печей влияние формы на удельный расход топлива уменьшается.

Объемы рабочих камер периодических печей для строительной керамики находятся в пределах 60—200 $м^3$.

Увеличение объема печей ведет к уменьшению удельного расхода топлива. Предел увеличения объема печи определяется возможностью получения равномерного обжига.

Высота камер определяется свойствами обжигаемого материала и обычно равна 2,5 —4 *м*. Ширина камеры определяется, главным образом, возможностью получения равномерного обжига изделий. При односторонне расположенных топках для печей прямоугольного сечения ширина принимается не более 3 *м*; при расположении топок с обеих сторон печи ширина прямоугольных камер может быть увеличена. В круглых печах при расположении топок по периферии диаметр камер доходит до 10 *м*.

Производительность периодически действующих печей зависит от продолжительности обжига в них и сильно возрастает с уменьшением общего периода времени, затрачиваемого на весь процесс.

3. ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПЕЧЕЙ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

Периодически действующие печи характеризуются большим удельным расходом топлива. Основными причинами этого являются значительные потери с отходящими газами, с теплом, аккумулированным кладкой печи, и с теплом, теряемым при охлаждении нагретого материала.

Потери с отходящими газами в зависимости от размера печи и рода обжигаемого материала достигают 25—50% всех по-

терь тепла. Чем выше температура обжига, тем большее значение приобретает потеря с отходящими газами.

Тепло, аккумулированное кладкой печи, также составляет значительную величину в тепловом балансе.

Для уменьшения потерь тепла во внешнюю среду стены печей делают значительной толщины (1—1,5 *м*). Это вызывает большой расход тепла на аккумуляцию кладкой. Расход на аккумуляцию и потери в окружающую среду доходит до 30% общего расхода, изменяясь также в зависимости от размеров печи. Для малых печей потеря относительно выше, чем для больших.

Потеря в окружающую среду может быть уменьшена применением наружной тепловой изоляции. Этот способ хотя и дает снижение температуры наружной поверхности, но вызывает повышение средней температуры кладки, т. е. увеличение затраты тепла на аккумуляцию.

Лучшие результаты дает применение тепловой изоляции кладки стен и сводов печей из легковесных огнеупоров, обладающих небольшой теплопроводностью и теплоемкостью. При таком устройстве кладки толщина стены получается значительно меньше, чем обычно. Температура кладки тоже понижается, так как легковесные огнеупоры плохо проводят и аккумулируют тепло.

В круглой периодической печи с внутренней футеровкой из пеношамота общая толщина стен составляет 710 *мм* вместо 1100 *мм* при обычном огнеупоре. В печах такой конструкции снижение расхода топлива составляет более 20%.

Значительную часть в тепловом балансе занимает также тепло обожженного материала.

В сумме все указанные потери тепла составляют от 50 до 80% общего расхода топлива. Поэтому особо важное значение для уменьшения общего расхода топлива в производстве приобретают средства, направленные к использованию этого тепла.

4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОТХОДЯЩЕГО ТЕПЛА В ПЕЧАХ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

Использование тепла дымовых газов в рекуператорах. Тепло дымовых газов может быть использовано для подогрева воздуха. Это имеет особенное значение при использовании низкосортного твердого или газового топлива и необходимости получать высокие температуры в печи. В этом случае применение горячего воздуха дает возможность получить более высокие температуры обжига.

Для подогрева воздуха в большинстве случаев применяются рекуператоры: индивидуальные — для отдельной печи или групповые — для нескольких печей.

Индивидуальные рекуператоры из керамических трубчатых элементов располагают непосредственно под подом печи. Это повышает использование тепла, так как отсутствуют потери газа и воздуха по пути до рекуператора и из него. Такая конструкция применяется в камерных печах для обжига крупных керамических изделий (брусья для стекловаренных печей и др.). Недостаток индивидуальных рекуператоров — трудность их осмотра и ремонта вследствие малой доступности.

В групповых рекуператорах, при условии приключения достаточного количества печей, может быть достигнута равномерная, постоянная температура воздуха. Групповые рекуператоры дают хороший коэффициент использования тепла при невысокой температуре нагрева воздуха и очень удобны в случае потребности в воздухе не только для горения, но и для сушильных или отопительных устройств.

Использование тепла остывающего материала. Тепло остывающего материала используется в большинстве случаев так же, как и в рекуператорах, т. е. для сушильных установок или для отопительных целей. В некоторых случаях это тепло направляют для предварительного подогрева материала в соседних периодических печах.

Выбор системы использования тепла отходящих газов и охлаждения материала следует производить на основании тщательного изучения теплового баланса предприятия. Необходимо точно выявить не только запасы тепла, но и экономическую целесообразность проектируемого устройства. Например, при значительном понижении температуры газов в рекуператоре степень их использования возрастает. Однако при этом сильно повышается стоимость рекуператора вследствие увеличения его поверхности.

Глава III

ПЕЧИ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ С ПОДВИЖНОЙ ЗОНОЙ ОБЖИГА И НЕПОДВИЖНЫМ МАТЕРИАЛОМ

1. МНОГОКАМЕРНЫЕ ПЕЧИ

Многокамерные печи представляют собой дальнейшее развитие блокированных печей периодического действия.

Принцип действия многокамерных печей (рис. 100) заключается в следующем: два ряда камер, соединенных друг с другом и расположенных по обе стороны сборного дымового канала, с которым каждая камера соединена коротким вспомогательным каналом с шибером, образуют непрерывное кольцо. Каждая камера в отдельности представляет периодически действующую печь с нисходящим пламенем, но газы из камеры не

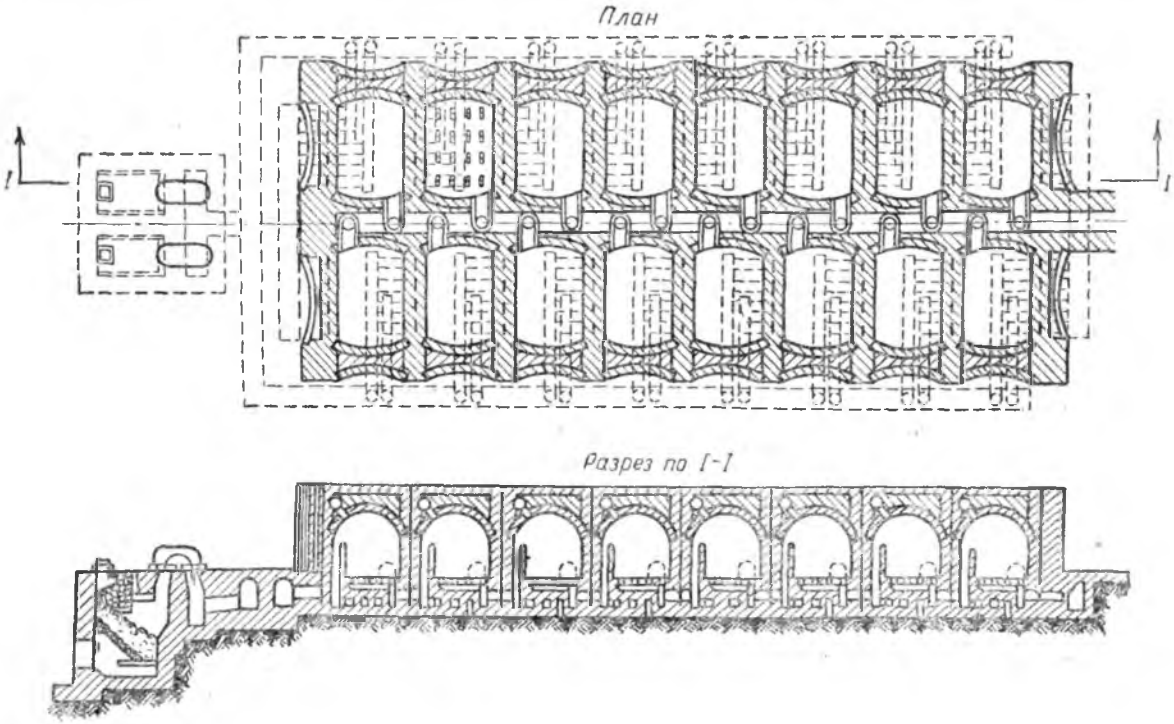


Рис 100. План и разрез многокамерной печи.

уходят в дымовой канал, а предварительно направляются в соседние камеры. Таким образом, тепло, содержащееся в отходящих дымовых газах, из одних камер используется для подогрева изделий, находящихся в других камерах, расположенных впереди по ходу огня. Так же используется и тепло от остывающих изделий для подогрева воздуха. Благодаря лучшему использованию тепла многокамерные печи работают экономичнее периодических.

При установившемся процессе в одних камерах происходит сжигание топлива, в других — подогрев материала за счет тепла отходящих газов из первых камер, а в камерах, где горение топлива закончилось, обожженные изделия остывают. В этих печах, как и во всех печах непрерывного действия, различают три зоны: зону подогрева, зону обжига и зону охлаждения. Сырец загружают в пустые камеры впереди зоны подогрева, а обожженные изделия выгружают из крайней камеры зоны охлаждения.

После окончания обжига в камерах зоны обжига, топливо начинает сжигаться в следующей камере зоны подогрева, а дымовые газы протягиваются в камеру со свеженасаженным сырцом. Для включения новой камеры поднимают шибер, соединяющий камеру с дымовым каналом.

На рис. 101 показаны камеры печи с подовым отводом газов. Через систему отверстий, расположенных в поду, газы перехо-

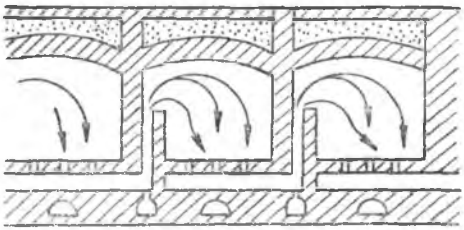


Рис. 101. Схема камер с отводом газов через под.

дят из одной камеры в другую и затем поступают в главный дымовой канал, расположенный посредине печи между двумя рядами камер (см. рис. 100).

Наибольшее распространение для отопления многокамерных печей получило газообразное топливо. Поэтому многокамерные печи часто называют газокамерными. Газ проходит отдельными каналами по обе стороны печи и передается в камеры через небольшие подводящие каналы. Для этого открывают газовые вентили. В зависимости от ширины камеры газовые горелки устраиваются либо с одной стороны (см. рис. 101), либо, для

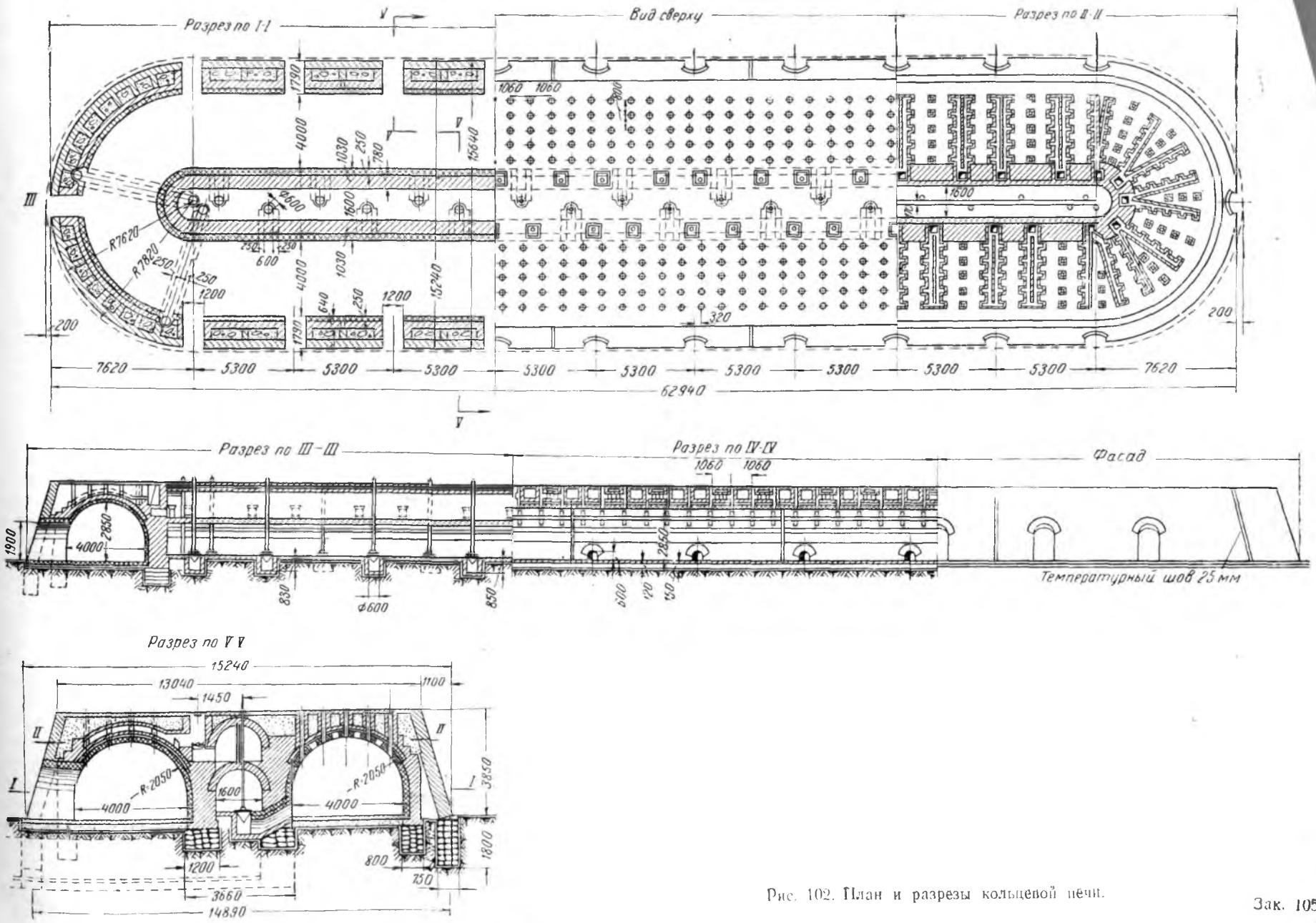


Рис. 102. План и разрезы кольцевой печи.

достижения большей равномерности обжига, — по обе стороны камеры.

К горелкам подается горячий воздух из камер, находящихся на охлаждении. Продукты горения, пройдя через камеру, направляются через подовые щели в сборный канал. Оттуда они попадают либо в соседнюю камеру, либо через вспомогательный канал в общий дымовой канал.

В газокамерных печах газы движутся под действием дымовой трубы или вентилятора. Поперечные стенки и соединительные каналы в печах с подподовым отводом газов создают значительное сопротивление при движении газов. Это затрудняет работу при большом количестве камер в зоне подогрева, так как требующееся необходимое в этом случае значительное разрежение неизбежно вызывает большие присосы воздуха. По этой причине, а также из-за сильного снижения температуры газов вследствие аккумуляции тепла в подподовом устройстве, газокамерные печи работают с короткой зоной подогрева (не больше 3—4 камер) и с небольшими скоростями огня.

Движение газа в камере сверху вниз и хорошее перемешивание газов при переходе из одной камеры в другую обеспечивают достаточно равномерный нагрев изделий.

На тепловую экономичность многокамерных печей сильно влияет большой расход тепла на аккумуляцию кладкой, так как только незначительная часть этого тепла используется для нагрева воздуха, идущего на горение, а бо́льшая его часть теряется. Весьма значительны также потери тепла с отходящими газами. Это зависит не только от их температуры, но также и от больших подсосов воздуха в этих печах. Многокамерные печи применяют преимущественно для изделий, требующих высокой температуры обжига: например, дорожного клинкера и керамических плиток для полов, обжиг которых происходит до полного спекания.

2. КОЛЬЦЕВЫЕ ПЕЧИ

В настоящее время кольцевые печи применяют главным образом в производстве глиняного кирпича и черепицы. Кольцевая печь (рис. 102) представляет собой длинный замкнутый, перекрытый сводом канал без перегородок. Между внутренними стенами, вдоль большой оси, в простенке расположен канал для отвода дымовых газов. Отдельные части печного канала соединяются с дымовым каналом при помощи соединительных канальцев (боровков) и металлических клапанов (конусов). Соединительные боровки могут быть расположены как во внутренней стене печи, так и в наружной. В первом случае они носят название прямых боровков, во втором — обратных.

В наружных стенах печи имеются ходки для загрузки, по окончании которой их заделывают временными кирпичными

стенами. Расстояние по длине канала между осями двух ходков условно называют камерой.

При загрузке камеры отделяются одна от другой бумажными ширмами. Отдельные камеры включают и выключают сверху печи подъемом или опусканием конусов.

На рис. 103 изображена схема работы кольцевой печи. Несколько камер находится на огне, т. е. в них производятся загрузка топлива и его сжигание. Дымовые газы, подвигаясь из

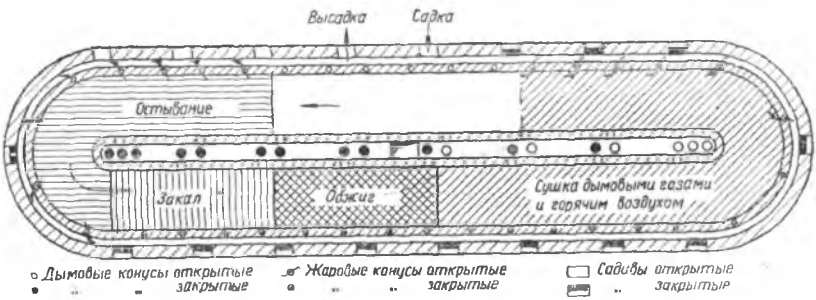


Рис. 103. Схема работы кольцевой печи.

этих камер вперед по направлению к дымовой трубе, обогревают насаженный в следующих по направлению огня камерах сырец, подготовляя его таким образом к обжигу при высокой температуре. По другую сторону камер, находящихся на огне, расположены камеры с остывающим кирпичом. Холодный воздух входит в открытые ходки камеры, где происходит выгрузка, и, проходя через обожженный материал, отнимает от него тепло, понижая тем самым его температуру. Проходя далее вперед в зону обжига, воздух участвует в процессе сжигания топлива.

В большинстве случаев общее количество воздуха, идущего на охлаждение материала, значительно больше потребного для сжигания топлива. Поэтому часть воздуха может отбираться на сторону. В кольцевых печах для обжига кирпича излишек горячего воздуха часто используют для подсушки свеженасаженного сырца до подогрева его дымовыми газами. В эти камеры воздух передается по особому каналу, называемому жаровым.

В крайнюю камеру впереди зоны подогрева производится садка сырца, выгрузка обожженных изделий—из крайней камеры зоны охлаждения. Для облегчения маневрирования с транспортом между камерами загрузки и выгрузки одна или две камеры остаются свободными.

Дымовые газы, отдавшие тепло для подогрева свеженасаженного сырца, удаляются в дымовой канал. Это достигается следующим путем: при загрузке материалов в печь камеры от-

деляются бумажными щитами, которые не дают газам проходить вдоль канала. В камере, из которой газы удаляются, конус на канальце, соединяющем камеру с главным дымовым каналом, открывается, и под действием тяги дымовой трубы газы поступают в главный дымовой канал. Если зона обжига должна продвинуться вперед, то разрывают ширму, отделяющую последнюю камеру с сырцом, находящуюся на подогреве дымовыми газами, от остальной части печи; в следующей камере открывают конус, и газы направляются в остальную часть печи. Ширма при этом сгорает, и камера включается в общий процесс обжига.

Таким образом всю печь можно разделить на три основные зоны: 1) зона, в которой происходит подогрев свеженасаженного материала за счет тепла газов, уходящих из зоны горения; 2) зона обжига, в которой происходит сжигание топлива; 3) зона охлаждения, в которой изделия после пребывания в зоне обжига и достижения соответствующей температуры остывают.

Во многих случаях при обжиге строительного кирпича в кольцевых печах имеется, помимо этих трех зон, четвертая зона—зона досушки, в которой свеженасаженный сырец подсушивается горячим воздухом из зоны охлаждения.

В процессе обжига положение отдельных зон меняется по мере продвижения огня вдоль печи. Расстояние в метрах, на которое зона обжига передвигается в течение суток, называется скоростью огня. При обжиге кирпича скорость огня доходит до 40 *м/сутки*.

Количество камер в кольцевой печи, а также соотношение между отдельными зонами могут значительно меняться. В среднем общее число камер колеблется от 14 до 22, но имеются печи с бо́льшим числом камер—до 36. В этом случае работа происходит на два огня, т. е. в одной и той же печи одновременно имеются по две зоны подогрева, обжига и охлаждения.

Обычные размеры камер в кольцевой печи: высота—до 3 *м*, ширина — 2,0—4,5 *м*, длина—от 2,5 до 5 *м*. Уточнение длины камеры должно производиться в соответствии с особенностями обжигаемого материала. Например, при обжиге кирпича размер камеры определяется в зависимости от длины кирпича и числа его рядов.

Сжигание топлива. В кольцевых печах топливо сжигается непосредственно среди обжигаемых изделий. Загрузка топлива производится через топливные трубки, расположенные в своде печи, причем для обжига в этих печах могут применяться все виды твердого топлива. Непосредственно под топливными трубочками устраивают из сырца топочные шахты, в которых и происходит сгорание топлива. Устройство топочных шахт зависит от вида сжигаемого топлива: при дровах топочной шахтой служит свободное пространство между отдельными частями садки; при угле и торфе под трубочками устраивают специальные

решетки в виде столбиков из сырца. Выступы сырца по высоте шахты задерживают забрасываемое топливо, которое, таким образом, сгорает по всей высоте печи.

Наряду с засыпкой топлива через топливные трубочки и сжиганием его непосредственно на изделиях в кольцевых печах широко применяют способ обжига с запрессовкой топлива в сырец. Топливо вводится в виде тонко размолотого порошка при подготовке глиняной массы, причем в сырец вводится до 70% общего количества топлива, потребного на обжиг. Остальная часть загружается через топливные трубочки. Как показал опыт ряда заводов, такой способ сжигания топлива дает большое увеличение производительности печи при улучшении качества кирпича.

Кольцевые печи можно отапливать и газом. В этом случае отпадает необходимость в устройстве отдельных топочных шахт, и газ сгорает в промежутках между рядами садки. В качестве горелок для газа применяют дырчатые трубы, которые служат для распределения газа по высоте камеры. Применяют верхний и нижний подвод газа из газопровода в печь.

Большое влияние на расход топлива, равномерность обжига и качество получаемой продукции оказывает правильное ведение обжига. Важно не загружать топливо большими порциями, а вести равномерную засыпку его небольшими количествами через определенные небольшие промежутки времени. При этом топливо рекомендуется засыпать не подряд во все топливные трубочки, а через один ряд, чередуя последовательность засыпки трубочек.

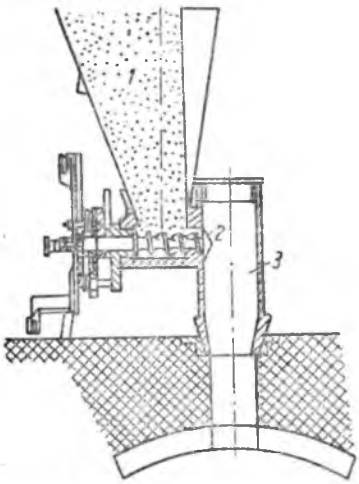


Рис. 104. Автоматический загрузчик топлива: *1*—бункер; *2*—шнек; *3*—топливная трубка.

Автоматические загрузчики топлива. Для улучшения загрузки и горения топлива в кольцевых печах и обеспечения равномерности его подачи применяют аппараты для механической загрузки топлива, так называемые шур-аппараты. Все применяющиеся конструкции автоматических загрузочных аппаратов предназначены для засыпки мелкого топлива. Механизм состоит из бункера для топлива и устройства для его равномерной засыпки.

Имеется ряд конструкций, одна из которых показана на рис. 104. Из бункера, где хранится запас топлива на несколько часов, оно подается небольшими порциями шнеком в топливные трубочки через вспомогательный цилиндр. Скорость подачи топлива

регулируется числом оборотов винта. В крышке цилиндра вставлено стекло для наблюдения за горением. Автоматические аппараты присоединяются к специальной трансмиссии, проходящей по верху печи и приводимой в движение от электродвигателя. Механизмы присоединяются с помощью штанг к трансмиссии (рис. 105). По мере передвижения огня по печи аппараты снимаются с трубочек, где засыпка топлива прекращается, и перевозятся на тележках или переносятся вручную к другим камерам, поэтому вес аппарата не должен быть большим (около 25—30 *кг*). Потребная мощность электродвигателя невелика (1—1,5 *л. с.* на всю установку).

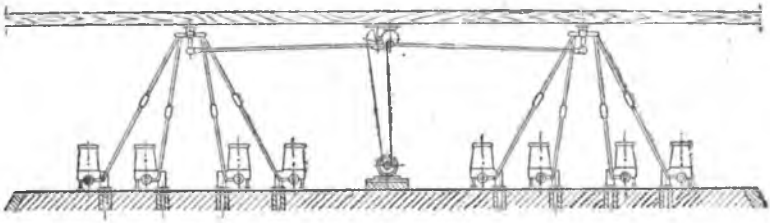


Рис. 105. Привод загрузчиков топлива кольцевых печей.

Применение автоматов для загрузки топлива улучшает процесс горения и дает 15—20% экономии в расходе топлива.

Новаторы производства выявили чрезвычайно важное значение обжига на комбинированном топливе для получения высокой производительности печи. При таком способе обжига в начальной стадии употребляется легко воспламеняющееся топливо, богатое горючими летучими веществами. Получается длинное пламя, обогревающее значительное количество рядов садки. В заключительной же стадии обжига, в которой требуется получение высокой температуры, лучше применять топливо, бедное горючими летучими веществами, и сосредоточить выделение тепла на небольшом пространстве. Для этого целесообразнее использовать антрацитовый штыб, который получил широкое применение при обжиге сырца в кольцевых печах.

Тяга в кольцевых печах. Движение газов в кольцевых печах происходит под действием тяги, создаваемой дымовой трубой или дымососом.

Значительные скорости огня, характерные для работы кольцевых печей, в настоящее время были получены как результат усиления тяги. Если раньше кольцевые печи имели только сравнительно невысокие дымовые трубы (20—40 *м*), то в настоящее время в большинстве кольцевых печей либо сооружены высокие дымовые трубы (до 60 *м*), либо установлены мощные дымо-

сосы. В соответствии с этим скорость огня при обжиге кирпича составляет 20—40 *м* в сутки.

Независимо от увеличения мощности вытяжного устройства, необходимо правильно использовать разрежение в печи. Очень большое значение для этого имеет система садки изделий, резко влияющая на величину сопротивления при проходе газов.

Работа новаторов кирпичного производства П. А. Дуванова, И. Я. Мазова, И. Г. Мукосова и других выявила огромное влияние системы садки на режим обжига и производительность кольцевых печей.

Обобщение передового производственного опыта и результатов научно-исследовательских работ в этой области приводят к следующим выводам.

Производительность обжигательных печей, и в частности кольцевых, зависит от условий теплообмена в них. Теплообмен в отдельных зонах печей происходит различными способами передачи тепла: в зонах подогрева и охлаждения главным образом путем конвекции, в зоне обжига — преимущественно лучеиспусканием.

Для улучшения теплообмена в зонах подогрева и охлаждения, в целях усиления конвективной теплопередачи, необходимо увеличивать скорость газового потока.

Скорость движения газов в печи, в свою очередь, зависит, с одной стороны, от величины разрежения в печи, создаваемого дымовой трубой или дымососом, и, с другой,—от сопротивления садки. Увеличить скорость газов можно или усилив тягу, или уменьшив сопротивление садки.

При больших скоростях газового потока выгоднее работать с более плотной садкой, обеспечивающей лучшие условия теплообмена между газами и садкой и наиболее высокие съемы кирпича с обжигательного канала печи.

При наличии тяговых устройств, позволяющих создавать сильную тягу в печи, можно допускать плотность садки кирпича до 300 *шт/м*^{3} и более. Подтверждением этого является опыт мастера обжига М. Я. Тоскаевой (Новосибирск), работающей на печи, оборудованной мощными дымососами, что позволяет достигать большой скорости газов при плотной садке и обеспечивать высокую производительность печи.

Применяемая П. А. Дувановым редкая садка наглядно показала, что возросшая за счет уменьшения сопротивления скорость огня резко улучшает условия теплообмена и, несмотря на уменьшение плотности садки, способствует увеличению производительности печи.

До внедрения скоростных методов обжига считали, что плотная садка всегда выгодна, так как позволяет снять больше кирпича с объема печи. В действительности же оказалось, что применение разреженной садки резко снижает сопротивление ее при проходе газов и тем самым позволяет увеличить количество

воздуха, поступающего в печь через зону остывания. А это в свою очередь позволяет сжигать больше топлива и ускорять процесс обжига. Скорость огня при этом возрастает настолько, что съемы становятся более высокими, чем при плотной садке. Ускоряется также охлаждение обожженного кирпича, что облегчает условия его выгрузки (рис. 106).

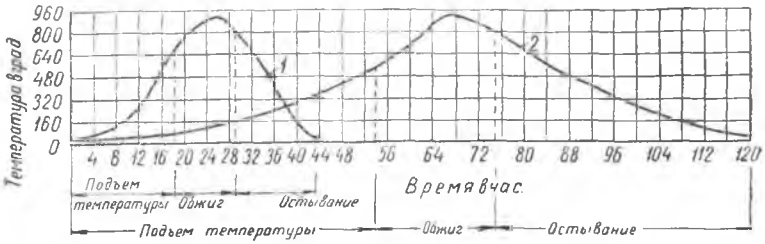


Рис. 106. Температурные кривые обжига кирпича в кольцевых печах: *1*—скоростной обжиг по методу П. А. Дуванова; *2*—обжиг при плотной садке и удлиненной зоне обжига.

Плотность садки по методу Дуванова составляет 180—200 шт. на 1 $м^3$, при расстоянии между отдельными кирпичами 4—6 *см*.

Основные особенности садки по методу П. А. Дуванова заключаются в следующем: взамен ранее применявшейся садки под топливными трубочками с чередующимися рядами кирпича поперек и вдоль длинной оси печи, для колосников применяют кирпичи, уложенные с небольшим уклоном только вдоль печи. В основной части садки кирпичи ставят по высоте со скосом в правую и левую сторону поочередно, а кирпичи в смежных рядах — торец в торец. Отказ от поперечных рядов в колосниковой садке резко снизил сопротивление.

Все разнообразные системы садки кирпича могут быть разделены на две группы: однородные и неоднородные.

Неоднородные системы садки состоят из нескольких различных элементов (рис. 107): ножек, перекрытия, колосников и основной елки, расположенной между топливными трубочками печи. Однородные системы садки кирпича не имеют вышеуказанных элементов и носят совершенно одинаковый характер по всей печи.

Исследования, проведенные институтом «РОСНИИМС» для выявления величины сопротивления движению газов различных типов садки, показали, что наилучший тип садки — однородные

---

[1] РОСНИИМС — сокращенное название Республиканского научно-исследовательского института местных строительных материалов МПСМ РСФСР.

садки, в которых отсутствуют ножки и специальные топливные колосники.

Наряду с этим, наименьшее сопротивление показали садки с увеличенным сечением каналов между кирпичами. Такова, на-

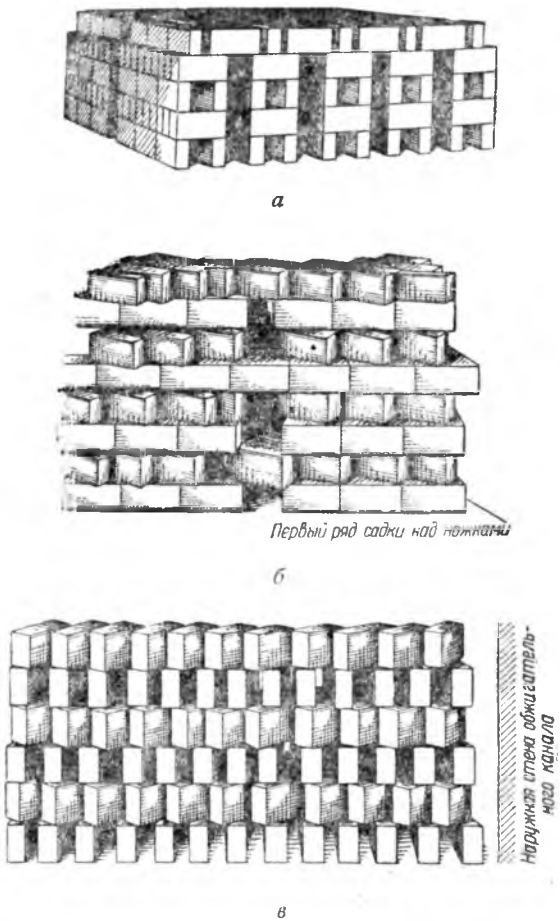


Рис. 107. Основные элементы садки кирпича в кольцевой печи по методу П. А. Дуванова: *а*—«ножки» и перекрытие садки; *б*—колосниковая решетка садки; *в*—садка в «елку».

пример, садка системы С. В. Баскакова на Очаковском кирпичном заводе. Как показано на рис. 108, все сечение печи заполняется кирпичом, уложенным в одном определенном порядке. Ножек и покрытия ножек не имеется. Садка по всей высоте печи выложена одинаково, а по длине печи образуются прямые

каналы. Плотность садки составляет около 230 кирпичей в 1 $м^3$, и сопротивление ее значительно меньше, чем в любом другом виде садки.

По опытам, проведенным РОСНИИМСом, наименьшее сопротивление при движении газов создают садки с укрупненными каналами по методу С. В. Баскакова; на втором месте — садка по методу П. А. Дуванова.

На потери напора в значительной мере влияют конструктивные недостатки печи. Исследования тягового режима кольцевых печей показали, что очень большое сопротивление представляют наружные конусы и что для удаления дымовых газов надо пользоваться внутренними боровками, оставляя наружные только для камер на закруглениях печи. Соединительные боровки следует делать возможно большего сечения, чтобы уменьшить сопротивление движению газов. Далее, должны быть приняты меры для уменьшения подсосов наружного воздуха. Значения коэффициента избытка воздуха у шибера дымовой трубы достигают 6—8.

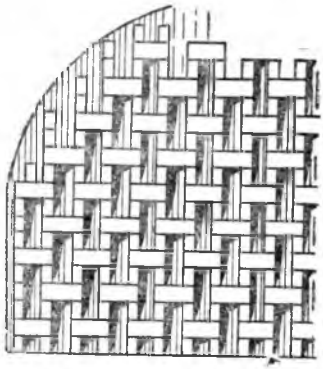


Рис. 108. Садка кирпича по методу С. В. Баскакова.

Для борьбы с присосами воздуха нужно правильно устанавливать ширмы в каждой камере, тщательно заделывать ходки двумя стенками, повторно промазывать их глиной, а также следить за состоянием затворов топливных трубочек и конусов, подсыпая в них песок. Этими мерами можно в значительной степени улучшить работу кольцевых печей.

Равномерность обжига. Разница температур по высоте кольцевой печи в отдельные моменты как при нагреве, так и при остывании садки достигает значительной величины.

Под действием разрежения, создаваемого вытяжным устройством, горячие газы отклоняются от своего естественного движения вверх и направляются к дымовым каналам.

При слабой тяге и малых скоростях движения газов неизбежное расслоение потока газов вызывает большой прогрев верха садки. При сильной тяге возможно, как это имеет иногда место в печах с большой скоростью огня, и обратное явление — отставание огня вверху и ход огня низом. В обоих случаях выравнивание температуры в зоне обжига достигается как соответствующими изменениями в устройстве подовых каналов садки, так и режимом загрузки топлива.

При отставании верха следует уменьшить величину проходов в подовых каналах, проверить, не проваливается ли излишнее топливо на под печи, и правильным расположением колос-

ников обеспечить равномерное распределение топлива по высоте. Кроме того, применяют разреженную садку в верхней части печи. Для этого опрокидывают на плашок два верхних кирпича под топливными трубочками: загружая крупные куски топлива, создают в верхней части печи сильный очаг горения для выравнивания температуры.

Если же отстает низ («огонь идет верхом»), то выравнивание достигается главным образом усилением тяги и соответственным изменением площади сечения подовых каналов. В результате всех этих мероприятий можно добиться ровного обжига по высоте камеры.

В горизонтальной плоскости кольцевых печей при правильном ведении обжига и числе трубочек в ряду, соответствующем ширине печи, обжиг проходит равномерно. Получающееся иногда отставание обжига у внешних стен является следствием неправильной садки или охлаждения из-за дефектов кладки (недостаточная толщина стен или засос через щели). Этот дефект легко устраняется.

При обжиге кирпича по методу лауреата Сталинской премии И. Я. Мазова для равномерного распределения потоков воздуха и дымовых газов по сечению канала печи применяют специальную садку (рис. 109). В ней, кроме подовых каналов для прохо-

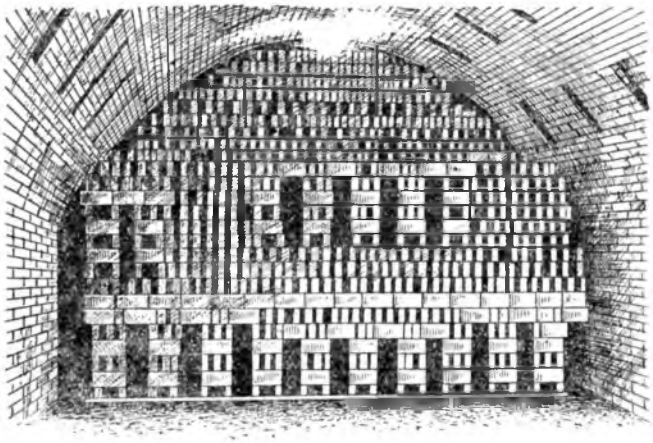


Рис. 109. Садка кирпича по методу И. Я. Мазова.

да газов в основной садке, на 8—10 ряду по высоте от пода печи устраивают по всей длине садки 4—5 дополнительных сквозных каналов, высотой 4—5 кирпичей. Кроме того, высота подовых каналов у стен печи делается выше, чем в центральной части.

Этот вид садки особенно оправдал себя при обжиге кирпича с введенным в массу топливом. При этой системе садки обжиг идет с большой скоростью, и кирпич обжигается равномерно.

Процесс подсушки. Как было указано выше, общее количество воздуха, идущее на охлаждение обожженного материала, значительно больше требуемого для сжигания топлива. Свободное количество тепла воздуха используется в кольцевых печах с помощью так называемых жаровых каналов для подсушки сырца.

Подсушкой называют подогрев горячим воздухом посаженного в печь сырца с испарением при этом оставшейся в сырце влаги. Процесс протекает следующим образом: горячий воздух из камеры охлаждения через топливные трубочки направляется в специальный так называемый жаровой канал, расположенный в верхней части печи; из последнего горячий воздух направляется в камеры со свеженасаженным сырцом. Управление передачей горячего воздуха производится переключением соответствующих клапанов в камерах. Как показано на схеме работы печи, камеры, в которых происходит процесс охлаждения, соединены с жаровым каналом. Дымовые же конусы в этих камерах закрыты. Из жарового канала горячий воздух через открытые жаровые конусы передается в камеры, расположенные перед камерами на подогреве (так называемые камеры на парах). Кроме того, эти камеры открытыми дымовыми конусами соединены через дымовой канал с дымовой трубой. Таким образом, движение воздуха при подсушке происходит в следующем порядке: из камеры охлаждения через открытые жаровые конусы воздух поступает в жаровой канал; из последнего, через открытые жаровые конусы, — в камеры на парах; далее, через открытые дымовые конусы, — в дымовой канал и дымовую трубу.

Жаровые каналы бывают двух типов: центральные и боковые. Центральный канал располагается по длинной оси печи, обычно сверху дымового канала; боковой канал — кольцом по внешней стороне печи.

Центральные жаровые каналы применяют гораздо чаще, так как они конструктивно легче выполнимы, более стойки в эксплуатации, дают меньшие потери в окружающую среду и управление ими проще. Недостатком центрального жарового канала являются прососы горячего воздуха через неплотности в дымовой канал, расположенный под ним.

Для передачи горячего воздуха из камер в жаровой канал и обратно применяют переносные короба, специальные каналы в теле печи (так называемый рассыпной строй) или очелковую систему.

Переносные короба из железа ставят на верх печи и соединяют открытые топливные трубочки с входным отверстием жарового канала.

При рассыпном строе в своде печи устроены каналы, сое-

диняющие топливные трубочки с жаровым каналом при помощи специальных жаровых конусов (см. рис. 102).

При очелковой системе короткие каналы соединяют печное пространство с жаровым каналом через отдельные очелки (окна).

Переносные короба имеют простое устройство, но обладают рядом недостатков: они отдают много тепла в окружающую среду, допускают подсосы холодного воздуха в печь, а также требуют большой затраты труда для их переноса.

Устройство рассыпного строя целесообразнее, несмотря на то, что он дороже и сложнее.

Теплотехническая характеристика кольцевых печей. Кольцевые печи характеризуются высоким к. п. д., достигающим 60%. Значительно снижают к. п. д. кольцевой печи потери тепла с отходящими газами, несмотря на сравнительно низкие температуры последних. Это объясняется большим избытком воздуха, неизбежным в кольцевых печах.

Ниже приводятся тепловые балансы кольцевых печей для обжига строительного кирпича[1].

Таблица 29

Тепловые балансы кольцевых печей

Наименование статьи	Расход тепла на 1000 шт. кирпича в *ккал* и %					
	обжиг с зоной подсушки		обжиг по методу П. А. Дуванова		обжиг по методу И. Я. Мазова	
	ккал	%	*ккал*	%	*ккал*	%
Приход тепла						
Тепло топлива	1051000	100	915000	100	965700	100
Расход тепла						
Испарение гигроскопической влаги	160300	15,1	157000	17,2	180000	18,7
Нагрев влаги до температуры уходящих газов . .	15300	1,5	15100	1,6	14300	1,5
Химические реакции при обжиге	175000	16,6	175000	19,1	175000	18,1
Потери тепла						
а) с выгружаемым кирпичом	42000	4,0	30800	3,4	42000	4,4
б) с золой топлива . . .	900	0,1	300	—	450	—
в) с уходящими газами . .	490000	46,7	295700	32,3	455000	47,0
г) от механической неполноты горения	27000	2,6	17900	2,0	12200	1,4
д) от химической неполноты горения	38000	3,6	—	—	19300	2,0
е) через топливные трубочки	—	—	156000	17,0	—	—
ж) в окружающую среду . .	102500	9,8	67200	7,4	67500	6,9
Итого . . .	1051000	100,0	915000	100	965700	100,0

[1] По данным Б. Н. Гак. Тепловой баланс кольцевых кирпичеобжигательных печей. Промстройиздат, 1952.

Сопоставление балансов показывает, что основное различие наблюдается по статьям расхода тепла с уходящими газами и в окружающую среду. Наименьшие потери тепла с уходящими газами получаются при работе по методу П. А. Дуванова. Это объясняется тем, что по методу Дуванова печь работает без зоны подсушки и на малом разрежении, что резко снижает общее количество дымовых газов.

Потери в окружающую среду в печах, работающих по методам П. А. Дуванова и И. Я. Мазова, значительно снизились вследствие высокой производительности этих печей.

В тепловом балансе печи, работающей по методу Дуванова, имеется дополнительная потеря—отвод тепла через топливные трубочки, что вызвано выбиванием воздуха через открытые топливные трубочки при заброске топлива. При установке автоматических загрузчиков топлива эта потеря может быть полностью ликвидирована и таким образом еще больше повышено использование тепла.

Использование для сушки сырца тепла дымовых газов, а также тепла остывания обожженного кирпича значительно улучшает тепловой к. п. д. кольцевых печей.

Хотя кольцевая печь и является в целом печью непрерывного действия, однако отдельные участки ее работают аналогично периодическим печам. Так, процесс аккумуляции тепла в стенах происходит совершенно так же, как и в периодических печах.

На диаграмме (рис. 110) показано, как происходит тепловая работа стены кольцевой печи, а также ее роль в общем теплообмене при нагреве и остывании. В начальный момент обжига стены тепла не поглощают, а наоборот, выделяют часть ранее аккумулированного тепла. Это длится до тех пор, пока в печи не установится температура около 200°. После этого стены начинают вновь аккумулировать тепло. Аккумуляция эта продолжается даже тогда, когда процесс обжига закончился и материал начинает остывать. Таким образом, стены вначале ускоряют процесс остывания, но в дальнейшем, отдавая тепло внутрь печи, замедляют его. Выделение тепла стенами—одна из основных причин, создающих тяжелые условия работы при выгрузке, что является отличительной особенностью кольцевых печей.

На расход тепла в кольцевых печах значительно влияет скорость огня: чем больше скорость огня, тем, как правило, меньше требуется топлива для обжига сырца.

Большое значение имеет влажность обжигаемого материала: при повышенной влажности материала расход топлива резко возрастает. Имеет значение также и конфигурация самой печи: чем меньше отношение поверхности канала к его объему, тем меньше потери.

Производительность кольцевых печей. Учет производительности кольцевых печей для обжига кирпича производится по съе-

му кирпича, т. е. по количеству кирпича в штуках, получаемого в месяц с 1 $м^3$ обжигательного канала.

Обозначая через P месячную производительность в штуках и через W объем канала, получим, что съем:

$$M = \frac{P}{W}. \tag{138}$$

Объем печи определяется произведением длины печи на площадь поперечного сечения $W = LF$.

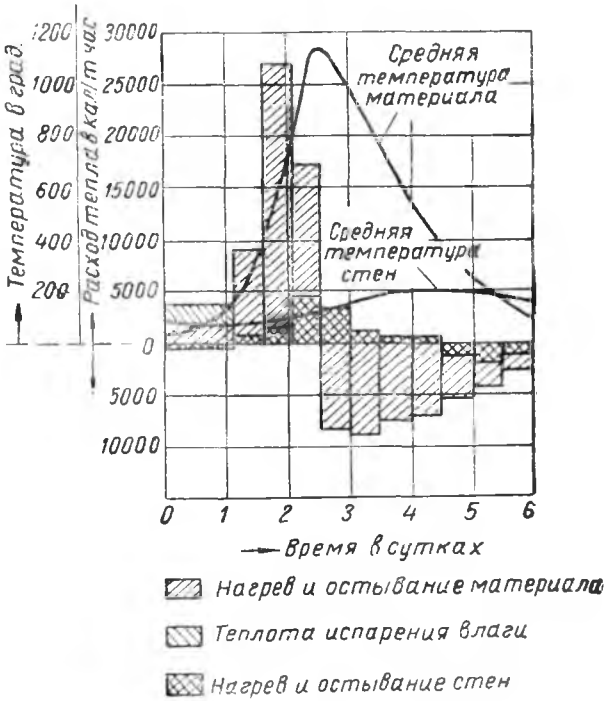


Рис. 110. Тепловая работа стен кольцевой печи.

Необходимо учесть, что в кольцевых печах не весь объем печи занят материалом; всегда несколько камер не участвуют в процессе обжига (находятся под выгрузкой, загрузкой или стоят свободными).

Рабочая длина печи:

$$L_{раб} = L - n\,l, \tag{139}$$

где: n — число камер, не участвующих в обжиге;
l — длина камеры.

В обычных условиях n равняется 1—2. Полная длина обжигательного канала может быть выражена через скорость огня следующей формулой:

$$L = vZ + n\,l, \tag{140}$$

где: v — скорость огня в *м/сутки*;
Z — продолжительность обжига в сутках.

Производительность также может быть выражена через скорость огня и плотность садки. Обозначая плотность садки в штуках на 1 $м^3$ печного объема через K, получим:

$$P = 30K \cdot vF.$$

Подставляя полученные соотношения в формулу для съема, получим выражения для его вычисления:

$$M = \frac{P}{W_{раб}} = \frac{30KvF}{L_{раб}F} = 30\,\frac{Kv}{L_{раб}}, \tag{141}$$

$$M = 30\,\frac{Kv}{L_{раб}} = 30\,\frac{Kv}{vZ} = 30\,\frac{K}{Z}. \tag{142}$$

При заданном съеме с 1 $м^3$ печи суточная скорость огня определяется из выражения (141). В настоящее время скорость огня при обжиге обыкновенного строительного кирпича составляет не менее 20—30 *м*. Съем с 1 $м^3$ печи при обжиге строительного кирпича доведен до очень высокой цифры и составляет по ряду заводов более 2000 шт. с 1 $м^3$ в месяц.

При установлении длины отдельных зон кольцевых печей необходимо руководствоваться температурной кривой, принятой для обжига данных изделий. На основе этой кривой подбирают соответствующий режим обжига по времени. Затем, согласно этому режиму, определяют число камер в каждой зоне, исходя из скорости огня для заданной производительности.

Обозначим длительность всего процесса обжига через Z, а для отдельных стадий—через $Z_{под}$, $Z_{об}$ и $Z_{охл}$. Соответственную длину обжигательного канала обозначим через L, $L_{под}$, $L_{об}$ и $L_{охл}$.

Тогда:

$$L_{об} = \frac{L_{раб} \cdot Z_{обж}}{Z}; \quad L_{под} = \frac{L_{раб} \cdot Z_{под}}{Z} \text{ и т. д.} \tag{143}$$

Согласно предыдущему: $L=vZ+nl$ и $L_{раб}=vZ$. Подставив эти значения, получим число камер в каждой зоне:

$$L_n=n_n l=\frac{vZ\cdot Z_n}{Z}=v\,Z_n,$$

откуда

$$\boxed{n_n=\frac{vZ_n}{l}.} \qquad (144)$$

Аналогично получаем:

$$n_{под}=\frac{vZ_{под}}{l};\quad n_{обж}=\frac{v\cdot Z_{обж}}{l}\ \text{и}$$

$$n_{охл}=\frac{vZ_{охл}}{l}.$$

Число камер на отдельных стадиях обжига равняется скорости огня, помноженной на длительность данной стадии обжига во времени и деленной на длину отдельной камеры.

Необходимо учесть, что скорость огня выражается в метрах в сутки. Поэтому длительность процесса также следует выражать в сутках.

Пример. Определить производительность кольцевой печи и распределение камер по зонам по следующим данным: общее число камер в печи—18, в том числе на разгрузке и загрузке—2 и свободных—1. Длина камеры — 5,3 *м*; сечение 10,3 *м*. Плотность садки—200 *шт/м*³. Срок обжига — 3 суток, в том числе подсушка—9 часов, на дыму—20 часов, обжиг—16 часов и охлаждение—27 часов.

Пользуясь выведенными соотношениями, определяем съем с 1 *м*³ рабочего объема обжигательного канала:

$$M=30\,\frac{K}{Z}=\frac{30\cdot 200}{3}=2000\ \text{шт.}$$

Для определения производительности найдем объем рабочей части обжигательного канала:

$$W=L_pF=5{,}3\cdot 15\cdot 10{,}3=820\ м^3.$$

Месячная производительность:

$$P_м=M\,W=2000\cdot 820=1640\ \text{тыс. шт.}$$

Суточная производительность

$$\frac{P_м}{30}=\frac{1640000}{30}=54\,700\ \text{шт.}$$

Скорость огня:

$$v=\frac{ML_p}{30\cdot K}=\frac{2000\cdot 15\cdot 5,3}{30\cdot 200}=26,5\ м/сутки.$$

Распределение камер по зонам:
на подсушке:

$$n_п=\frac{v\cdot Z_п}{l\cdot 24}=\frac{26,5\cdot 9}{5,3\cdot 24}=2\ \text{камеры};$$

на подогреве:

$$n_{под}=\frac{v\cdot Z_{под}}{l\cdot 24}=\frac{26,5\cdot 20}{5,3\cdot 24}=4\ \text{камеры};$$

на обжиге:

$$n_{об}=\frac{v\cdot Z_{обж}}{l\cdot 24}=\frac{26,5\cdot 16}{5,3\cdot 24}=3\ \text{камеры};$$

на охлаждении:

$$n_0=\frac{v\cdot Z_0}{l\cdot 24}=\frac{26,5\cdot 27}{5,3\cdot 24}=6\ \text{камер}.$$

Всего 15 камер.

Пуск кольцевых печей. Пуск вновь выстроенной печи состоит из просушки печи и разогрева. При пуске действовавших печей просушивать их после перерыва не приходится.

Сушку проводят следующим образом. Сначала просушивают обжигательный канал, а затем все остальные каналы для прохода газов. Для этого на закруглениях обоих концов обжигательного канала выкладывают две стенки, деля таким образом всю печь на две части.

Все ходки печей, кроме двух в центре (по одному с каждой стороны печи), закладывают кирпичом и обмазывают глиной. Все дымовые и жаровые конусы, за исключением конусов на закруглениях, закрывают. По обе стороны открытых ходков в обжигательном канале разжигают по два костра, постепенно усиливая огонь. Дымовые газы от них уходят через открытые конусы на закруглениях печи и по пути просушивают канал. В зависимости от длины печи такая просушка длится 3—6 суток. После этого приступают к сушке системы газоотводящих каналов, для чего открытый ходок на одной стороне печи закрывают, а на противоположной, наоборот, открывают все (или через один) закрытые ходки. На одной стороне закрывают дымовые конусы и открывают все жаровые, а на противоположной стороне открывают все жаровые и дымовые конусы.

В открытых ходках зажигают костры. Дымовые газы от них проходят через обжигательный канал, топливные трубочки, жаровые конусы на этой же стороне печи, жаровой канал, жаровые конусы на другой стороне, камеры и дымовые конусы в дымовую трубу.

Второй период длится 3—4 суток. В третий период сушка ведется так же, как и во второй, но костры раскладывают с другой

стороны печи и соответственно меняют расположение открытых и закрытых жаровых и дымовых конусов. Газы движутся в направлении, противоположном движению их во второй период, также в течение 3—4 суток. По окончании третьего периода просушка заканчивается, стенки на закруглениях разбирают и печь подготовляют к розжигу.

Во время розжига камеры со свеженасаженным сырцом разогревают до температуры воспламенения топлива. После этого переходят к обжигу обычным способом. Растопку производят с помощью временных топок, устраиваемых внутри печного канала. В кольцевых печах топки устраивают в первой или второй камере за закруглением на прямом участке печи. Это необходимо для того, чтобы иметь возможно более длинный прямой участок печи для достижения большой скорости огня; на закруглениях же ход огня обычно затрудняется.

Для устройства топок во всю высоту обжигательного канала выкладывают стену толщиной в полтора кирпича, а в верхней части—в один кирпич. В стене оставляют отверстия для топочных дверец и поддувала. В зависимости от ширины печного канала число топок составляет 3—4; ширина их—0,7 *м*, длина—1—1,3 *м*. Для сжигания каменного угля делают колосниковую решетку.

Отступая от топок на 0,7—1 *м*, начинают садку. По широко применяемому в последние годы методу ускоренного розжига кольцевых печей садку первых 2—3 камер делают не из сырца, а из обожженного кирпича или недожога. Это позволяет быстро разогреть первые рядки садки и перейти на нормальную работу печи, т. е. к засыпке топлива через топливные трубочки.

Садка ведется обычным порядком и только первая подсадка от топок должна быть выше ножек—почти сплошным брусом, чтобы огонь из топки шел низом. Ширму ставят после первых камер. Последующие камеры, как обычно, загружают сырцом.

Работу топок ведут с большой форсировкой и через 18—24 часа переходят с огнем наверх и начинают загружать топливо через топливные трубочки.

Временную стенку разбирают, когда, по мере продвижения огня по печи, будут обожжены 5 камер, и приступают к выгрузке кирпича.

Глава IV

ПЕЧИ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ С НЕПОДВИЖНОЙ ЗОНОЙ ОБЖИГА И ПЕРЕМЕЩАЮЩИМСЯ МАТЕРИАЛОМ

Основной недостаток кольцевых печей—трудность механизации процессов загрузки и выгрузки обжигаемого материала вызывает необходимость применения ручного труда в условиях

неизбежной пыли и высокой температуры в камерах. Это обстоятельство и привело к постепенному вытеснению кольцевых печей туннельными печами с неподвижной зоной обжига и перемещающимся материалом.

1. УСТРОЙСТВО И РАБОТА ТУННЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ

Туннельная печь представляет собой длинный канал, огражденный с боков неподвижными стенами, а сверху—сводом. Под печи образуют подвижные вагонетки, на которых устанавливают обжигаемые изделия. Примерно в середине длины канала находится неподвижная зона обжига с топками (рис. 111). Обжигаемые изделия продвигаются от одного конца канала к

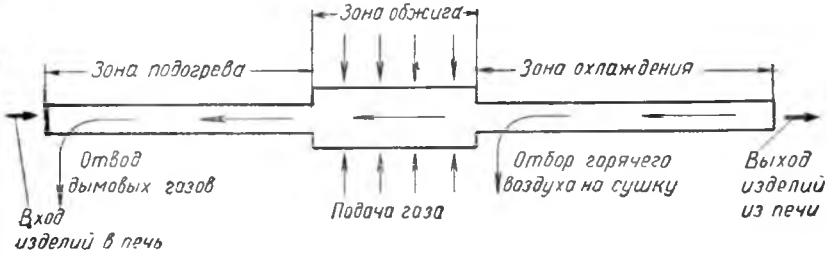


Рис. 111. Схема работы туннельной печи.

другому. Горячие газы движутся навстречу вагонеткам. Таким образом, туннельная печь работает по принципу противотока. Со стороны выхода из печи подается холодный воздух, который охлаждает обожженные изделия и сам при этом нагревается. Нагретый воздух используется для сжигания топлива и частично отводится для использования в сушилках. Вся печь по длине разделяется на три зоны: подогрева, обжига и охлаждения.

Туннельные печи в последние годы получили большое распространение во всех областях керамического производства. Основное преимущество туннельных печей: облегчение условий труда при их обслуживании благодаря механизации загрузки и выгрузки.

К преимуществам туннельной печи следует отнести также возможность автоматического регулирования режима обжига.

Определение размеров туннельной печи. Обжиг в туннельных печах производится по заданной температурной кривой, устанавливаемой специальными испытаниями в соответствии со свойствами обжигаемого материала (см. рис. 97).

Туннельные печи предназначены для обжига массовой продукции, например, кирпича.

Высота туннеля в целях уменьшения температурного перепада и в зависимости от допускаемой нагрузки на нижние ряды

редко превышает 2 *м*, ширина доходит до 3,5 *м*. Длину печи выбирают с учетом требуемой производительности и срока обжига по заданной температурной кривой.

Обозначая: P — производительность печи в *т/час* обожженного материала; Z — время полного обжига по заданной кривой в часах; M — количество материала, помещающегося в печи, в *т*; K — плотность садки в *т/м*³ печи; F — площадь сечения в *м*²; L — длину печи в *м*, получаем:

$$M = LFK \text{ и } M = PZ,$$

откуда

$$\boxed{L = \frac{PZ}{FK}.} \qquad (145)$$

Скорость продвижения вагонеток в печи (в *м/час*) будет равна:

$$\boxed{v = \frac{P}{FK}.} \qquad (146)$$

Длина отдельных зон определяется по времени пребывания материала в соответствующей зоне. Это устанавливается по температурной кривой. Обозначим $Z_{под}$—время пребывания в зоне подогрева, получим длину:

$$\boxed{L_{под} = L\,\frac{Z_{под}}{Z}.} \qquad (147)$$

Аналогично:

$$L_{обж} = L\,\frac{Z_{обж}}{Z}$$

$$L_{ох.з} = \frac{Z_{ох.з}}{Z}.$$

Значения K и Z для различных случаев приведены в табл. 30.

Длина печей достигает 160 *м*. Наряду с этим в последние годы начали применять короткие туннельные печи длиной 40—50 *м*, особенно удобные для заводов с небольшой производительностью.

Конструктивные элементы туннельных печей. Отдельные системы туннельных печей отличаются друг от друга конструктивными элементами и схемами распределения воздуха и продуктов сгорания.

Таблица 30

Плотность садки печи и длительность обжига в туннельных печах

Вид обжигаемых изделий	Плотность садки в *т/м*³	Длительность обжига в часах
Строительный кирпич и блоки . . .	0,8 —0,9	30—60
Черепица	0,55—0,65	40—70
Облицовочные плитки	0,25	48—60
Плитки для полов	0,15—0,35	60—70
Санитарный фаянс	0,10—0,20	48—60
Шамот нормальный	0,85—1,0	50—60

Зона подогрева. Правильно спроектированная зона подогрева должна обеспечивать подогрев изделий на вагонетках по заданной температурной кривой, равномерно по поперечному

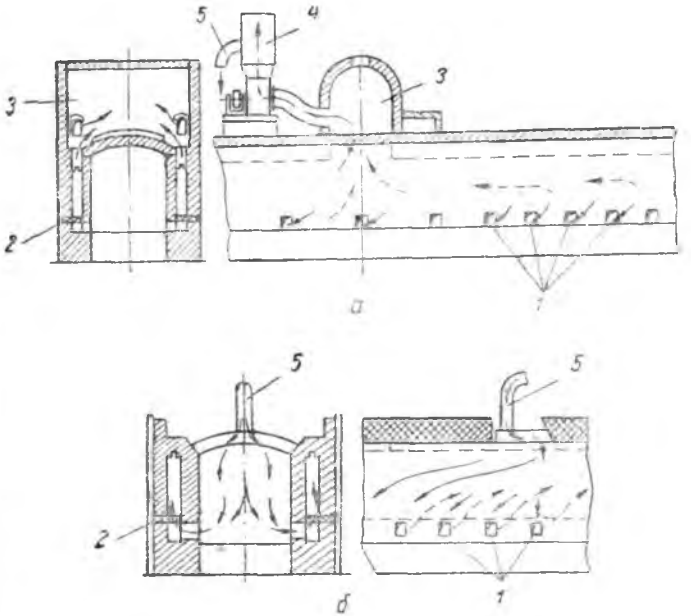


Рис. 112. Устройство для отбора газов в туннельной печи: *а*—зона основного подогрева; *б*—зона предварительного подогрева; *1*—окна для отбора дымовых газов; *2* — шибер; *3*—газосборная камера; *4*—дымосос; *5*—отбор газа из дымососа для подачи в зону предварительного обжига.

сечению канала, и максимальное использование дымовых газов в целях снижения удельного расхода тепла на обжиг.

Для получения равномерного подогрева желательно иметь большие объемы газов. При этом условии все поперечное сечение туннельной печи будет заполняться газами и создадутся лучшие условия для передачи тепла. Скорость движения газов через зону подогрева должна быть от 2,5 до 5 *м/сек*.

В большинстве туннельных печей газ отбирается с помощью ряда небольших каналов с шиберами. Это дает возможность отбирать различное количество газов по длине печи и создавать тем самым требуемый подъем температуры в зоне подогрева (рис. 112). Недостаток этой системы заключается в том, что при отборе части газов на следующих участках снижается их количество и, следовательно, равномерность подогрева по высоте потока. Чем больше газов будет отбираться, тем сильнее отразится это на неравномерности подогрева по высоте.

Устранение неравномерности обжига по поперечному сечению туннельной печи достигается применением перемешивающих вентиляторов для создания поперечной циркуляции в печи (рис. 113). Благодаря тщательному перемешиванию газов создаются одинаковые условия теплопередачи по всему сечению печи, в результате чего лучше используется тепло. Вентиляторы из жароупорных сталей можно применять при температуре до 500—600°.

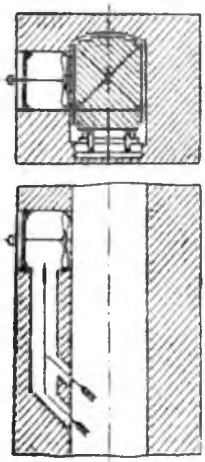


Рис. 113. Схема установки циркуляционных вентиляторов.

Хорошие результаты дает рециркуляция дымовых газов, увеличивая общее количество газов в печном канале. Часть дымовых газов при выходе из печи направляется по трубопроводу обратно в зону горения, где смешивается с воздухом. Это позволяет снизить избыток воздуха до 1,2—1,5 при сохранении большого объема газов в зоне подогрева и тем самым обеспечить равномерный нагрев сырца.

Большое значение для равномерности подогрева имеет борьба с присосом наружного воздуха. Хорошие результаты дает система разветвленных каналов, оттягивающих воздух сразу в месте его входа в печь. Одновременно надо устранять подсосы воздуха в печь.

Зона обжига. В зоне обжига температура изделий доводится до максимального значения.

Для отопления туннельных печей применяют газообразное и твердое топлива. Применяя полугазовые топки, можно путем дожигания полугаза непосредственно в самой печи создавать равномерную температуру по сечению зоны обжига.

В некоторых системах печи сжигание топлива происходит непосредственно в среде материала. Садка изделий в этом случае несколько напоминает соответствующую садку для кольце-

вых печей. Такие туннельные печи применяют для обжига строительного кирпича (рис. 114). В своде показаны трубочки, через которые загружается топливо. Предложено также вводить часть топлива непосредственно в сырец при его изготовлении, как это применяется в кольцевых печах.

Наиболее распространенным видом топлива для туннельных печей является газообразное топливо, для сжигания которого зона обжига оборудуется горелками.

В настоящее время в туннельных печах применяют два типа горелок: камерные и инжекционные.

Камерные горелки получили свое название потому, что зажигание и сгорание газа происходит в специальной камере, где газ смешивается с воздухом. Сгорание может происходить полностью в камере или частично переносится в печной канал.

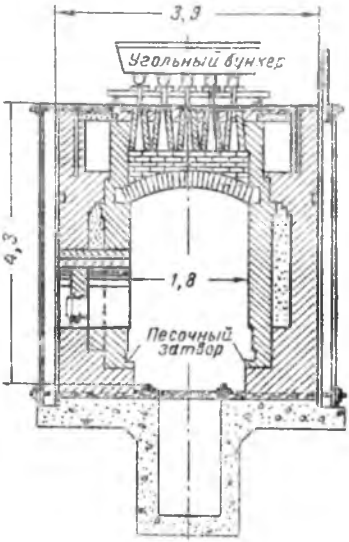


Рис. 114. Разрез туннельной печи для сжигания твердого топлива.

Газовые горелки располагают по бокам зоны обжига, и пламя направляется на обжигаемые изделия. Чтобы устранить опасность пережога от непосредственного действия пламени и создать условия для более равномерного распределения тепла на поверхности садки, стены зоны обжига при выходе из камеры делают в виде решетки с отверстиями, расположенными в шахматном порядке. Для лучшего подогрева низа садки, обычно отстающего в обжиге, горелки часто располагают несколько ниже середины садки.

Устройство горелок туннельных печей должно обеспечивать полное перемешивание газа и воздуха, простую регулировку для изменения температуры и характера пламени. Такие устройства показаны на рис. 115 для камерных горелок и на рис. 116—для инжекционных.

Для обеспечения равномерности нагрева в поперечном сечении между садкой отдельных вагонеток оставляют определенные промежутки, в центре которых, в зоне обжига, расположены горелки. Вагонетки периодически передвигаются на установленную длину, так что горелки всегда находятся в тех промежутках, где происходит интенсивное перемешивание и дожигание горячих газов. Это способствует равномерному обжигу по всему сечению.

В ряде конструкций печей для обеспечения равномерности обжига часть горелок устанавливают в своде печи.

Зона охлаждения. Изделия, выходящие из туннель-

ной печи, должны быть охлаждены до определенной температуры, что достигается в зоне охлаждения путем отдачи тепла воздуху.

Различают системы с непосредственным охлаждением воздуха, проходящим через печной канал, и системы с рекуперацией.

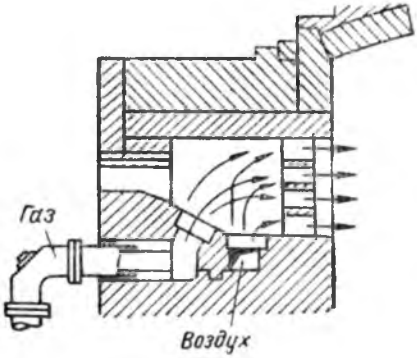


Рис. 115. Камерная горелка.

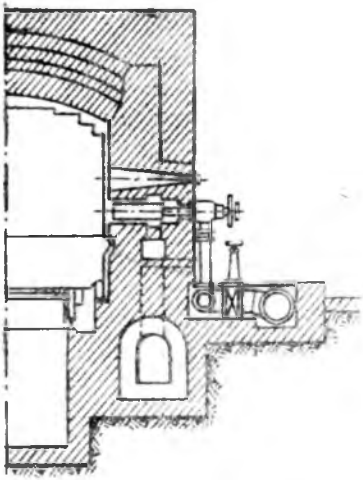


Рис. 116. Инжекционная горелка.

В печах с рекуперацией холодный воздух направляют не прямо на обожженные изделия. Он проходит через систему отдельных каналов, устроенных по бокам печи. Тепло передается за счет излучения от раскаленного материала через стенки рекуператоров. Рекуператоры выполняются из шамотного фасонного кирпича или из металлических труб.

Охлаждение садки при применении рекуператоров не вполне равномерное. Охлаждается, главным образом, наружная часть, центральная же часть садки не успевает отдавать свое тепло и остается горячей. Устройство рекуператоров усложняет конструкцию и удорожает строительство печей. Поэтому от применения их отказываются, и для обжига простых изделий (кирпич, черепица) рекомендуется применять туннельные печи с непосредственным охлаждением.

В печах с непосредственным охлаждением воздух подается в печной канал вентиляторами, которые устанавливаются на расстоянии 3—6 *м* от конца печи. Для устранения утечки воздуха выход из туннеля должен быть уплотнен.

Для охлаждения садки воздуха требуется значительно больше, чем для сжигания топлива. Избыток воздуха должен быть передан в сушилки или в другие места потребления, так как в зоне горения он может нарушить правильный процесс горения.

Нагретый воздух отбирается различным путем. В одних печах в боковых стенах зоны охлаждения устроены окна, расположенные у пода вагонеток и соединенные каналами с общим воздухосборником, расположенным над сводом печи. В каждом вертикальном канале установлены шиберы для регулирования количества отсасываемого воздуха. Это позволяет подобрать оптимальный режим охлаждения в соответствии с особенностями обжигаемого материала.

В более простой, но менее совершенной в отношении регулирования, системе охлаждения нагретый воздух отбирается через отверстия в стенах зоны охлаждения в специальные стояки, через которые передается в общий сборный канал для дальнейшего использования.

На новых заводах строительной керамики запроектирована установка нескольких систем туннельных печей, разработанных различными проектными организациями. Приводим описания печей, которые уже построены на нескольких заводах.

Печь конструкции Укрпромпроекта (рис. 117) принята как типовая для кирпичных заводов. Она отапливается естественным или горячим генераторным газом, сжигаемым непосредственно в канале печи в смеси с воздухом, поступающим из зоны охлаждения. Зона горения и число включаемых горелок определяются длиной зоны обжига в зависимости от температурной кривой. Горение происходит в разрывах между садкой отдельных вагонеток.

Высококалорийный газ сжигается в смеси с рециркулирующими дымовыми газами из зоны подогрева (см. выше). Это позволяет снизить избыток воздуха при сохранении общего количества продуктов горения в зоне обжига и обеспечить равномерность обогрева изделий.

Отбор дымовых газов в зоне подогрева рассредоточен и производится через несколько стояков вентилятором среднего давления. Часть дымовых газов направляется в искусственные сушилки, часть — на рециркуляцию в зону обжига.

Рециркулирующие газы подают к горелкам, которые имеют индивидуальную и групповую регулировку. Для выравнивания процесса подогрева в интервале 200—500° в начале зоны обжига установлены четыре запасные горелки.

Для выравнивания температуры по высоте туннеля предусмотрены горелки в своде печи, а также подвод части рециркулирующих газов в конец зоны подогрева. Для быстрого охлаждения кирпича в случае его оплавления предусмотрена также подача рециркулирующих газов в конец зоны обжига (на границе зоны охлаждения в верхней части печи).

Воздух для охлаждения нагнетается через несколько отверстий по высоте и длине печи и отбирается вентилятором через ряд стояков. Часть нагретого воздуха направляют на сушилки, часть поступает на горение в печь. Под зоной обжига в пе-

чи устроен аварийный канал, который отделен от подподового пространства остальных зон автоматическими шиберами. Они работают синхронно с автоматическими шторными дверями, которые отключают обжигательный канал и подподовый канал от внешней среды. В подподовом пространстве искусственно поддерживается то же давление, что и в печном канале.

Размеры печи: ширина канала в свету — 3 *м*; высота от пода вагонетки до замка свода — 1,7 *м*; высота садки на вагонетке — 1,6 *м*; длина вагонетки — 3 *м*; ширина — 3 *м*; емкость — 3400 шт. кирпича. Длина печи производительностью 11 млн. шт. — 75 *м*, а 15 млн. шт. — 102,2 *м*.

Продолжительность обжига кирпича 30 часов.

Вагонетки загружаются в печь специальным механическим толкателем.

Туннельная печь конструкции Росстромпроекта, схема работы которой показана на рис. 118, предназначена для обжига кирпича и керамических блоков. Длина обжигового канала пе-

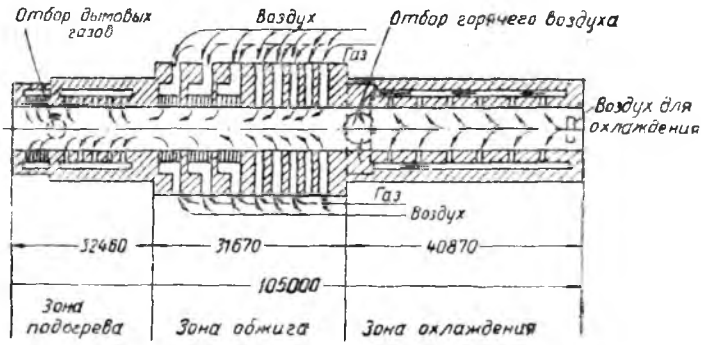


Рис. 118. Схема работы туннельной печи Росстромпроекта.

чи 105 *м*, ширина — 1,73 *м*, высота от пода вагонетки до пяты свода 1,5 *м*. В отличие от печи Укрпромпроекта газ сжигается не в печном канале, а в топках, расположенных в центральной части печи. Топки делают двух видов: для зоны малого и большого огня.

В топках малого огня продукты горения из камеры сгорания поступают в печной канал через ряд мелких отверстий. Предварительно они проходят через канал, проложенный в стене параллельно печному каналу. Это обеспечивает полное сгорание газа и предохраняет сырец от воздействия большой струи острого газового пламени.

Из топок большого огня, объем которых больше, продукты сгорания поступают прямо в печь. В зависимости от установленного режима в печи предусмотрена автоматическая регулировка подачи воздуха и газа.

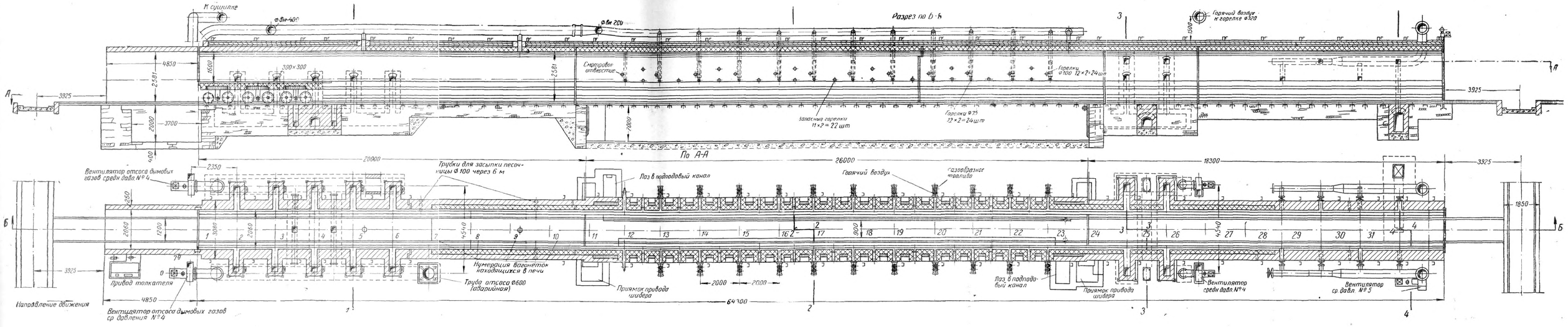


Рис. 117. План и разрезы туннельной печи Укрпромпроекта.

Зак. 1058

Продукты горения, пройдя через садку, отводятся в зоне подогрева через окна в боковых стенах в газосборную камеру (см. рис. 112); отбор газов производится дымососом, расположенным на верху печи. Зона подогрева разделена на две части. В основной, большей части зоны, расположенной между последним газовым окном зоны обжига и газосборной камерой, сырец подогревается печными газами из зоны обжига. В меньшей по длине зоне предварительный подогрев производится рециркулирующими газами, отбираемыми из дымососа специальным вентилятором. Это создает газовую завесу у места загрузки вагонеток и устраняет возможность засоса холодного воздуха при загрузке печи.

Холодный воздух в зону охлаждения подается вентилятором в конце печи. Нагретый воздух не доходит до зоны обжига, а отбирается по пути через окна, расположенные по всей зоне охлаждения у пода вагонеток.

Воздух в сушилку подается вентилятором, а для горения — отдельным трубопроводом, расположенным снаружи печи. При обжиге кирпича и блоков из легкоплавких глин используют холодный воздух. Для получения более высоких температур можно использовать горячий воздух из зоны охлаждения.

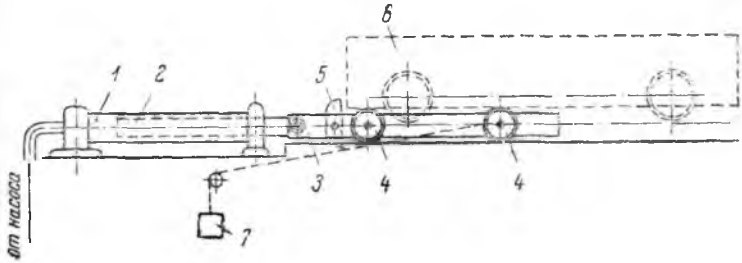


Рис. 119. Схема гидравлического толкателя вагонеток туннельной печи: *1*—цилиндр; *2*—плунжер; *3*—тележка; *4*—колесо толкателя; *5*—упор; *6*—печная вагонетка; *7*—груз.

На случай аварии между зонами обжига и охлаждения в стене обжигового канала устроены окна, обычно заложенные наглухо кирпичом. Вагонетки загружают в печь гидравлическим толкателем (рис. 119).

Равномерность обжига в туннельных печах. Практика работы туннельных печей различных систем показала, что по сечению канала замечается значительная разность температур в различных частях печи, что сказывается на качестве продукции или требует увеличения продолжительности обжига. Это обстоятельство имеет особое значение при обжиге материалов из глин с небольшим интервалом спекания: в отдельных местах садки могут возникать высокие температуры, граничащие с

температурой деформации, при которой возможно обрушение садки. Одновременно в других местах садки может получиться недожог.

Кроме того, на неравномерность распределения температур влияет еще устройство вагонеток. В большинстве вагонеток под выполняется из шамота и вследствие большого объема аккумулирует значительную часть тепла. В результате нижняя часть садки плохо подогревается в зоне подогрева и медленно остывает в зоне охлаждения. Для уменьшения веса вагонеток и сокращения аккумуляции тепла рекомендуется делать футеровку вагонеток с применением тепловой изоляции.

Размеры обжигаемого материала также влияют на неравномерность распределения температур. При уменьшении размеров изделий вследствие усадки материалов зазор верхней части печи между садкой и сводом получается очень значительным, и газы проходят по нему, минуя садку.

Аэродинамическое сопротивление туннельной печи. Для обеспечения движения газов по туннельной печи необходимо создать такие перепады давления, которые позволили бы получить необходимые скорости и направления газов. Так как количество газов, протекающих по печи, известно, то необходимо подсчитать сопротивление отдельных участков печи. На основании этих данных и количества газов подбираются соответствующие вентиляторы.

При выборе вентилятора необходимо учесть несколько дополнительных условий. Вся зона обжига должна находиться во время работы под давлением, которое не должно быть меньше 1 *мм* вод. ст. и больше 2—2,5 *мм* вод. ст. В этих условиях устраняется подсос холодного воздуха в зоне обжига, вредно отражающийся на качестве изделий, и предотвращается выбивание газов из печи.

В зоне подогрева и остывания могут быть и разрежение, и давление, но величина их не должна превышать 2—3 *мм* вод. ст. В противном случае может происходить либо выбивание газов из печи через неплотности, либо подсос в печь большого количества воздуха.

Аэродинамическое сопротивление обжигательного канала зависит от вида обжигаемых изделий и системы садки; сопротивление 1 *м* длины печной садки составляет от 0,1 до 0,25 *мм* вод. ст.

2. ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТУННЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ

В табл. 31 приведен тепловой баланс, полученный в результате испытаний туннельной печи для обжига керамических блоков

Таблица 31

Тепловой баланс туннельной печи для обжига керамических блоков (на 1 час работы)

Номера статей	Статьи теплового баланса	Количество тепла	
		ккал/час	%
	Приход		
1	Тепло от сгорания топлива	994500	100,0
	Расход		
1	Потери тепла с отходящими газами	306880	30,8
2	Потери тепла от химического недожога	20680	2,1
3	Расход тепла на химические реакции обжига и испарение гигроскопической влаги	170500	17,1
4	Потери тепла с вышедшим из печи материалом .	12000	1,2
5	Тепло, переданное в сушилку из зоны остывания	320900	32,1
6	Потери тепла в окружающую среду и неучтенные потери	163591	16,7
	Всего	994500	100,0

Расход на обжиг 1 *кг* продукции равен 530 *ккал*, а за вычетом тепла, передаваемого в сушилку, — 360 *ккал*.

3. ПУСК И ОБСЛУЖИВАНИЕ ТУННЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ

Пуск печи требует особого внимания и должен быть произведен в короткий срок. Прежде всего вновь выстроенная печь должна быть хорошо высушена, а затем доведена до рабочего состояния. Сушку следует производить сразу по всей длине печи, для чего в самой печи устанавливают ряд жаровен, примерно, на расстоянии 10—15 *м* одну от другой. Сушка должна вестись около 5 суток при начальной температуре около 120° и постепенном ее повышении на 50° в день. По окончании сушки печь начинают разогревать. Для этого печь должна быть заполнена загруженными вагонетками. По мере разогрева печи вагонетки подвигаются вперед, обеспечивая постепенный подогрев остальных зон. Разогрев производят последовательным включением газовых горелок.

Обязательное условие нормальной работы туннельной печи — сохранение постоянного режима, прежде всего в отношении загрузки. Перерывы в работе или уменьшение числа подаваемых вагонеток нарушают распределение температур и тем самым нормальную работу печи.

От выбора системы садки зависит не только регулярная, бесперебойная работа туннельной печи, но и качество продукции, так как садка оказывает большое влияние на распределение газов и теплопередачу в печи. Садка на вагонетках должна быть достаточно плотной и вполне устойчивой.

Для кирпича стандартных размеров плотность садки составляет около 300 шт. на 1 $м^3$. Садка должна способствовать равномерному распределению газов по сечению печи. Необходимо, чтобы все поверхности изделий омывались горячими газами. При этих условиях теплопередача будет происходить наиболее интенсивно, материал—равномерно прогреваться. Так как бока садки обычно нагреваются быстрее середины, то, как правило, в центре садки следует делать канал и уменьшать зазор между печью и верхом и боковыми сторонами садки. В зависимости от особенностей обжигаемого материала ширина садки колеблется от 1,2 до 3,0 *м*, высота—от 1,2 до 1,8 *м*.

Вагонетки—наиболее дорогостоящая и изнашивающаяся часть оборудования. Вагонетка состоит из ходовой части, металлической рамы, достаточно прочной, чтобы выдержать нагрузку от садки, и огнеупорной футеровки для предохранения рамы от нагрева и действия печных газов. Длина вагонетки—от 1,5 до 3 *м*. Вагонетки имеют обычно роликовые подшипники. Вагонетки проталкивают через печь с помощью гидравлического или механического толкателя. Скорость передвижения вагонеток (от 0,9 до 2,5 *м/час*) зависит от длины печи и свойств обжигаемых изделий.

Благодаря теплопередаче через под температура металлических частей вагонеток может доходить в зоне обжига до 200°. Это сильно затрудняет смазку осей колес вагонеток и сокращает срок их службы. Для предохранения металлических частей вагонеток от непосредственного действия газов применяют песочные затворы. Это—желоба, проложенные в боковых стенках вдоль всей печи и заполненные песком или молотым шамотом. В желобах скользят металлические полосы, укрепленные на вагонетках и отделяющие таким образом печной туннель канала от пространства под вагонетками.

Плотность песочных затворов значительно влияет на работу печи: за их состоянием необходимо постоянно следить и периодически пополнять песком или шамотом. Стыки между вагонетками уплотняются асбестовым шнуром и промазкой шамотной массой.

Для лучшей работы осей и колес вагонеток в некоторых печах предусматривают искусственное охлаждение подшипников воздухом.

Под подом туннельной печи (и часто по всей длине) устраивают канал для осмотра и ремонта.

Глава V

ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС ПЕЧЕЙ

Для оценки работы печей пользуются коэффициентом полезного действия (к. п. д.), который представляет отношение тепла, полезно использованного для процесса, ко всему затраченному теплу. Для определения к. п. д. применяют метод составления теплового баланса, который позволяет сопоставить отдельные количества тепла, полученные и израсходованные в установке, и судить о правильности и целесообразности использования топлива.

Тепловой баланс состоит из двух частей: приходной и расходной. Обе части баланса должны быть равны, т. е. сумма всех поступлений тепла, полученного установкой, должна равняться количеству тепла, израсходованному в ней.

При составлении теплового баланса для действующей установки значения отдельных статей его определяют специальными испытаниями, которые дают материал для дальнейших расчетов. В случае составления баланса для вновь проектируемой установки значения отдельных статей определяются подсчетом или берутся по аналогии с такими же работающими установками.

Тепловой баланс может составляться: 1) на период времени, в течение которого работает установка (час, сутки, период испытания, обжига, сушки и т. п.); 2) на единицу расхода топлива (килограмм, тонна) или полный его расход за время испытания; 3) на единицу выработанной продукции (1 *т* полученного пара или обожженного материала, 1000 шт. кирпичей и т. д.).

Методики составления теплового баланса для печей периодического и непрерывного действия несколько отличаются друг от друга.

В печах периодического действия температура меняется во времени в течение процесса. В связи с этим меняется и количество тепла, аккумулированного кладкой. Тепловой баланс для этих печей составляется по отдельным периодам обжига.

Для печей непрерывного действия балансы составляются отдельно для каждой зоны печи и сводный—для всей печи в целом.

1. ПРИХОДНАЯ ЧАСТЬ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСА

Приход тепла в действующей печи включает: 1) тепло сожженного в ней топлива; 2) физическое тепло топлива; 3) тепло воздуха, введенного для сжигания этого топлива.

1) Химическое тепло $Q_г$, полученное от сжигания топлива, равняется его теплотворности, помноженной на весовое количество, и определяется по формуле:

$$\boxed{Q_т = BQ_н^р,} \qquad (148)$$

где: B — количество сожженного топлива;
$Q_н^р$ — его теплотворность.

2. Физическое тепло $Q_ф$, внесенное самим топливом, приходится учитывать обычно при сжигании газообразного или жидкого топлива, когда применяется подогрев. Температура подогрева t_m определяется непосредственным измерением.

Физическое тепло топлива:

$$Q_ф = B\,C_m\,t_m. \tag{149}$$

где: C_m — теплоемкость топлива.

3. Количество тепла, внесенного воздухом $Q_в$, определяется по формуле:

$$Q_в = L_0\,\alpha\,B\,C_в\,t_в, \tag{150}$$

где: L_0 — теоретическое количество воздуха для сжигания 1 *кг* топлива;
α — коэффициент избытка воздуха;
$C_в$ — теплоемкость воздуха;
$t_в$ — температура воздуха.

Значения L_0 и α определяются по данным анализа дымовых газов, $t_в$ — по замерам при испытании, $C_в$ — по соответствующим таблицам. Начальная температура для всех расчетов теплового баланса принимается равной 0°.

Общее количество внесенного в печь тепла равно:

$$Q_{прих} = Q_m + Q_ф + Q_в.$$

2 РАСХОДНАЯ ЧАСТЬ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСА

Расход тепла на нагрев материала до температуры окончания процесса. Это тепло равняется весу сухого материала $G_{см}$, умноженному на его теплоемкость при соответствующих температурах и на разность температур в начале и конце процесса:

$$Q_{с.м.} = G_{с.м.} \cdot C_м(t_{нач} - t_м). \tag{151}$$

Расход тепла на испарение влаги $Q_{исп}$ определяется по формуле:

$$Q_{исп} = G_{с.м.} \cdot W_0[595 + 0{,}47(t_{отх} - t_м)], \tag{152}$$

где: $t_{отх}$ — температура отходящих газов;
$t_м$ — температура материала;
$G_{с.м.}$ — вес сухого материала в *кг*;
W_0 — влажность материала в %;

595 — скрытая теплота парообразования в *ккал/кг*;

0,47 — теплоемкость водяного пара в *ккал/кг*.

Если тепло нагрева пара входит в потери с отходящими газами, то из формулы надо исключить величину $0{,}47t_{omx}$.

Расход тепла на химические реакции и физические процессы. В эту статью входят все расходы, связанные с реакциями физико-химических превращений в материале.

При обжиге извести расход тепла на разложение 1 *кг* $CaCO_3$ равняется 427 *ккал*. При обжиге керамических масс расход тепла на разложение глинистого вещества принимается в 500 *ккал* на 1 *кг* Al_2O_3 в глине. Для других материалов соответствующие значения следует брать из таблиц.

Различают два вида реакций: экзотермические и эндотермические. Тепло экзотермических реакций входит в приходную часть баланса, а тепло, затраченное на эндотермические реакции,—в расходную. Указанные расходы тепла вызываются особенностями процесса в тепловой установке, без которых процесс не может совершаться. Поэтому эти затраты тепла являются полезным расходом.

Потери тепла. Помимо полезного расхода тепла при работе всякой тепловой установки имеют место и другие расходы, связанные с возмещением потерь тепла. К этим потерям относятся: потери тепла с отходящими газами, потери от химической и механической неполноты сгорания топлива, потери в окружающую среду и потери с транспортными приспособлениями.

Потери тепла с отходящими газами Q_{omx} вычисляются по количеству отходящих газов, их температуре, теплоемкости и составу. Состав отходящих газов определяют по составу топлива и данным газового анализа, а температуру—непосредственными замерами:

$$\boxed{Q_{omx}=G_г\cdot C_г(t_{omx}-t_в),} \qquad (153)$$

где: Q_{omx} — тепло в отходящих газах;

$G_г$ — количество газов (определяется расчетом по формулам, см. раздел второй);

$C_г$ — теплоемкость газов при температуре t_{omx} (определяется по таблицам теплоемкости газов);

t_{omx} — температура отходящих газов;

$t_в$ — температура воздуха для горения (учитывается только при холодном воздухе, если за начало отсчета принимают не 0°, а температуру окружающей среды).

Из формулы (153) следует, что теплосодержание уходящих газов зависит от их количества и температуры.

Для улучшения работы установки надо понизить потери с отходящими газами. Объем отходящих газов можно снизить за

счет уменьшения избытка воздуха. Это достигается рациональным устройством топок и правильным ведением процесса сжигания топлива.

Так как потери тепла с отходящими газами обычно составляют значительную величину, то следует принимать меры к уменьшению этих потерь и использовать заключенное в газах тепло.

Потери от химической неполноты сгорания $Q_{хим}$ определяются по данным химического анализа отходящих газов и составляют.

$$Q_{хим} = 30{,}2 \cdot CO \cdot V^{н}_{с.г} \text{ ккал/кг топлива},$$

где: CO—содержание CO в продуктах горения в %;

$V_{с.г}$ —объем сухих газов $нм^3/кг$ топлива.

Потери от механической неполноты сгорания $Q_м$ включают потери от провала топлива через колосниковую решетку, от несгоревшего топлива в шлаках и потери с уносом мелких частиц топлива дымовыми газами.

Потери от провала и в очаговых остатках определяются по их количеству и анализу содержания в них углерода. Величина этих потерь зависит от конструкции топки, а также от режима сжигания топлива.

Потери с уносом в ряде случаев достигают очень большой величины, особенно при сжигании неспекающихся углей. Чем больше в топливе мелочи и чем форсированнее работа топки, тем больше мелких частиц уносится дымовыми газами в газоходы установки.

Общие потери от механической неполноты сгорания:

$$\boxed{Q_м = Q_{провал} + Q_{шлаков} + Q_{уноса}.} \qquad (154)$$

Потери от провала топлива и от несгоревшего топлива в шлаках определяются по их количеству и теплотворности. Количество провала определяют взвешиванием. Определение потерь с уносом сложнее, так как очистку газоходов от осевших в них частиц топлива можно производить только при ремонтах установки.

Потери тепла в окружающую среду $Q_о$ трудно определить экспериментальным путем. Обычно, если имеется возможность определить температуру поверхности, отдающей тепло, пользуются соответствующими формулами для определения теплоотдачи в окружающую среду.

Так как температура в различных частях тепловой установки неодинакова и коэффициент теплоотдачи также меняется в зависимости от положения и характера поверхности, то потери в

окружающую среду следует подсчитывать отдельно для свода, стен и других поверхностей печи, отдающих тепло.

К числу дополнительных потерь надо отнести потери на аккумуляцию тепла стенами в печах периодического действия. Для экспериментального определения этого расхода тепла измеряют температуру в различных частях кладки. Зная температуру и вес соответствующей части обмуровки, можно определить количество тепла, расходуемого на ее нагревание. Это тепло можно определить и расчетным путем с помощью различных методов, дающих достаточно точные результаты.

Потери на прогрев транспортных устройств $Q_{тр}$. В ряде тепловых устройств (сушилки, печи) материал в процессе нагрева находится на вагонетках или других транспортных приспособлениях и по окончании процесса выгружается вместе с ними. На нагрев этих приспособлений также затрачивается тепло, количество которого зависит от их веса, материала, температуры вагонетки при выходе из печи.
Эта зависимость выражается:

$$Q_{тр} = G_{тр} \cdot C_{тр}(t_{тр} - t), \qquad (155)$$

где: $Q_{тр}$ — расход тепла на прогрев транспортных устройств;
$G_{тр}$ — вес транспортных устройств;
$C_{тр}$ — теплоемкость материала этих устройств;
$t_{тр}$ — температура устройств при выгрузке;
t — температура наружного воздуха.

Полученные значения отдельных статей теплового баланса представлены в табл. 32.

$$\Sigma Q_{расх} = Q_{см} + Q_{исп} + Q_{реакц} + Q_{отх} + Q_{хим} + Q_{мех} + Q_{окр} + Q_{тр}.$$

Значения отдельных статей даются в калориях (абсолютные значения) и, кроме того, в процентах (относительные значения каждой статьи к общему расходу). Это позволяет оценить значение каждой статьи и сравнить работу однородных установок.

3. КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ПЕЧИ

В результате определения отдельных статей теплового баланса составляется уравнение:

$$Q_{прихода} = Q_{расхода},$$

или

$$Q_{прихода} = Q_{полезное} + Q_{потерь}. \qquad (156)$$

Очевидно, что чем больше $Q_{полезное}$, тем лучше используется тепло и тем лучше работает тепловая установка.

Таблица 32

Схема теплового баланса печи

Статьи баланса	Количество тепла		Примечание
	ккал	%	
Приход			Величина, на которую составляется тепловой баланс (вес продукции в *кг* или на единицу времени или за весь период) определяется особенностями процесса
Тепло топлива химическое . .	$Q_{т.х}$	$q_{т.х}$	
„ „ физическое . .	$Q_ф$	$q_ф$	
„ воздуха	$Q_в$	$q_в$	
Итого . . .	$\Sigma Q_{пр}$	100	
Расход			
Тепло нагрева материала . . .	$Q_{см}$	$q_{см}$	
Тепло испарения влаги	$Q_{исп}$	$q_{исп}$	
Тепло реакций	$Q_{реак}$	$q_{реак}$	
Тепло уходящих газов	$Q_{отх}$	$q_{отх}$	
Потери от химической неполноты сгорания	$Q_{хим}$	$q_{хим}$	
Потери от механической неполноты сгорания	$Q_{мех}$	$q_{мех}$	
Потери в окружающую среду .	$Q_{окр}$	$q_{окр}$	
Потери на прогрев транспортных устройств	$Q_{тр}$	$q_{тр}$	
Итого . . .	$\Sigma Q_{расх}$	100	

Коэффициент полезного действия (к. п. д.) выражается формулой:

$$\eta = \frac{Q_{полезное}}{Q_{прихода}} \cdot 100 = \frac{Q_{прихода} - Q_{потерь}}{Q_{прихода}} \cdot 100 \qquad (157)$$

Величина к. п. д. тепловых установок колеблется в широких пределах и зависит от рода установок и происходящих в них процессов. Так, в обычных котельных установках к. п. д. в среднем достигает 70%, а в новейших—90%. К. п. д. самих топок значительно выше: в отдельных конструкциях он достигает 95%. В печных установках промышленности строительных материалов к. п. д. чрезвычайно сильно колеблется. В периодических печах, работающих без использования тепла уходящих газов, к. п. д. невелик — от 10 до 20%.

Во многих случаях, помимо тепла уходящих газов, используется также тепло, заключенное в остывающих обожженных изделиях. Так происходит процесс обжига в печах непрерывного действия, к. п. д. которых значительно выше.

Значения к. п. д. для отдельных типов печей указаны в соответствующих разделах учебника, где приводится их описание.

Тепловой баланс действующей печи имеет большое значение для суждения о правильности и экономичности ее работы.

Глава VI

ВЫБОР СИСТЕМЫ ПЕЧИ

При выборе типа печи следует, в первую очередь, учитывать производительность печи, а также свойства обжигаемых материалов и изделий. Далее, необходимо принимать во внимание возможность легкого регулирования режима обжига; коэффициент полезного действия печи и удельный расход топлива; возможность механизации процессов загрузки и выгрузки, здоровые и безопасные условия труда.

Производительность печей определяется емкостью обжигательной камеры, скоростью процесса обжига, зависящей от режима обжига, и мощностью отопительных и тяговых устройств.

Сравнивать производительность печей одинаковой конструкции и назначения можно по количеству продукции, получаемой с единицы объема печи в одинаковый промежуток времени (сутки, месяц). Для непрерывно действующих печей (кольцевых, туннельных) суточная производительность может быть определена по формуле:

$$\boxed{P = \frac{KvF}{FL_p} = \frac{Kv}{L_p},} \qquad (158)$$

где: P — суточная производительность в 1 $м^3$ в *кг/сутки*;

K — плотность садки в $кг/м^3$;

v — скорость прохода огня в *м/сутки*;

F — площадь поперечного сечения канала в $м^2$;

L_p — длина рабочей части печи в *м*.

Режим обжига в печах определяется изменением температуры в течение всего процесса обжига и задается температурной кривой и характером атмосферы в печи (окислительная, восстановительная, нейтральная). Основным условием правильного режима является получение высокого качества изделий при минимальной продолжительности обжига.

Равномерность обжига — важнейшая характеристика печи, определяющая выход годной продукции и длительность обжига. Она зависит от равномерности распределения температур по объему печи.

Расход топлива на обжиг обычно характеризуется так называемым удельным расходом топлива, т. е. количеством топлива, расходуемого для обжига единицы продукции. В зависимости от конструкции печи и рода обжигаемого материала удельный расход топлива может изменяться очень сильно: у периодически действующих печей он достигает 60% и даже более от веса обожженных изделий; у печей непрерывного действия он значительно снижается и при одинаковых условиях в 2—3 раза меньше, чем у периодических печей.

Можно также определять расход топлива на 1 $м^3$ объема печи. В этом случае расход топлива отражает не только режим обжига, но и плотность садки.

В кирпичном и черепичном производствах удельный расход топлива измеряют в килограммах сожженного топлива на 1000 шт. изделий.

С расходом тепла на единицу продукции тесно связан к. п. д. печей, т. е. выраженное в процентах отношение полезно использованного тепла ко всему теплу, внесенному в печь. Однако для суждения о работе печи и установления путей уменьшения общего расхода важно знать не только к. п. д., но и распределение расходов тепла по отдельным статьям теплового баланса.

Эксплуатационные показатели, как и стоимость установки, весьма существенны для суждения о достоинствах системы печей. Наряду с общими требованиями (дешевизна, удобство и легкость обслуживания и т. п.) для всякой промышленной установки особенное значение имеет возможность упрощения и механизации загрузки и выгрузки изделий. Этим объясняется все расширяющееся применение туннельных печей. Среди других печей непрерывного действия для обжига керамических изделий они стоят на первом месте.

Расчет печи сводится к определению размеров рабочего пространства (обжигательной камеры), расхода топлива и размеров топочного устройства для его сжигания, размеров каналов для прохода газов и мощности вытяжного устройства.

Объем рабочей камеры печи вычисляется по соответствующим формулам и определяется в зависимости от производительности печи и продолжительности обжига.

Определение размеров топок. Величина топочных устройств зависит от общего расхода топлива в печи. Общий расход топлива на обжиг в печи определяется по удельному расходу топлива и по производительности печи. Удельный расход топлива часто определяют по аналогии с действующими установками или расчетным путем по тепловому балансу.

Определение размеров газоходов. Основным положением при выборе размеров газоходов является подбор таких сечений, которые создавали бы наименьшее сопротивление движению газов. Во многих случаях это является решающим для хорошей работы печи. При расчете нужно учитывать температуру газов в данном сечении и соответствующее изменение их объема. Во многих случаях из соображений удобства обслуживания полученные расчетным путем размеры газоходов приходится увеличивать. Так, для очистки и проверки состояния дымохода размеры дымовых каналов следует делать не меньше 1,8 *м* в высоту и 0,7 *м* в ширину.

Выбор вытяжного устройства. Подобрав сечение газоходов, составляют аэродинамический расчет всей печи, т. е. определяют сопротивление по всему пути движения газов для подбора мощности вытяжного устройства. Зная количество удаляемых газов и необходимый напор, подбирают высоту дымовой трубы или соответствующий вентилятор.

Глава VII

ПРИМЕРНЫЙ РАСЧЕТ ПЕЧИ ДЛЯ ОБЖИГА КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

В качестве примера приводим расчет размеров непрерывно действующей кольцевой печи для обжига строительного кирпича и тепловой расчет туннельной печи.

Задание. Определить размеры кольцевой печи кирпичного завода, при годовой производительности прессового цеха равной 15 400 000 шт. сырца.

Производительность печного цеха с учетом 3% брака при сушке и обжиге составит:

$$15\,400\,000 \cdot 0{,}97 = 14\,950\,000 \text{ шт.}$$

При продолжительности работы печного цеха 330 рабочих дней в году суточная производительность по обжигу составит:

$$14\,950\,000 : 330 = 45\,250 \text{ шт. в сутки.}$$

1. ОБЪЕМ И РАЗМЕРЫ ОБЖИГАТЕЛЬНОЙ КАМЕРЫ И КАНАЛА

Плотность садки в кольцевой печи принимаем 200 шт. сырца на 1 $м^3$ печного канала. При этом условии необходимый суточный объем обжигательного канала составит:

$$45\,250 : 200 = 226 \text{ } м^3.$$

При скорости огня 30 *м/сутки* сечение обжигательного канала будет равно:

$$F = \frac{226}{30} = 7{,}5\ м^2.$$

Для получения равномерного обжига по ширине обжигательного канала принимаем ширину его 3,6 *м*; тогда высота печи до замка свода составит:

$$H = \frac{F - \frac{\pi b^2}{8}}{b} + \frac{b}{2},$$

где: F — площадь поперечного сечения канала;
b — ширина печного канала.

$$H = \frac{7{,}5 - \frac{3{,}14 \cdot 3{,}6^2}{8}}{4} + \frac{3{,}6}{2} = 2{,}7.$$

Камеру печи принимаем шестиподсадочную с шагом подсадки 900 *мм*. Отсюда длина камеры будет равна:

$$900 \cdot 6 = 5\,400\ мм.$$

Принимаем продолжительность обжига 2,5 суток. Длина обжигательного канала при принятой скорости огня 30 *м/сутки* составит:

$$L = vZ + 2l,$$

где: v — скорость огня в *м/сутки*;
Z — время теплового цикла в сутки;
l — длина камеры в *м*.

$$L = 30 \cdot 2{,}5 + 2 \cdot 5{,}4 = 85{,}8\ м.$$

Отсюда необходимое количество камер:

$$85{,}8 : 5{,}4 = 16.$$

Конструктивно принимаем следующие размеры печи: 1) количество камер — 16; 2) длина камеры — 5,4 *м*; 3) ширина обжигательного канала — 3,6 *м*; 4) высота обжигательного канала — 2,7 *м*; 5) длина обжигательного канала по средней линии — 85.8 *м*.

2. РЕЖИМ РАБОТЫ ПЕЧИ

Принимаем следующий режим времени (в часах): 1) досушка—8,5; 2) на дыму—23,5; 3) на взваре—11,5; на остывании—17. Всего 60 час., или 2,5 суток.

Для принятого режима распределение камер печи по отдельным процессам будет следующим: 1) под загрузкой—1; 2) на досушке—2; 3) на дыму—5,5; 4) на взваре—2,5; 5) на остывании—4; 6) под выгрузкой—1. Всего—16 камер.

3. СОКРАЩЕННЫЙ ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ТУННЕЛЬНОЙ ПЕЧИ ДЛЯ ОБЖИГА ГЛИНЯНОГО КИРПИЧА

Данные для расчета:

Производительность годовая	15 млн. шт.
Продолжительность работы печи	365 дней в году
Температура обжига	1000°
Влажность сырца	5%
Вес сырца	3,8 *кг*
Длительность обжига	60 час.
Топливо—генераторный газ состава в %:	
CO_2	6,8
C_2H_4	0,2
CO	21,7
CH_4	0,6
H_2	15,2
N_2	55,5
Температура газа	300°

Режим обжига—по температурной кривой.

Определение размеров печи

Из условия обеспечения равномерности обжига принимаем поперечное сечение канала печи: ширина — 3 *м*, высота от пода вагонетки до замка свода—1,7 *м*. Длина вагонетки 3 *м*, емкость—3400 шт.

Весовая емкость печи с учетом 5% брака составляет:

$$\frac{3,8 \cdot 15\,000\,000 \cdot 60}{0,95 \cdot 365 \cdot 24} = 40\,500 \text{ кг}.$$

Число вагонеток:

$$n = \frac{40\,500}{3400 \cdot 3,8} = 32.$$

Активная длина печи: $3 \cdot 32 = 96$ *м*. Учитывая дополнительную длину канала для размещения толкателя равную 6,2 *м*, полная длина печи составит 102,2 *м*.

Длина отдельных зон в соответствии с заданной температурной кривой обжига составит:

зона подогрева:

$$\frac{96 \cdot 20,5}{60} = 33 \text{ м}, \text{ или } 11 \text{ вагонеток};$$

зона обжига:

$$\frac{96 \cdot 19}{60} = 30 \text{ м}, \text{ или } 10 \text{ вагонеток};$$

зона охлаждения:

$$\frac{96 \cdot 20,5}{60} = 33 \text{ м}, \text{ или } 11 \text{ вагонеток};$$

интервал толкания вагонеток:

$$\frac{60 \cdot 60}{32} = 112 \text{ мин.} = 1 \text{ час } 52 \text{ мин.}$$

По условиям тепловой работы отдельных участков приняты следующие материалы и конструкция ограждающих стен и свода печи.

1. Зона подогрева (позиции от 1 до 11) и зона остывания (позиции от 24 до 32). Стены из красного строительного кирпича—0,51 *м*. Свод из шамотного кирпича толщиной 0,25 *м*. Огнеупорная обмазка—0,015 *м*. Засыпка трепелом—0,115 *м*.

2. Зона обжига (позиции от 12 по 23 включительно) и зона охлаждения (позиции от 24 до 32). Стены: шамотный кирпич—0,23 *м*, изоляционный легковесный кирпич—0,23 *м*, красный кирпич—0,25 *м*. Свод: шамотный кирпич—0,25 *мм*, глиняная обмазка—15 *мм*, изоляционный кирпич—0,065 *м*, трепельная засыпка—0,1 *м*.

Футеровка вагонеток состоит из двух слоев: шамотного толщиной 0,17 *м* и изоляционного — 0,21 *м*.

4. ГОРЕНИЕ ТОПЛИВА

Теплотворность газа:

$$Q_н^р = 0{,}01\,(2580 \cdot 15{,}2 + 3040 \cdot 21{,}7 + 8500 \cdot 0{,}6 + 14200 \cdot 0{,}2) =$$
$$= 1126 \text{ ккал/м}^3.$$

Физическое тепло газа при 300° и $C_г = 0{,}33$ *ккал/м³ град* составит $Q_ф = 99$ *ккал/м³*.

Полное количество тепла газа:

$$1126 + 99 = 1225 \text{ ккал/м}^3.$$

Определение расхода кислорода, а также состава и количества продуктов горения приводится в табл. 33.

Таблица 33

Расход кислорода, состав и количество продуктов горения топлива

Состав топлива	Проценты	Расход кислорода		Продукты горения в *м³*				
		коэффициент	количество в *м³*	CO_2	H_2O	O_2	N_2	Всего
CO_2	6,8	—	—	6,8	—	—	—	—
CO	21,7	0.5	10,8	21,7	—	—	—	—
CH_4	0,6	2	1,2	0,6	1,2	—	—	—
C_2H_4	0,2	3	0,6	0,4	0,4	—	—	—
H_2	15,2	0,5	7,6	—	15,2	—	—	—
N_2	55,5	—	—	—	—	—	55,5	—
Итого	100	—	20,2	29,5	16,8	—	55,5	—
Из воздуха	—	—	20,2	—	—	—	76,3	96,5
Всего:								
при $\alpha = 1$				29,5	16,8	—	131,8	178,1
„ $\alpha = 4$				29,5	16,8	59	360	465

Теоретическая температура горения определяется по температуре обжига, равной 1000°, и пирометрическому коэффициенту горения, равному 0,8:

$$t_{теор} = \frac{t_{обж}}{\eta_{пир}} = \frac{1000}{0,8} = 1250°.$$

Избыток воздуха в зоне горения определяем из условия, что температура воздуха, поступающего из зоны остывания в зону обжига, равна 700°.

5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДА ТОПЛИВА

Расход топлива определяем из теплового баланса зон обжига и подогрева. Предварительно подсчитываются по отдельным участкам расход топлива на испарение влаги и нагрев материала, потери тепла в окружающую среду через стены и свод печи и нижнюю поверхность вагонетки, а также количество тепла, аккумулированного подом вагонеток.

Тепловой баланс составляем на 1 час работы печи. Часовая производительность печи с учетом 5% брака равна:

$$\frac{15\,000\,000}{0,95 \cdot 365 \cdot 24} = 1800 \text{ шт.}$$

Расход тепла на испарение влаги

Принимаем остаточную влажность кирпича 5%, или 200 г; температуру отходящих газов—150°; сырца—20°:

$$Q_{ис} = 1800 \cdot 0,2\,[595 + 0,47\,(150 - 20)] = 236\,150 \text{ ккал/час.}$$

Расход тепла на нагрев материала до 1000°

Теплоемкость кирпича:

$$0,193 + 0,000075\,(t_{обж} + t_н) = 0,193 + 0,000075\,(1000 + 20) = \\ = 0,269 \text{ ккал/град кг.}$$

$$Q_{наг} = 0,269\,(1000 - 20)\,1800 \cdot 3,5 = 1\,642\,000 \text{ ккал/час.}$$

Расход тепла на химические реакции

Расход тепла на химические реакции принят 28 *ккал/кг* сухой массы:

$$Q_{хим} = 1800 \cdot 3,8 \cdot 28 = 191\,500 \text{ ккал/кг.}$$

Таблица 31

Потеря тепла через стены и свод печи

Зоны и участки	Длина участка в *м*	Интервал температур в град.	Средняя t^o	Конструкция: материалы	Конструкция: толщина в *м*	λ в *ккал/м гр. час*	α в *ккал/м² гр. час*	K в *ккал/м² гр. час*	Площадь F *м²*	Q в *ккал/час*	Примечание
Зона подогрева											
1-й участок	18	20—200	110	Стены: строительный кирпич	0,51	0,433	7,0	0,76	78	5350	$\lambda_{с.к}=0,4+0,0004t$
				Свод: шамотный кирпич,	0,265	0,64	7	0,15	54	750	
				изоляционный трепел	0,255	0,04					$\lambda_{и.к}=0,6+0,00055t$
2-й участок	15	200—550	375	Стены	0,51	0,49	8	0,85	65	19800	
				Свод	0,265	0,765	8	0,163	45	2600	
					0,265	0,045					
Зона обжига											
3-й участок	24	550—1000	775	Стены: шамотный кирпич	0,23	1,0					
				изоляционный „	0,23	0,25	10	0,56	104	44000	
				строительный „	0,25	0,45					
				Свод: шамотный кирпич	0,265	1,1					
				изоляционный „	0,065	0,27	10	0,33	72	17950	
				смазка	0,050	0,12					
				трепел	0,1	0,05					
4-й участок	6	1000—1000	1000	Стены: шамотный кирпич	0,230	1,12					
				изоляционный „	0,230	0,33	10	0,67	26	17100	
				строительный „	0,250	0,5					

Продолжение

Зоны и участки	Длина участка в *м*	Интервал температур в град.	Средняя t^o	Конструкция: материалы	Конструкция: толщина в *м*	λ в *ккал/м град час*	α в *ккал/м² град час*	K в *ккал/м² град час*	Площадь F в *м²*	Q в *ккал/час*	Примечание
				Свод: шамот изоляционный,	0,265	1,12					
				смазка-трепел	0,065	0,33	10	0,345	18	6100	
					0,050	0,14					
					0,1	0,05					
Зона охлаждения											
5-й участок	9	1000—550	775	Так же, как 3-й участок				0,56	39	16500	
								0,33	27	6750	
6-й участок	24	550—50	300	Стены: строительный кирпич	0,51	0,48	8	0,845	104	24600	
				Свод: шамотный кирпич,	0,265	0,74					
				трепел изоляционный	0,255	0,045	8	0,19	72	3300	

Всего потери через стены и свод

Зона подогрева:	участок 1	18 *м* —	6100
	участок 2	15 *м* —	22400
			28500
Зона обжига:	участок 3	24 *м* —	63950
	участок 4	6 *м* —	23200
			87150
Зона охлаждения:	участок 5	9 *м* —	23250
	участок 6	24 *м* —	27900
			51150
Всего по печи	. . . . .		166800

Потери тепла в окружающую среду

Расчет потерь производится по формуле:

$$Q_п = KF(t_{вн} - t_н),$$

где: K — коэффициент теплопередачи в *ккал/м² град час*;
F — поверхность теплопередачи в *м²*;
$t_{вн}$ — температура внутренней поверхности печи в °С;
$t_н$ — температура помещения в °С.

Поверхность теплопередачи F считается для свода по внутренней его поверхности, для стен—от нижней поверхности пода вагонетки до верха стены.

Для подсчета потерь тепла ограждениями длина печи условно разделена на отдельные участки, средняя температура которых принята равной полусумме температур на границе участков.

Коэффициент теплопередачи для каждого участка подсчитан с учетом конструкции этой части стены или свода и коэффициента теплопередачи наружных стен по формуле:

$$K = \frac{1}{\frac{S}{\lambda} + \frac{1}{\alpha}},$$

где: S — толщина стены или свода в *м*;
λ — коэффициент теплопроводности материала ограждения в *ккал/м град час*;
α — коэффициент теплоотдачи, равный 6—10 *ккал/м² град/час*.

Конечные результаты расчета потерь для зон нагрева, обжига и охлаждения приведены в табл. 34.

Расчет тепла, аккумулированного футеровкой вагонеток

Количество тепла, получаемое или отдаваемое вагонеткой в каждом участке печи, подсчитывается по формуле:

$$Q_{ак} = C_{ср} G (t_{кон} - t_{нач}),$$

где: $C_{ср}$ — средняя теплоемкость кладки в интервале температур от $t_{нач}$ до $t_{кон}$;
$C_{ср} = 0{,}193 + 0{,}000075\ (t_{нач} + t_{кон})$;
G — вес кладки футеровки в *кг/час*;
$t_{кон}$ — средняя температура в конце участка;
$t_{нач}$ — средняя температура в начале участка.

Вес шамотного слоя одной вагонетки равен:

$$3 \cdot 3 \cdot 0{,}14 \cdot 1800 = 2270\ кг.$$

Вес шамотного слоя, отнесенный к одному часу работы печи, равен:

$$\frac{2270 \cdot 32}{60} = 1210 \text{ кг},$$

вес изоляционного слоя одной вагонетки:

$$3 \cdot 3 \cdot 0{,}21 \cdot 700 = 1320 \text{ кг},$$

или на 1 час работы:

$$\frac{1320 \cdot 32}{60} = 704 \text{ кг/час};$$

вес металлических частей вагонетки:

$$\frac{5000 \cdot 32}{60} = 2670 \text{ кг/час}.$$

Теплоемкость металлических частей $C_{мет} = 0{,}12$ *ккал/кг град.*

Распределение температур по толщине футеровки вагонетки приведено в табл. 35[1].

Таблица 35

Распределение температур в поду вагонетки

№ участка	Температура в печи		Средняя температура шамотного слоя		Средняя температура изоляционного слоя		Температура нижней поверхности футеровки	
	в начале участка	в конце участка	в начале участка	в конце участка	в начале участка	в конце участка	в начале участка	в конце участка
Зона подогрева								
1	20	200	20	130	20	40	20	20
2	200	550	130	380	40	127	21	35
Зона обжига								
3	550	1000	380	752	127	298	35	77
4	1000	1000	752	790	298	336	77	89
Зона охлаждения								
5	1000	550	790	518	336	290	89	94
6	550	50	518	127	290	128	75	57

[1] Метод расчета температур при неустановившемся режиме см. Гинзбург Д. Б. и др. Теплотехнические расчеты установок силикатной промышленности. Промстройиздат, 1951, стр. 40.

Расчет тепла, теряемого нижней поверхностью вагонетки

Теплоотдача нижней поверхности вагонетки определяется по формуле:

$$Q_{п.в.} = \alpha F_п (t_{пов} - t_{нар})\ ккал/час,$$

где: α — коэффициент теплоотдачи нижней поверхности вагонеток (для холодных частей принят в 6—8 *ккал/м² град час*, для горячих — 10 *ккал/м² град час*);

$F_п$ — площадь теплоотдачи (учитывая сложную конфигурацию, она рассчитана по поверхности вагонетки с увеличением на 25%);

$t_{пов}$ — температура нижней поверхности вагонетки: для участка № 1—21°; № 2—28°; № 3—56°; № 4—83°; № 5 — 92°; № 6—66°.

Результаты подсчета количества тепла, аккумулированного вагонетками на отдельных участках, и отдача тепла нижней поверхностью вагонеток приведены в табл. 36.

Таблица 36

Затраты тепла на аккумуляцию вагонетками и отдачу нижней поверхностью

№ участка	Интервал температур	Получено (знак +) или отдано (знак —) в *ккал/час*				Отдача тепла нижней поверхностью вагонетки в *ккал/час*	Всего получено или отдано внутрь тепла в *ккал/час*
		шамотным слоем	изоляционным слоем	металлическими частями	всей вагонеткой		
		Зона подогрева					
1	20—200	27300	2800	300	30400	400	+30800
2	200—550	70000	13300	4500	87800	3600	+91400
		Зона обжига					
3	550—1000	124500	27800	13400	165700	25500	+191200
4	1000—1000	13900	6400	3850	24150	15000	+ 39150
					308050	44500	
		Зона охлаждения					
5	1000—550	—93500	—7750	+1600	—99650	19600	— 80050
6	550—50	—109300	—24850	—5750	—139900	33100	—106800
					239550		

Потери тепла с отработанными дымовыми газами

Температура уходящих дымовых газов принята 150°. Общее количество дымовых газов вычислено при коэффициенте избытка воздуха $\alpha=4$ и часовом количестве сжигаемого газа, равном B.

$$Q_{ух}=[1{,}78\cdot 0{,}35+(4-1)\cdot 0{,}97\cdot 0{,}32](150-20)B=200\,B.$$

8. На неучтенные потери принято 5% общего расхода тепла. Сумма расходов тепла по статьям 1—8 составляет расходную часть баланса.

6. ПРИХОД ТЕПЛА

Приходная часть баланса состоит из количества тепла топлива, сжигаемого в 1 час, и количества тепла горячего воздуха, поступающего из зоны остывания.

Тепло горения газа при расходе его B *м³/час* составит

$$Q_{газ}=1225\,B \text{ ккал/час}.$$

Тепло горячего воздуха, поступающего из зоны остывания при коэффициенте избытка воздуха $\alpha=4$:

$$Q_{воз}=4\cdot 0{,}97\cdot 0{,}32(700-20)B=844\,B \text{ ккал/час}.$$

Всего приход тепла составляет 2069 B *ккал/час*.

Приравнивая приход тепла к расходу, определяем из уравнения теплового баланса часовой расход газа:

$$236\,150+191\,500+1\,642\,000+308\,050+44\,500+115\,650+200\,B+$$
$$+1\,225\,B\cdot 0{,}05=2\,069\,B$$
$$2\,537\,850+261\,B=2\,069\,B,$$

откуда

$$B=\frac{2\,537\,850}{1808}=1\,403 \text{ м}^3/\text{час}.$$

Расход генераторного газа на 1000 шт. кирпича составит:

$$1403:1{,}8=780 \text{ м}^3$$

Расход условного топлива на 1000 шт. кирпича:

$$\frac{780\cdot 1225}{7000}\,7000=136 \text{ кг}$$

Тепловой баланс зон обжига и подогрева приведен в табл. 37.

Таблица 37

Тепловой баланс зон обжига и подогрева

№ п/п	Наименование статей	*ккал/час*	%
	Приход топлива		
1	Химическое тепло топлива: 1225·1403 = ...	1718675	59,4
2	Физическое тепло воздуха: 844·1403 = ...	1184100	40,6
	Итого . . .	2902775	100,0
	Расход тепла		
1	На испарение влаги	236150	8,1
2	На химические реакции . .	191500	6,1
3	На нагрев материала . . .	1642000	56,7
4	Тепло, аккумулированное кладкой вагонеток	308050	10,5
5	Тепло, отданное нижней поверхностью вагонеток . ,	44500	1,5
6	Потери в окружающую среду	115650	4,0
7	Тепло с дымовыми газами 200 · 1403=	280600	9,7
8	Неучтенные потери	84325	2,9
	Итого . . .	2902775	100,0

Тепловой баланс зоны охлаждения

Тепловой баланс зоны охлаждения (табл. 38, А) дает возможность определить количество тепла для подогрева воздуха на горение и для использования на другие нужды, путем отвода нагретого воздуха в сушилку.

Приходная часть баланса подсчитывается на основе таблиц 35 и 36. Расходная статья по п. I определяется по температуре наружного воздуха 20° и подогрева до 700°; статьи по п. п. 3, 4, 5—на основании таблицы 36; по п. 7 при температуре выходящего материала 50°.

Неучтенные потери (п. 6) являются результатом потерь горячего воздуха через неплотности подвижного состава и ограждений и приняты по практическим данным.

Тепло воздуха, отводимого на сторону определяется по разности приходной части баланса и суммы п. п. 1, 3, 4, 5, 6, 7 расходной части баланса.

На основании баланса зоны обжига и подогрева и зоны охлаждения составлен сводный баланс всей печи (табл. 38, Б).

Таблица 38

А. Тепловой баланс зоны охлаждения

№№ п. п.	Наименование статей	ккал./час	%
	Приход тепла		
1	Тепло материала	1642000	84,3
2	Тепло, аккумулированное футеровкой вагонеток в конце зоны обжига	308050	15,7
	Итого	1950050	100,0%
	Расход тепла		
1	На нагрев воздуха, идущего на горение	1184100	60,8
2	Тепло с воздухом на сторону	496000	25,4
3	Потери в наружную среду	51150	2,6
4	Тепло с выходящим транспортом	68500	3,5
5	Потери через подину вагонеток	52700	2,7
6	Неучтенные потери	81300	4,2
7	Тепло с выходящим материалом	16300	0,8
	Итого	1950050	100,0%

Б. Сводный тепловой баланс печи

№№ п. п.	Наименование статей	ккал./час	%
	Приход тепла		
1	Химическое тепло топлива	1718675	100,0
	Расход тепла		
1	На испарение влаги	236150	13,8
2	На химические реакции	191500	11,1
3	Тепло с отработанными газами	280600	16,3
4	Потери во внешнюю среду	166800	9,7
5	Потери через подину вагонеток	97200	5,7
6	Потери с транспортом	68500	4,0
7	Потери с выходящим материалом	16300	1,0
8	Тепло с воздухом на сторону	496000	28,8
9	Неучтенные потери	165625	9,6
	Итого	1718675	100,0%

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОВТОРЕНИЯ К ВОСЬМОМУ РАЗДЕЛУ

1. Что такое промышленная печь?
2. В чем состоит основное отличие печей периодического и непрерывного действия?
3. Какие типы печей вы знаете?
4. Каковы способы экономии тепла в печах периодического действия?
5. Опишите принцип работы многокамерной газовой печи.
6. Опишите устройство кольцевой печи.
7. Какие виды садки применяют в кольцевых печах?
8. Что такое скорость огня и от чего она зависит в кольцевых печах?
9. Как определяется производительность кольцевых печей?
10. Как устроена и работает туннельная печь?
11. В чем основное преимущество туннельных печей по сравнению с другими?
12. Как определяют основные размеры туннельной печи?
13. Какие виды топлива применяют для обжига в туннельных печах?
14. Опишите основные особенности туннельной печи Укрпромпроекта.
15. Опишите устройство печи Росстромпроекта.

РАЗДЕЛ ДЕВЯТЫЙ

ПЕЧИ ДЛЯ ОБЖИГА ВЯЖУЩИХ ВЕЩЕСТВ

При производстве портландцемента и местных вяжущих веществ (извести, магнезита, доломита и гипса) обжиг является важнейшей стадией технологического процесса.

Для обжига вяжущих веществ в настоящее время применяются шахтные и вращающиеся печи, в отдельных случаях—печи других типов, а также устройства для обжига сырья во взвешенном состоянии.

Глава I

УСТРОЙСТВО И РАБОТА ШАХТНЫХ ПЕЧЕЙ

Шахтные печи являются одним из наиболее старых типов печей, сохранивших, вследствие простоты устройства и теплотехнических достоинств, свое значение до нашего времени.

Обжигательная камера шахтных печей представляет собой шахту, загрузка сырья в которую производится сверху, а выгрузка обожженного материала—снизу.

Газовый поток в шахтных печах, наоборот, направлен снизу вверх. Таким образом, шахтные печи работают по принципу противотока. По характеру процессов, происходящих в обжигаемом материале, в шахтных печах по высоте различают три зоны: зону подогрева, зону обжига и зону охлаждения.

Самые существенные изменения в обжигаемом материале (диссоциация карбонатов и др.) происходят в зоне обжига, где создаются наиболее высокие температуры, за счет сгорания здесь топлива.

В зоне подогрева происходит нагревание опускающегося вниз сырья поднимающимися вверх горячими газами из зоны обжига.

В зоне охлаждения происходит теплообмен между обожженным материалом и холодным воздухом, поступающим снизу в печь. В результате процессов теплообмена, осуществляемых по принципу противотока в зонах подогрева и охлаждения, в шахтных печах происходит возвращение значительной части тепла, уносимого газами и обожженным материалом из зоны обжига обратно в эту зону. Благодаря этому шахтные печи имеют, по сравнению с другими печами, высокий к. п. д., достигающий 60% и выше. Вторым достоинством шахтных печей являются большие возможности механизации загрузки и выгрузки.

Глава II

ШАХТНЫЕ ПЕЧИ ДЛЯ ОБЖИГА МЕСТНЫХ ВЯЖУЩИХ ВЕЩЕСТВ

Шахтные печи широко применяются для обжига извести и других местных вяжущих веществ.

Форма поперечного сечения шахтных печей, применяемых для этой цели, разнообразна (рис. 120). Сечение вертикальной плоскостью, так называемый профиль печи, обычно представляет прямоугольник, иногда суживающийся кверху или книзу. Встречается также форма печей в виде двух усеченных конусов, сложенных друг с другом широкими основаниями. Отношение высоты печи к наибольшему размеру в горизонтальном сечении всегда больше двух.

Рис. 120. Профили шахтных печей.

Выбор формы и размеров печи зависят от ее производительности и особенностей обжигаемого материала.

1. ТИПЫ ШАХТНЫХ ПЕЧЕЙ

Шахтные печи по способу отопления делятся на следующие основные типы: а) пересыпные печи; б) печи с выносными топками для твердого топлива; в) печи, отапливаемые газом. В первых топливо подается в печь вместе с загружаемым материалом, и сгорание его происходит в среде самого материала. Во вторых сжигание топлива происходит в топках, расположенных по периферии печи. В газовых печах горючие газы (генераторный и др.) сжигаются также в среде самого материала.

Пересыпные печи. В пересыпные печи топливо можно подавать несколькими способами. В одних печах топливо в определенной пропорции может смешиваться предварительно с обжигаемым материалом и в таком виде загружаться в печи; в других топливо и материал подаются последовательно—послойно, в соотношении, определяемом особенностями обжига.

Достоинствами пересыпных печей являются: простота конструкции, сравнительно легкое обслуживание, малый расход топлива и большая производительность. При обжиге извести в пересыпных печах достигается производительность свыше 100 *т/сутки*.

Механизированная пересыпная печь для обжига извести показана на рис. 121. Загрузка материала происходит в верхнюю

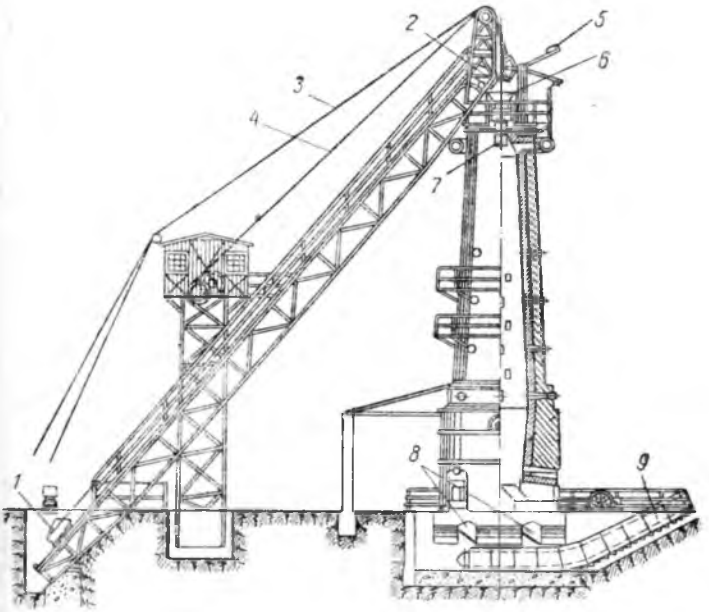


Рис. 121. Современная механизированная пересыпная шахтная печь для обжига извести: *1*—ковш скипового подъемника; *2*—ковш в момент загрузки; *3*—трос для подъема колокола; *4*—трос для подъема ковша; *5*—противовес; *6*—загрузочная воронка; *7* — колокол; *8* — отверстия для выгрузки; *9*—транспортер.

часть печи через воронку; выгрузка—внизу через разгрузочные окна. Выгружаемый материал передается транспортером на склад. Для устранения засасывания воздуха, а также увеличения прочности печь заключена в сплошной железный кожух. Наблюдение за обжигом ведется через отверстия в корпусе печи, рас-

положенные на различной высоте. Наблюдение происходит с галерей, расположенных вокруг печи.

Типовая известковообжигательная пересыпная печь представлена на рис. 122.

Недостаток пересыпных печей—засорение материала золой. Если примеси золы могут ухудшить качество обжигаемого материала, применение пересыпных печей недопустимо. Если же зольные остатки не влияют на качество продукта обжига, то пересыпные печи рекомендуется применять.

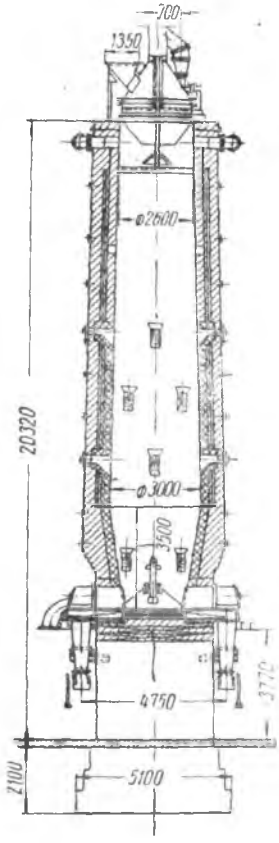


Рис. 122. Типовая известковообжигательная пересыпная печь с разгрузочным механизмом системы Антонова.

Для отопления пересыпных печей необходимо применять топливо с малым количеством летучих. Непригодность для пересыпных печей длиннопламенного топлива объясняется тем, что выделение летучих веществ из него может происходить в верхней части печи, откуда они будут уходить несгоревшими в атмосферу. Тем самым, расход топлива на обжиг увеличивается.

Топливом для пересыпных печей служит преимущественно антрацит.

Печи с выносными топками. Различают два типа шахтных печей с выносными топками: печи с топками полного сгорания и печи с полугазовыми топками.

Шахтные печи с топками полного сгорания характеризуются неравномерностью обжига и небольшой производительностью. Наивысшая температура (1000—1100°) в зависимости от вида топлива достигается в самой топке. Газы из топки проходят через окна в шахту и, поднимаясь главным образом вдоль стенок, оставляют среднюю часть мало прогретой. Поэтому часто получается пережог материала у стен печи при одновременном недожоге в середине ее.

Значительно более распространены шахтные печи с полугазовыми топками (рис. 123) конструкции Росстромпроекта. Процесс обжига в них происходит следующим образом: полугаз из топок при сравнительно невысокой температуре (600—800°) и с повышенным содержанием CO и H_2 направляется в печь, где, вступая в соединение с подаваемым туда вторичным воздухом, догорает, развивая необходимую для обжига температуру в 1000—1200°.

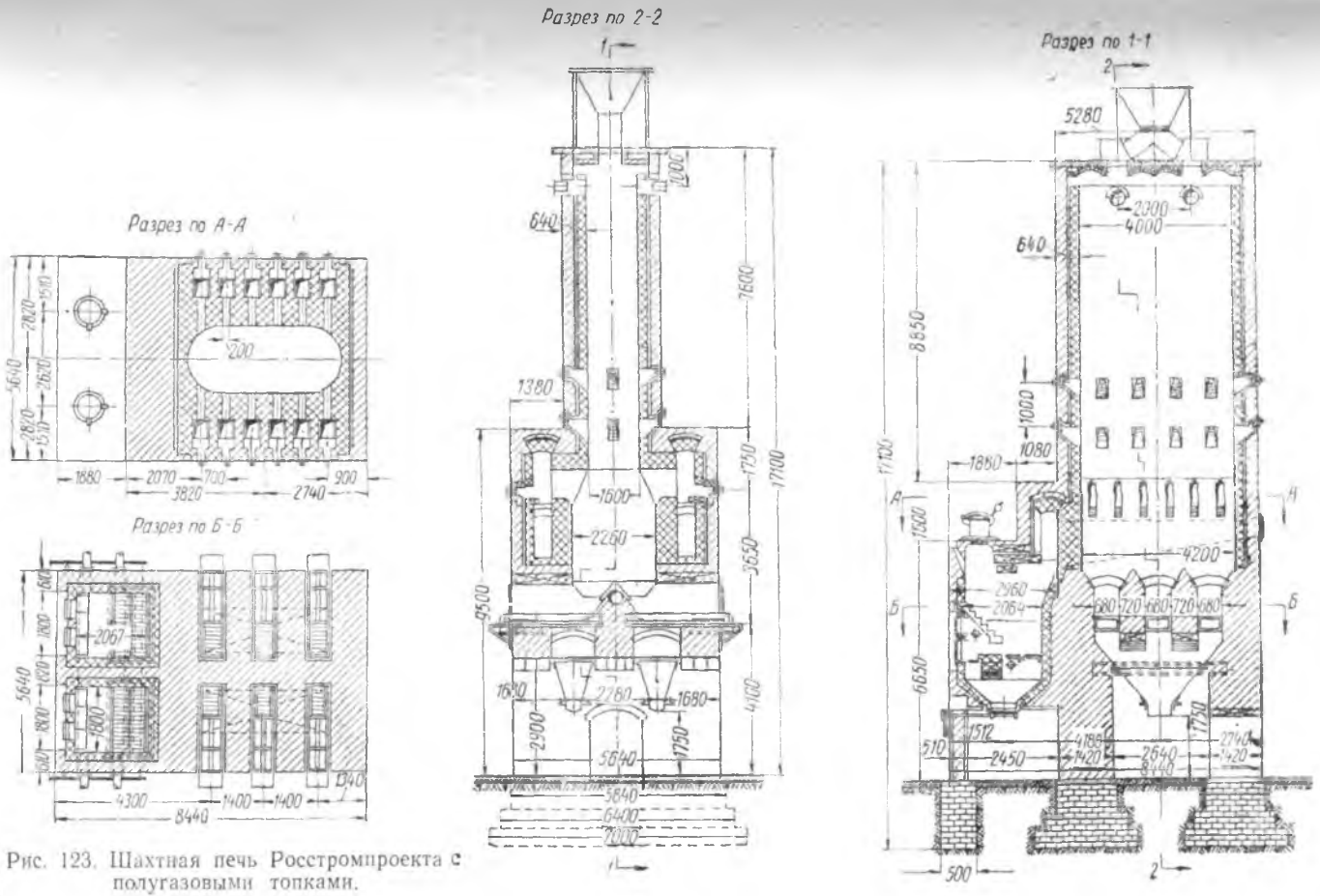


Рис. 123. Шахтная печь Росстромпроекта с полугазовыми топками.

Для равномерности подачи и распределения по печи полугаза по длинным сторонам печи расположены два газовых распределительных канала, соединенных вертикальными каналами с полугазовыми топками.

Для равномерного обжига размеры шахты печи не должны превышать определенной величины. При круглых печах диаметр шахты ограничен размером 2,0—2,2 *м*. При необходимости получить большую производительность, вместо круглого сечения применяют удлиненное, овальное, с малой осью, размером не более 2 *м*; длина большой оси доходит до 6 *м*.

В печах с полугазовыми топками можно применять любое топливо, благодаря чему они распространены всюду, где имеется местное длиннопламенное топливо.

Газовые печи. В печах с газовым отоплением (рис. 124) чаще всего сжигается природный или генераторный газ. Ввод воздуха в печь может происходить или по периферии или же через окна в полом столбе в центре шахты печи, так называемом керне. Керн применяется в печах большой производительности. Наличие керна дает возможность равномерно подогревать материал по всему сечению шахты.

2. ЗАГРУЗОЧНЫЕ И РАЗГРУЗОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА ШАХТНЫХ ПЕЧЕЙ

Механизация загрузки шахтной печи осуществляется сравнительно легко. Подача материала на верх печи производится различными подъемными устройствами: шахтными, скиповыми и другими подъемниками.

Простейшим устройством для равномерной загрузки материала в печь является конус (колокол). Благодаря ему загружаемый в печь материал распределяется более равномерно. Наиболее равномерное распределение материала по сечению печи получается, если диаметр основания конуса составляет 0,7 от диаметра шахты.

Чтобы газы не выбивались при открывании конуса и загрузке печей применяют специальные устройства, напоминающие загрузочные коробки газогенераторов с двумя конусами—верхним и нижним. Загрузка происходит в два приема. При открытом верхнем конусе топливо загружается в коробку; нижний конус в это время закрыт. Затем верхний конус, опускаясь, прикрывает коробку, а нижний—открывает нижнее отверстие загрузочной коробки, и материал из нее опускается в печь. Оба конуса одновременно не могут быть открыты.

Правильная разгрузка печи имеет очень большое значение для повышения ее производительности. Из печи всегда следует выгружать ровно столько материала, сколько она успевает обжечь. Выгружать из печи обожженный материал вручную очень тяжело. Ввиду этого в настоящее время на всех печах, даже небольшой производительности, применяют механические разгру-

зочные устройства. Наибольшим распространением пользуется разгрузочное устройство системы Г. Г. Антонова (рис. 125), состоящее из ступенчатых кареток, устанавливаемых в количестве четырех или шести в разгрузочных отверстиях печи. Каретки

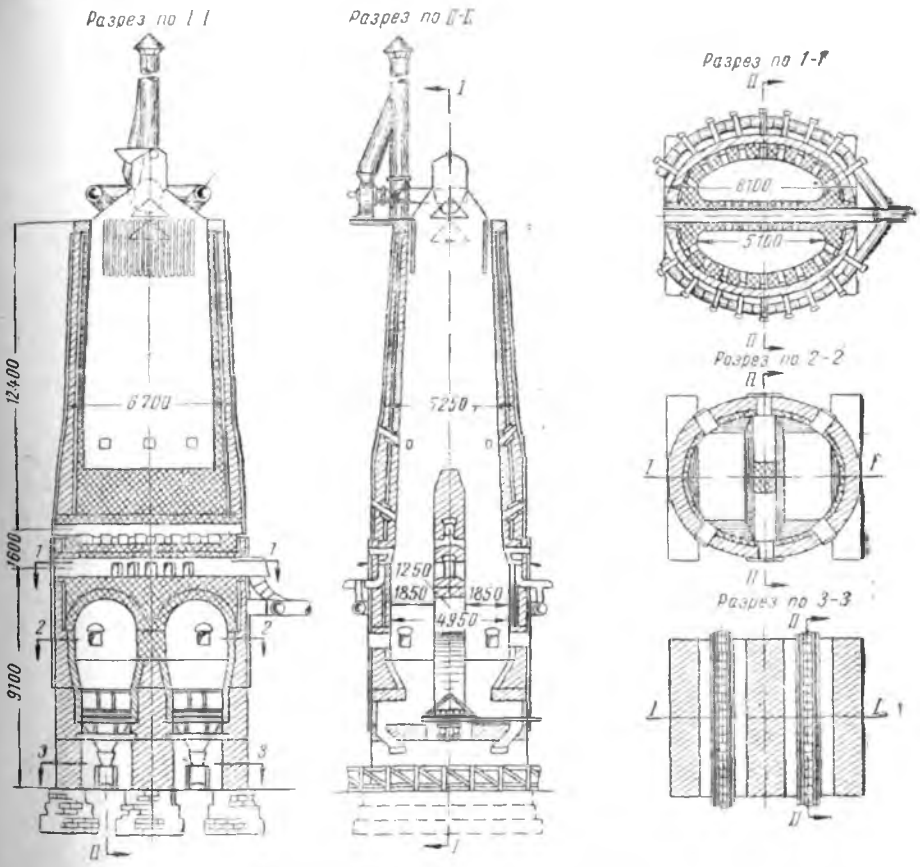


Рис. 124. Шахтная печь с газовым отоплением.

эти могут двигаться взад и вперед по роликам, получая движение от кривошипа и шатуна. Изменяя ход шатуна и число оборотов кривошипа, можно изменять производительность разгрузочного устройства.

Выгрузка происходит следующим образом. При неподвижном положении каретка засыпана обожженным материалом на длину, соответствующую углу естественного откоса обожженного материала. Когда каретка начинает двигаться взад и вперед, она проталкивает куски материала в люк, сделанный под кареткой в кладке печи, из которого обожженные куски направляются на транспортер.

Производительность установки зависит от числа оборотов кривошипа и величины хода каретки, который необходимо отрегулировать так, чтобы он соответствовал производительности печи и чтобы выгрузка протекала непрерывно. Периодическая

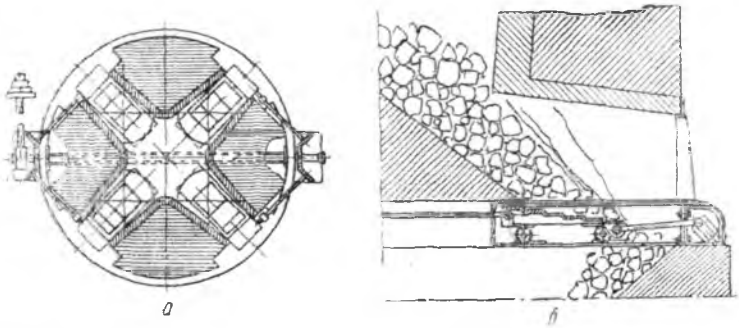


Рис. 125. Разгрузочный механизм системы Антонова: *а*—план; *б*—разрез.

работа выгрузочного устройства недопустима. Это часто наблюдается в известковых печах, когда их включают только на отдельные промежутки времени, в течение которых происходит ускоренное удаление из печи обожженного материала, а в перерывах в печи форсируется обжиг. Такая неравномерная работа печи отражается на ее состоянии и главным образом на качестве обожженного продукта.

3. ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ШАХТНЫХ ПЕЧЕЙ

Главнейшими требованиями, предъявляемыми к шахтной печи, являются: высокая производительность, равномерный обжиг, небольшой расход топлива.

Основным условием высокой производительности печи является хороший теплообмен между потоком горячих газов и обжигаемым материалом. Это зависит прежде всего от правильной подачи в печь воздуха.

Шахтные печи могут работать как под давлением, так и под разрежением. В первом случае все необходимое количество воздуха нагнетается вентилятором обычно в нижнюю часть печи. В печах, работающих под разрежением, воздух засасывается под действием разрежения, создаваемого дымовой трубой или вентилятором, поставленным в верхней части печи.

Печи, работающие под давлением, как правило, дают большую производительность, чем печи, работающие под разрежением. Это объясняется тем, что из-за отсутствия подсосов холодного воздуха процесс горения в печах, работающих под

давлением, идет более равномерно по всему сечению печи. Давление дутья в печах доводится в настоящее время до большой величины — 1000 *мм* вод. ст. и выше. При наличии такого дутья необходимо принимать специальные меры для устранения выбивания газов через неплотности. Поэтому большие современные шахтные печи, работающие с таким давлением, заключаются в сплошные металлические кожухи. При применении дутья необходимо для создания плотности и предупреждения выбивания воздуха при выгрузке обожженного материала устраивать воздушные шлюзы (см. рис. 129).

На производительность, так же как и на равномерность обжига, большое влияние, помимо величины дутья, оказывают равномерное распределение воздуха и величина кусков обжигаемого материала. При этом большое значение имеет однородность кусков по величине. Если в смеси находятся куски разной величины и мелочь, сопротивление для прохода газов резко возрастает, и производительность печи уменьшается. Одновременно ухудшается равномерность обжига.

Высокую производительность известеобжигательных шахтных печей можно получить, применяя однородные сортированные по величине куски известняка, так как использование однородных мелких кусков значительно сокращает время обжига. Влияние величины кусков на продолжительность обжига известняка представлено на рис. 126.

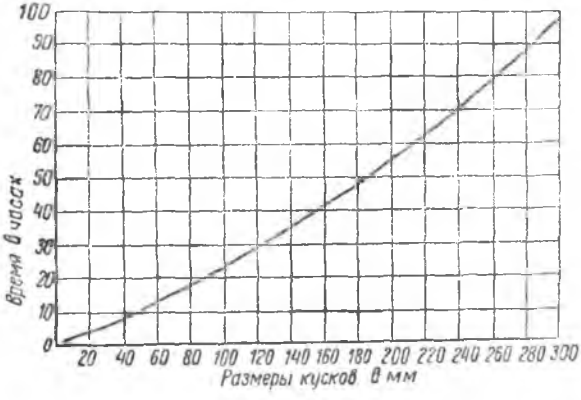


Рис. 126. Зависимость времени обжига от величины кусков известняка в пересыпной шахтной печи.

Производительность полугазовых печей для обжига извести может быть увеличена при добавке непосредственно в шахту печи по ее центру некоторого количества короткопламенного топлива (антрацита, изгари и т. п.). Как показал опыт

работы Щуровского завода, применяющего подмосковный уголь, таким путем можно повысить производительность печи на 75%. Количество топлива, добавляемого в шахту, зависит от его свойств и устанавливается опытом. Оно не должно превышать 20—30% общего расхода топлива.

Производительность шахтных печей характеризуется объемным напряжением шахты, под которым понимают отношение суточной производительности печи к полезному объему шахты:

$$H_0 = \frac{P}{V}, \qquad (159)$$

где: H_0 — объемное напряжение в *кг/м*³ в сутки;
P — суточная производительность в *кг*;
V — полезный объем печи в *м*³.

Полезным объемом печи считается внутренний объем ее, заполненный обжигаемым материалом. Для пересыпных печей коэффициент заполнения колеблется от 0,85 до 0,96. В полугазовых печах полезным объемом печи условно считают объем печи, заполненный обжигаемым материалом, за вычетом объема холодильника. За высоту холодильника принимают расстояние от конуса выгрузочного устройства до нижнего края газовых окон.

Величина напряжения колеблется в значительных пределах и зависит от ряда условий: вида обжигаемого материала и его гранулометрического состава, топлива, величины дутья и др. При обжиге известняка объемное напряжение пересыпных печей находится в пределах от 500 до 1500 *кг/м*³ в сутки: нижний предел—при обжиге крупных кусков (80—150 *мм*) с мелочью, верхний—при обжиге однородных по величине кусков (20—40 *мм*).

4. ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ШАХТНЫХ ПЕЧЕЙ

Особенностью процессов теплопередачи в шахтной печи является большая поверхность соприкосновения газового потока с обжигаемым материалом. Благодаря этому теплопередача протекает интенсивно, и отходящие газы имеют сравнительно невысокую температуру (150—250°).

Ниже приводится тепловой баланс известково-обжигательной печи, отапливаемой полугазами из подмосковного угля (по данным теплотехнического обследования).

Таблица 39

Тепловой баланс полугазовой известково-обжигательной печи на 1 *кг* извести

№ п. п.	Наименование статей	*ккал*	%
	Приход тепла		
1	Тепло топлива, сожженного в полугазовых топках	1509,60	100,00
	Всего.	1509,60	100,00
	Расход тепла		
1	Расход тепла на нагревание топлива	0,74	0,05
2	Расход тепла на нагревание первичного воздуха	1,44	0,10
3	Потеря тепла с очаговыми остатками в топке	233,17	15,44
4	Расход тепла на нагревание известняка	6,3	0,42
5	Расход тепла на нагревание вторичного воздуха	1,4	0,10
6	Расход тепла на испарение влаги из известняка	37,8	2,50
7	Расход тепла на разложение $CaCO_3$ и $MgCO_3$	656,9	43,50
8	Потери тепла:		
	а) с отходящими газами	341,8	22,64
	б) от неполноты сгорания полугаза	36,3	2,43
	в) с выгружаемой из печи известью	4,3	0,28
	г) в окружающую среду и неучтенные потери	189,1	12,52
	Всего	1509,6	100,00

Коэффициент полезного действия печи:

$$\eta = 0{,}05 + 0{,}10 + 0{,}42 + 0{,}10 + 2{,}5 + 43{,}5 = 46{,}67\ \%.$$

Довольно значительная потеря тепла с отходящими газами объясняется большими засосами воздуха в верхней части печи и повышенной в данном случае температурой отходящих газов (320°).

Удельный расход условного топлива составляет в пересыпных печах для обжига извести 15—16% от веса обожженной извести, повышаясь для газовых и полугазовых печей до 22—25%.

Распределение температур в шахтной известковообжигательной печи представлено на рис. 127.

Сравнительная характеристика шахтных печей различных систем приведена в табл. 40.

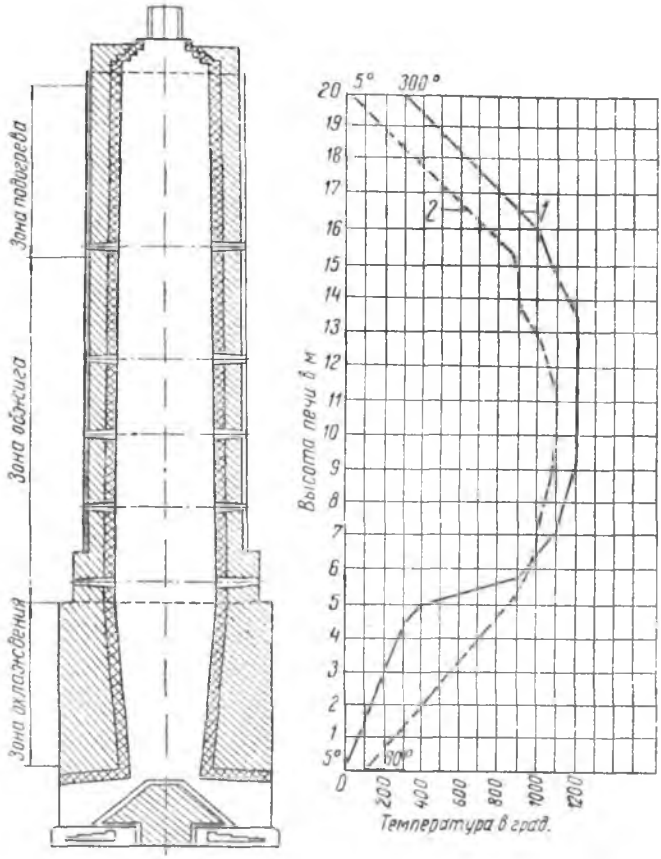


Рис. 127. Распределение температур в шахтной известковообжигательной печи: *1*—температура газов; *2*—температура камня.

Таблица 40

Сравнительная характеристика шахтных печей

Тип печи	Форма и размеры сечения	Область применения	Вид применяемого топлива	Производительность в *т/сутки*	Напряжение объема в *кг/м³* в сутки	Удельный расход топлива в % к обожженному изделию
Пересыпная	Круглое до 5 *м*	Обжиг извести	Антрацит	До 100 и выше	500—1500	15—17
С выносными топками полного сгорания	Круглое 1,8 *м*	Обжиг извести	Длиннопламенное	До 10		25—30
	Круглое прямоугольное	Обжиг гипса		До 70	До 700	4—5
	Круглое 2,2 *м*	Обжиг доломита		До 20	300—400	
С выносными полугазовыми топками	1,6×6 *м*	Обжиг извести	Длиннопламенное	До 50	500—800	18—20
Газовая	Круглые и овальные с керном	Обжиг извести	Газ	До 100	400—700	22—25

Глава III

АВТОМАТИЧЕСКИЕ ШАХТНЫЕ ПЕЧИ ДЛЯ ОБЖИГА ЦЕМЕНТНОГО КЛИНКЕРА

Шахтные печи для обжига клинкера впервые появились в восьмидесятых годах прошлого столетия. Они имели ряд существенных недостатков, основными из которых были:

1) ручная загрузка сырья и выгрузка клинкера;
2) недостаточное давление воздушного дутья;
3) небольшая производительность (до 0,5 *т/час*).

Постепенно совершался переход от немеханизированных печей к полностью механизированным—автоматическим шахтным печам.

Основные преимущества автоматических печей следующие:

1) полная механизация загрузки сырья в печь;
2) автоматизированная непрерывная выгрузка клинкера из печи;

3) высокое давление воздушного дутья (до 2500 *кг/м²* и выше), что является основным фактором повышения производительности печи;

4) равномерное распределение топлива в обжигаемом материале.

1. КОНСТРУКЦИИ АВТОМАТИЧЕСКИХ ШАХТНЫХ ПЕЧЕЙ

Наибольшее распространение в цементной промышленности получили автоматические печи с размерами 2,5×10 *м* и 2,55×11 *м*. Кроме этих печей имеются малогабаритные печи Гипроцемента размерами 2×6 *м* и 1,5×4,5 *м*. В табл. 41 приведены характеристики печей.

Таблица 41

Сравнительная характеристика шахтных печей для обжига клинкера

Показатели	Размеры печей, *м*			
	1,5×4,5	2×6	2,5×10	2,55×11
Производительность печи, *т/час*	2,5 (3,0)*	2,5 (4,1)	4,1 (6,0)	4,1 (6)
Удельный расход тепла *ккал/кг*	1200—1300	1200—1300	1200—1300	1200—1300
Высота печи, *м*	4,5	6	10	11
Диаметр печи, *м*	1,5	2,0	2,5	2,55
Давление дутья, *кг/м²*	700 (1500)	400 (700)	700 (1500)	700 (1500)
Тип загрузочного устройства	Пресс-бегуны	Пресс-бегуны	Вращающиеся тарелки	Пресс-бегуны
Число оборотов загрузочного устройства, об/мин	20—60	19	10	4—8
Мощность двигателя загрузочного устройства, *квт*	—	6,8	—	6,0
Тип выгрузочного устройства	Вальцы	Вращающаяся решетка		Вальцы
Число оборотов выгрузочного устройства, об/мин.	1—5	0,76—3,05	0,62—2,5	1—4
Мощность двигателя выгрузочного устройства, *квт*	—	2	4,4	8,5
Тип затвора	Бункерный	Трехшлюзовый		—

* Величины, приведенные в скобках, показывают производительность печи при повышенном дутье, также указанном в скобках.

Автоматическая шахтная печь имеет следующие основные части:

а) шахту;
б) механическое загрузочное устройство;
в) автоматическое выгрузочное устройство;
г) автоматический воздушный затвор;
д) воздухоподводящие и газоотводящие устройства.

Шахта печи

Автоматические шахтные печи имеют шахты круглого сечения, переходящие у некоторых печей в нижней части в квадратное сечение для установки вальцевых выгрузочных устройств. Производительность печи повышается прямо пропорционально квадрату диаметра печи. Однако трудность равномерного распределения газового потока по сечению ограничивает поперечные размеры печи. Поэтому обычно диаметры печей не превышают 3 *м*.

В целях охлаждения футеровки в зоне горения между наружной стенкой и футеровкой шахты делается воздушный канал толщиной 50—140 *мм*, в который подается холодный воздух. Во многих печах этот воздух после охлаждения внутренней футеровки направляется через фурму под зону горения. Тем самым сокращается путь газам и уменьшается сопротивление движению газов в печи.

Обжигаемый материал в зоне подогрева уменьшается в объеме, между футеровкой и материалом образуются большие зазоры, куда устремляются газы, вследствие чего материал подготовляется неравномерно и из печи уносится большое количество пыли. Поэтому в современных шахтных автоматических печах для обжига клинкера верхняя часть шахты делается конической, расширяющейся кверху.

На рис. 128 представлена печь, имеющая цилиндрическую верхнюю часть шахты диаметром 2,55 *м* и высотой 8,5 *м*. В нижней части шахта переходит в квадратное сечение 2,65 $\times$ 2,65 *м*.

Шахта печи размером 2$\times$6 *м* выложена из обыкновенного глиняного и шамотного кирпича. Она заключена в стальной кожух, в верхней части которого имеется четыре кольцевых канала высотой 400 *м*, соединенных между собой. Эти каналы служат для охлаждения футеровки наружным воздухом, продуваемым через них вентилятором.

Футеровка шахты автоматических печей должна предохранять кожух корпуса печи от высоких температур и истирающего действия опускающегося вниз материала. Условия работы футеровки в различных зонах печи различны. Наиболее быстро разрушается футеровка в зоне максимальных температур, где футеровка одновременно подвергается термическим, химическим и механическим воздействиям. Здесь применяют шамотный огне-

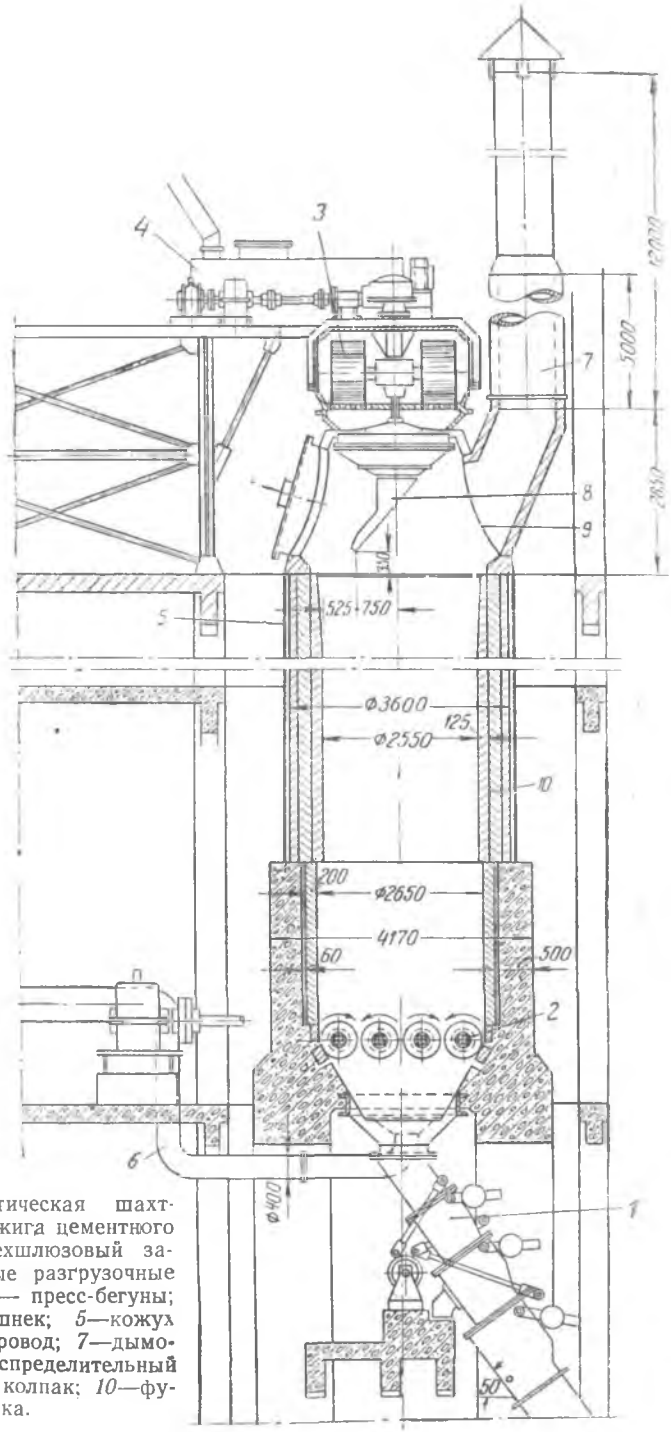


Рис. 128. Автоматическая шахтная печь для обжига цементного клинкера: *1*—трехшлюзовый затвор; *2*—вальцовые разгрузочные устройства; *3* — пресс-бегуны; *4*—смесительный шнек; *5*—кожух печи; *6*—воздухопровод; *7*—дымовая труба; *8*—распределительный желоб; *9*—печной колпак; *10*—футеровка.

упорный кирпич класса А. В остальных зонах футеровка выполняется из шамотного огнеупорного кирпича класса Б.

Футеровку нижней части шахты делают из чугунных жаростойких плит.

Загрузочные устройства

Для непрерывной загрузки и равномерного распределения в шахтных печах сырьевой массы в виде брикетов или гранул служат механизированные загрузочные устройства, из которых наибольшее распространение получили пресс-бегуны.

Сырьевая мука, размолотая совместно с углем, из бункера поступает в двойной разгрузочный шнек, где она увлажняется до 11 ÷ 18% и по желобу направляется в пресс-бегуны, которые являются вместе с тем и загрузочным аппаратом. В чаше бегунов имеется дырчатое дно, состоящее из отдельных сегментов, толщиной 40÷70 *мм*, изготовляемых из стали и легко изменяемых при износе. Диаметр отверстий в чаше бегунов — 15÷30 *мм*.

Два чугунных катка пресс-бегунов вращаются со скоростью 4 ÷ 8 об/мин.

Катки продавливают через отверстия в дне пресс-бегунов сырьевую смесь. Получаются цилиндрики диаметром 15 и 30 *мм*. Под действием собственного веса они отрываются и попадают в печь через вращающуюся воронку, которая равномерно распределяет сырьевую массу по сечению печи.

Тарельчатые загрузочные приспособления у печи размером 2,5×10 *м* представляют собой вращающуюся тарелку диаметром 1620 *мм*, на которую брикеты поступают по желобу. Специальный нож, вращающийся несколько медленнее тарелки, сбрасывает брикеты с тарелки в печь, равномерно распределяя их по ее сечению.

Разгрузочные устройства

Выгрузка клинкера из автоматических шахтных печей должна происходить непрерывно и равномерно по всему сечению печи. Разгрузочными устройствами автоматических шахтных печей служат:

а) вращающиеся круглые колосниковые решетки,

б) решетки с возвратно-поступательным движением,

в) вальцовый разгрузочный механизм.

Круглая колосниковая решетка у печей размерами 2×6 *м* и 2,5×10 *м* вращается на вертикальном валу со скоростью от 0,7 до 6 об/час. Сверху решетка покрыта зубьями для дробления клинкера, которые наплавлены твердым сплавом. Высота зубьев увеличивается от периферии к центру. Раздробленные куски, проваливаясь сквозь решетку, попадают в сборную воронку.

В тяжелых условиях работы, когда температура выходящего клинкера достигает 400°, решетка должна обеспечить равномерную разгрузку клинкера. При помощи реверсивного редуктора решетка может изменять направление вращения. Некоторые действующие печи имеют круглые вращающиеся решетки не на вертикальном валу, а на шести роликах. Печи размером 2,55 × 11 и 1,5 × 4,5 *м* снабжены разгрузочным механизмом, состоящим из 4 зубчатых вальцов диаметром 400 и 340 *мм*, с зазорами между ними 110 и 50 *мм*. Каждая пара вальцов, вращаясь навстречу одна другой, дробит куски клинкера, который, проваливаясь, попадает в сборную воронку. Скорость вращения вальцов можно регулировать.

Шахтные автоматические печи имеют трехшлюзовый автоматический затвор (рис. 129). Выгрузка клинкера

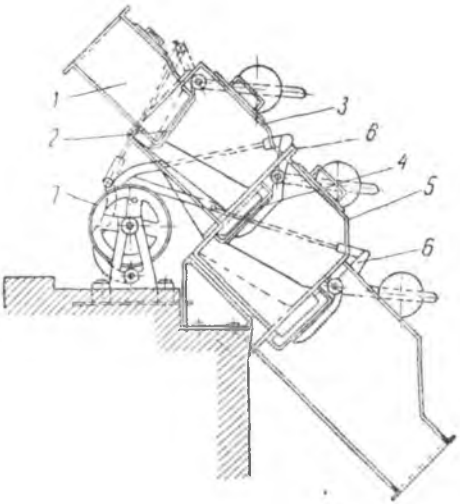


Рис. 129. Трехшлюзовый затвор автоматической шахтной печи.

через затвор происходит следующим образом. При накоплении клинкера в камере воронки *1* открывается первый клапан *2* и клинкер попадает в первую камеру шлюза *3*. Затем закрывается клапан *2*, открывается клапан *4* и клинкер попадает во вторую камеру шлюза *5*. После этого клинкер высыпается наружу. Все клапаны открываются при помощи рычагов *6*, приводимых в движение кулачковым механизмом *7*. Кулачки и рычаги устанавливаются так, чтобы всегда был открыт только один клапан. Шлюзовое устройство создает герметичность в нижней части печи.

2 ГОРЕНИЕ ТОПЛИВА В АВТОМАТИЧЕСКИХ ШАХТНЫХ ПЕЧАХ

В автоматических шахтных печах топливо сжигается тонкоизмельченным, запрессованным в сырьевые брикеты.

Топливо можно смешивать с сырьевой массой или в процессе совместного размола или в дробленом (кусочки до 5 *мм*) виде — перед формовкой брикетов. При первом способе, наиболее распространенном, получается «черный брикет», при втором—«белый брикет». Сгорание топлива в среде материала происходит подобно горению весьма зольного топлива, сжигаемого в очень толстом слое.

Процессы сгорания топлива и разложения сырьевых материалов по высоте автоматической шахтной печи представляются в следующем виде: в верхней части шахты, в зоне подогрева, сырье и топливо теряют всю влагу; затем, по мере продвижения вниз к зоне горения, они нагреваются до температуры, при которой топливо разлагается на летучие горючие и твердый остаток—кокс, а в сырье происходит дегидратация глин и декарбонизация $CaCO_3$ и $MgCO_3$. Так как в этой зоне практически нет кислорода (он израсходован в зоне горения), то летучие горючие, выделяющиеся из топлива, не сгорев, уходят в дымовую трубу. Это значит, что в шахтных печах тем больше потери от химического недожога, чем больше в топливе летучих веществ. Топливо, выделив летучие вещества, поступает в зону горения.

Проф. В. Н. Юнг, разработавший теорию обжига цементного клинкера в автоматических шахтных печах, установил, что при горении топлива в тонкоразмолотом порошке («черный брикет») около половины углекислого газа (CO_2), выделяющегося из сырья, восстанавливается углеродом топлива до окиси углерода (CO), которая в дальнейшем под действием кислорода воздуха, вдуваемого в печь, вновь превращается в CO_2. Остальная часть топлива сгорает за счет непосредственного соединения углерода топлива с кислородом воздуха. Оба эти процесса протекают одновременно.

При горении мелкораздробленного топлива в сырьевой массе («белый брикет») процесс горения происходит так же. Но в данном случае реакция $C + CO_2 \rightleftarrows 2CO$ происходит менее интенсивно.

Схемы процессов горения по В. Н. Юнгу представлены на рис. 130.

На рис. 130,*а* представлена первая стадия горения топлива. Отдельные зерна топлива (кокса или антрацита) условно показаны черными кружками. В первую очередь сгорают кусочки топлива, близко расположенные к поверхности брикета. Происходит реакция $C + O_2 = CO_2$. Этот процесс совершается в самой верхней части зоны горения шахты печи; газы содержат мало кислорода, так как он используется, в основном, в более низких частях зоны. Одновременно в глубине первого слоя происходит

образование CO за счет реакции между CO_2 карбонатов и углеродом топлива. Окись углерода при встрече на поверхности с кислородом сгорает в углекислый газ.

Во второй стадии процесса горения по мере опускания топлива в шахте (рис. 130,*б*) частицы углерода, оставшиеся в поверхностном слое куска, догорают за счет кислорода, диффунди-

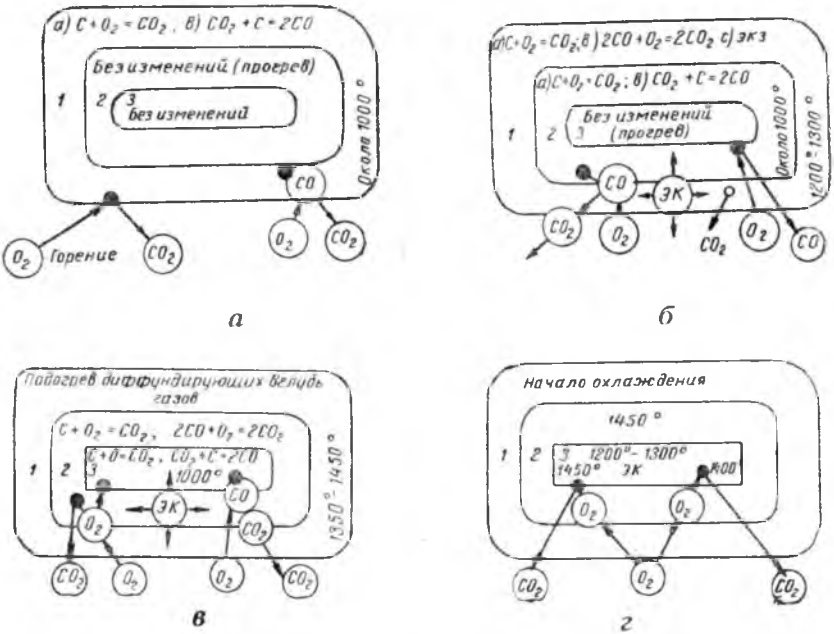


Рис. 130. Схемы горения топлива, запрессованного в брикеты: *а* — первая стадия; *б*—вторая стадия; *в*—третья стадия; *г*—четвертая стадия.

рующего из печных газов, уже более богатых им. Во втором слое повторяется явление, происходившее перед этим в первом слое, причем окись углерода беспламенно сгорает в пористой обжигаемой массе первого и второго слоя с весьма интенсивной передачей тепла обжигаемому материалу. Температура первого слоя при этом повышается до 1200—1300°, что ускоряет экзотермические реакции в материале.

В третьей стадии (рис. 130, *в*) топливо в первом слое совершенно выгорело, и дальнейшее повышение температуры в нем может происходить лишь за счет беспламенного горения окиси углерода, а также догорания остатков твердого топлива во втором слое.

Наконец, в последней стадии горения оставшийся углерод догорает в третьем, среднем слое (рис. 130, *г*).

Пока горение происходит в среде материала, он нагревается

настолько интенсивно, что клинкерообразование успевает закончиться. Затем обожженный материал—клинкер, опускаясь по шахте вниз, поступает в зону охлаждения. Здесь он охлаждается обтекающим его воздухом.

Теплообмен в шахтной печи заключается в переходе тепла от газового потока к поверхности материала (в зоне подогрева) или от поверхности материала к воздуху (в зоне охлаждения) и распространении тепла внутри кусков материала (главным образом в зоне обжига). В зоне охлаждения теплообмен совершается только конвекцией. В зоне же подогрева к конвекции добавляется излучение от трехатомных газов к материалу. Количество тепла, отдаваемого в зоне подогрева материалу излучением, незначительно вследствие небольшой толщины слоя газов в межкусковых каналах. Зато небольшая толщина слоя газов и развитая поверхность кусков обжигаемого материала создают высокую интенсивность теплоотдачи конвекцией.

3. ТОПЛИВО, ПРИМЕНЯЕМОЕ В ШАХТНЫХ ПЕЧАХ

Топливо для шахтных печей, как уже отмечалось, должно содержать мало летучих веществ—обычно не свыше 10%. Такими видами топлива являются: антрацит, коксик и некоторые тощие угли. Повышенная зольность топлива не является препятствием для сжигания его в шахтных печах, так как зола входит полностью, как присадка, в состав клинкера. Коксовая мелочь, входящая в сырьевую смесь, должна иметь крупность зерен не более 3 *мм* и не менее 1 *мм*.

Большое значение имеет тщательное дозирование топлива и сырьевой муки. Для этого применяют автоматические весы. Для образования гранул или брикетов смесь топлива и сырьевой муки увлажняют обычно от 11 до 18%, что зависит от пластичности материала: малопластичные материалы требуют большего количества воды и большего давления при прессовании.

4. АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ В ШАХТНЫХ ПЕЧАХ

Аэродинамическое сопротивление шахтной печи не поддается точным расчетам, так как оно зависит от целого ряда трудно учитываемых факторов (скорости газового потока в межкусковых каналах, кинематической вязкости газов, плотности потока, размеров кусков и т. п.).

Для приближенных подсчетов можно применять формулу Гипроцемента, дающую достаточно точные результаты:

$$\boxed{\Delta P = y \cdot H \left(\frac{Q}{F}\right)^2,} \qquad (160)$$

где: ΔP — аэродинамическое сопротивление печи в *кг/м²*;
y — опытный коэффициент; принимается:
для гранул $(0{,}7 \div 1{,}0) \cdot 10^{-10}$;
для крупных брикетов $(0{,}45 \div 0{,}6) \cdot 10^{-10}$;
для валюшек $(0{,}35 \div 0{,}45) \cdot 10^{-10}$;
H — высота печи в *м*;
Q — тепловая мощность печи в *ккал/час*;
F — площадь поперечного сечения печи в *м²*.

Достаточная прочность брикетов или гранул и небольшое количество образующейся в печи мелочи создают необходимые условия для нормальной работы печи с наименьшим аэродинамическим сопротивлением.

5. ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ АВТОМАТИЧЕСКИХ ШАХТНЫХ ПЕЧЕЙ

Производительность печи зависит от многих условий, главнейшими из которых являются:

1) давление дутья;
2) размеры и прочность брикетов или гранул;
3) начальная влажность материала, поступающего в печь;
4) качество пылевидного и др. топлива;
5) размеры печи.

С достаточной точностью можно определить производительность автоматической шахтной печи по эмпирической формуле, предложенной Гипроцементом:

$$G = \frac{0{,}785\, D^2}{V\sqrt{M}} \sqrt{\frac{\Delta P}{H}} \text{ кг/час}, \qquad (161)$$

где: M — коэффициент аэродинамического сопротивления принимается:
для кускового материала $(0{,}9 \div 1{,}3) \cdot 10^{-4}$;
для крупного брикета $(0{,}6 \div 0{,}8) \cdot 10^{-4}$;
для мелкого брикета $(0{,}45 \div 0{,}6) \cdot 10^{-4}$;
V — расход воздуха в *м³/кг* клинкера;
ΔP — аэродинамическое сопротивление печи в *кг/м²*;
H — высота печи в *м*.

Зная время пребывания материала в печи τ в часах можно определить производительность печи по следующей формуле:

$$G = \frac{0{,}785\, D^2 H \gamma}{\tau} \text{ кг/час},$$

где γ — объемный вес материала в *кг/м³*.

6. СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ АВТОМАТИЧЕСКИХ ШАХТНЫХ ПЕЧЕЙ

Основным средством повышения производительности автоматических шахтных печей является увеличение давления дутья. Однако важное значение имеет и целый ряд других условий:

1) правильная подготовка сырьевой смеси,

2) соблюдение оптимального режима обжига и уменьшение аэродинамического сопротивления печи,

3) исправное состояние шахты и механизмов, обслуживающих печь,

4) хорошая организация труда.

Правильная подготовка сырьевой смеси имеет большое значение не только для производительности печи, но и для качества клинкера. Необходимо соблюдать точную дозировку сырья и топлива в брикетах или гранулах, добиваясь максимально возможного уменьшения их влажности. При формовке сырьевой массы на пресс-бегунах влажность, в зависимости от пластичности массы, изменяется в узких пределах. Если, например, влажность будет на 2—3% выше нормальной, брикеты при падении сплющиваются, слипаются между собой; наоборот, при влажности ниже нормальной, брикеты получаются излишне сухими, они крошатся, и пропускная способность пресс-бегунов уменьшается.

Уменьшая размеры брикетов, можно ускорить процессы теплопередачи в печи. Аэродинамическое сопротивление печи увеличивается пропорционально квадрату производительности и зависит от способа и качества формовки сырьевой смеси. Большое значение при этом имеет однородность формы и размеров брикетов, а также достаточная прочность их. Необходимо также следить за равномерным распределением топлива в обжигаемой массе материала при совместном помоле.

Для повышения качества клинкера необходимо обеспечить равномерность обжига материала по всему сечению печи. Для этого загрузку брикетов в печь и выгрузку клинкера нужно производить непрерывно и равномерно по сечению печи. Так же равномерно по сечению печи должен распределяться и воздух. Правильное положение зоны горения определяется по температуре отходящих газов. При 120—200° положение зоны горения является нормальным, при температуре менее 120° зона горения опускается и получается недожог, при температуре выше 200° зона горения поднимается выше нормального уровня, топливо не успевает сгорать, что приводит к большой потере тепла от химической неполноты горения.

В последние годы коллективы работников Подгорненского, Амвросиевского и других цементных заводов повысили производительность шахтных печей более чем в два раза, за счет увеличения давления дутья, улучшения брикетирования, тщатель-

ного контроля за качеством сырья и топлива и хорошего обслуживания печей.

Гипроцементом спроектирована новая высокопроизводительная шахтная печь, рассчитанная на выпуск до 15 *т* клинкера в час. Ее диаметр 2,75 *м*, высота—8 *м*. Для интенсификации обжига предусматривается подача в печь воздуха, обогащенного кислородом до 30%.

Глава IV

ВРАЩАЮЩИЕСЯ ПЕЧИ

Вращающиеся печи представляют собой высокопроизводительные тепловые установки с неподвижной зоной обжига и перемещающимся материалом. Поток горячих газов и обжигаемый материал во вращающихся печах движутся по принципу противотока, т. е. навстречу друг другу.

Вращающиеся печи впервые были применены в цементном производстве в конце XIX века. За прошедшее с тех пор время в конструкцию вращающихся печей были внесены многие усовершенствования, повысившие производительность и экономичность их.

1. КОНСТРУКЦИЯ ВРАЩАЮЩИХСЯ ПЕЧЕЙ

Вращающиеся печи (рис. 131) представляют собой длинные трубы из толстой листовой стали, выложенные внутри огнеупорной футеровкой. Длина печей—от 40 до 150 *м*, диаметр—2,5÷5 *м*. Печь располагается с наклоном около 4° к горизонту и медленно вращается со скоростью 1—2 об/мин.

Вращающаяся печь состоит из следующих конструктивных элементов: а) корпуса с футеровкой; б) опор и привода; в) головки и уплотнительных устройств; г) теплообменных устройств; д) питателей.

Корпус печи

Корпус печи изготовляют из стальных листов толщиной 40 *мм*; до недавнего времени их соединяли заклепочными швами. В настоящее время применяются сварные конструкции, имеющие следующие преимущества:

1) экономию в весе, благодаря устранению стыковых накладок и заклепок, в размере около 15% от веса корпуса;

2) большую герметичность корпуса, что особенно важно при водяном охлаждении его;

3) облегчение условий футеровки вследствие отсутствия заклепочных головок;

4) удешевление работ по устройству сварного корпуса.

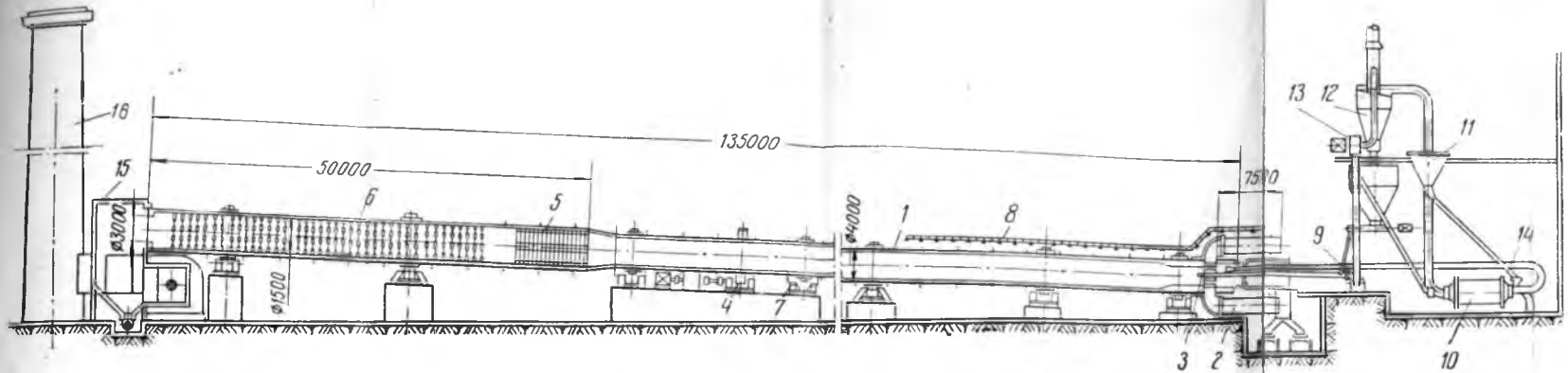


Рис. 131. Схема вращающейся печи: *1*—печь; *2*—рекуператоры; *3*—форсунки; *4*—привод; *5*—теплообменники; *6*—цепная завеса; *7*—упорные ролики; *8*—трубы для водяного охлаждения корпуса печи; *9* — вентилятор; *10*—шаровая мельница; *11*—сепаратор; *12* — циклон; *13* — вентилятор; *14*—трубопровод для отбора горячего воздуха из головки печи; *15*—камера для пыли; *16*—дымовая труба.

Зак. 1058

Футеровка печи. Внутри стальной корпус футеруется огнеупорными материалами для предохранения его от воздействий высоких температур. Вес огнеупорной футеровки всей вращающейся печи составляет от 160 до 600 *т* и более. Футеровка вращающейся печи работает в тяжелых условиях, подвергаясь истиранию перемещающейся обжигаемой массой и резким колебаниям температуры.

Особенно ответственна работа футеровки в зоне спекания. Температура газов и физико-химические процессы по длине печи различны. Поэтому для футеровки отдельных зон следует применять различные огнеупорные материалы, наиболее отвечающие условиям, характерным для этих зон. К таким огнеупорным материалам относятся: шамотные, тальковые, магнезитовые и хромомагнезитовые кирпичи, а также клинкерно-цементная футеровка. В зоне подсушки и дегидратации применяют шамотный кирпич класса *Б*, а входная часть и половина зоны цепной завесы могут футероваться клинкерно-цементным бетоном.

Для футеровки зон кальцинирования и охлаждения применяют шамотный кирпич класса *А*, для зоны спекания—магнезиальные огнеупоры: тальковый камень, магнезитовый и хромомагнезитовый кирпичи.

Кроме футеровки, в целях снижения теплопотери вращающейся печью через корпус, применяют теплоизоляционные прокладки между огнеупорной футеровкой и корпусом, что позволяет сэкономить до 15—20% топлива. Образование устойчивого слоя обмазки в зоне спекания толщиной 80—120 *мм* исключает необходимость теплоизоляции в этой зоне.

Несмотря на наличие футеровки, корпус работающей печи сильно нагревается, особенно в зоне спекания. Температура наружной поверхности печи в зоне спекания достигает 500°, у холодного конца она снижается до 50°.

Длина корпуса при нагревании печи увеличивается, что необходимо учитывать при ее эксплуатации.

Удлинение корпуса печи можно определить по следующей формуле:

$$\Delta l = \alpha\left(\frac{t_1 + t_2}{2} - t\right) l, \qquad (162)$$

где: Δl — удлинение печи в *мм*;

α — линейный коэффициент расширения стали, равный 0,000012;

t_1 — наивысшая температура в сечении, принятом за нейтральное;

t_2 — температура в конечной точке корпуса (у горячего или холодного конца);

t — температура окружающего воздуха;

l — длина от нейтрального слоя до конца печи в *мм*.

Опоры и привод печи

Корпус печи передает давление на опорные ролики и фундамент (рис. 132) через бандажи — массивные стальные кольца прямоугольного сечения. Опираясь на ролики и воспринимая вес печи, бандаж испытывает большое напряжение от

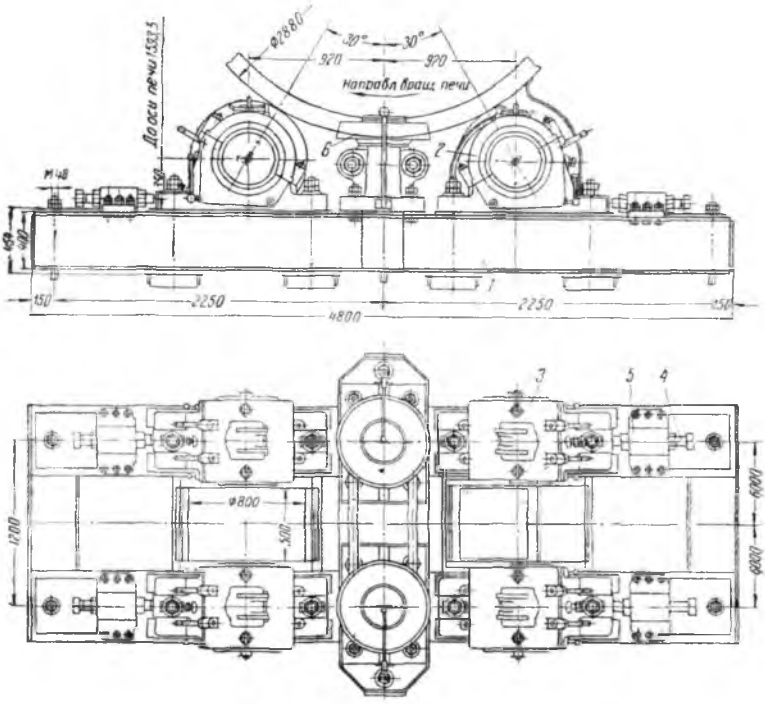


Рис. 132. Установка опорных и упорных роликов на вращающейся печи: *1*—фундаментная плита; *2*—опорные ролики; *3*—подшипник опорного ролика; *4*—натяжной болт; *5*—подшипник упорного ролика; *6*—упорный ролик.

изгиба. Опорные ролики должны выдерживать весьма значительное давление, поэтому они укрепляются на раме, которая в свою очередь крепится на железобетонном фундаменте. Для ограничения и контроля продольного передвижения корпуса при его нагреве с обеих сторон бандажей устанавливают упорные ролики.

Корпус печи вращается при помощи венцовой шестерни, которая приводится в движение электродвигателем через редуктор. На рис. 133 показан привод вращающейся печи.

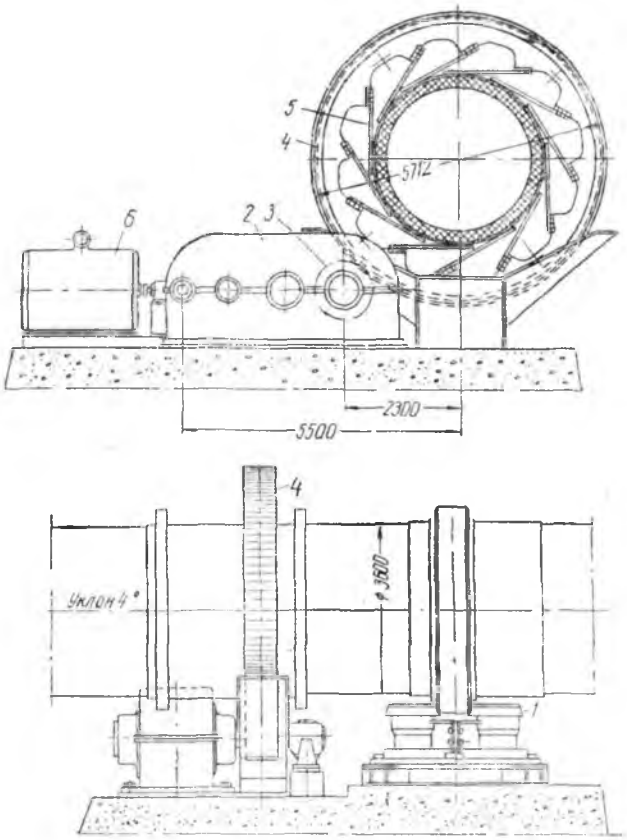


Рис. 133. Привод вращающейся печи: *1* — упорные ролики; *2*—редуктор; *3*—малая венцовая шестерня; *4*—большая венцовая шестерня; *5*—пластины крепления шестерни; *6*—электродвигатель.

Головка и уплотнительные устройства

Сопряжение печей с холодильником осуществляется с помощью откатной головки на 4 колесах (рис. 134), а у печей с рекуператорами горячий конец печи закрывается откатной крышкой, подвешенной на тележке и прижатой к печи натяжным устройством.

Места соединения головок с печью и холодного конца печи с пыльной камерой, во избежание присоса наружного воздуха, снабжаются уплотнительными устройствами. Наиболее распространенными являются следующие конструкции:

1) с передвижным кольцом,
2) из стальных колец,
3) с асбестовым шнуром.

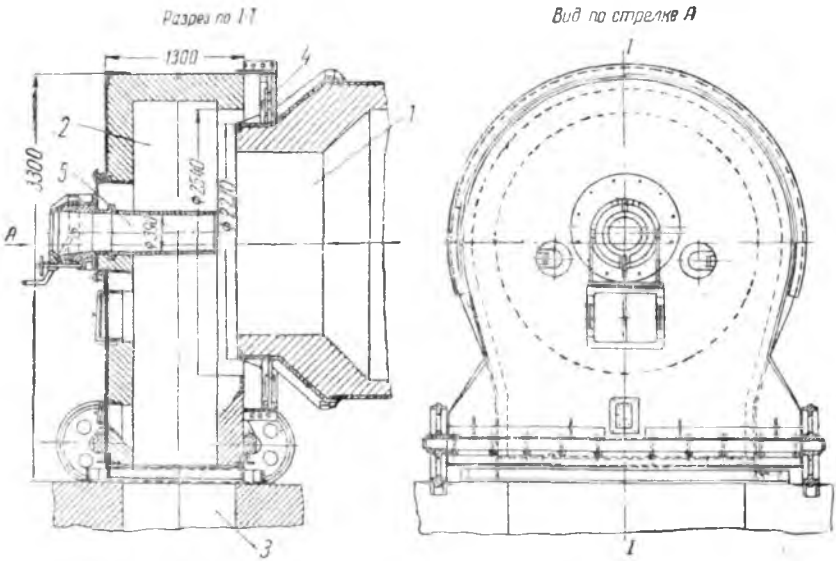


Рис. 134. Головка вращающейся печи: *1* — печь; *2* — откатная головка; *3*—отверстие для спуска клинкера в холодильник; *4* — уплотнение; *5*—форсунка.

Теплообменные устройства

Для увеличения теплопередачи в зоне подогрева устанавливают теплообменные устройства. При мокром способе производства в зоне подсушки, на участке печи с температурой до 700—800°, навешивают цепные завесы; на участке с температурой от 700 до 1100° устанавливают металлические теплообменники из жаростойкого чугуна, а в зоне с температурой выше 1100° — теплообменники из высокосортного шамотного кирпича.

Цепные завесы выполняются двух видов (рис. 135):

а) с навеской цепей за один конец;
б) с навеской за два конца — гирляндами.

Плотность навески цепей в печи больше там, где шлам обладает текучестью или уже достаточно высох, меньше — в зоне, где шлам имеет значительную вязкость. Цепи навешивают гирляндами так, чтобы они помогали движению материала, т. е.

действовали как цепной транспортер. С увеличением угла поворота гирлянд по отношению к оси печи возрастает коэффициент теплоотдачи к цепям. Однако при угле, бо́льшем 45°, транспортирование материала затруднено.

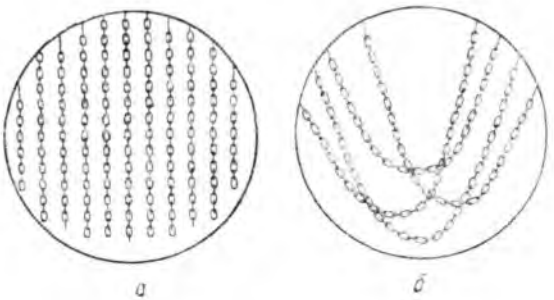


Рис. 135. Навеска цепей: *а*—со свободными концами, *б*—гирляндами.

Длину цепной зоны для печей с отношением $\frac{L}{D} > 25$ можно определять по эмпирической формуле:

$$L_ц = 0{,}07L\left(0{,}1\ \frac{L}{D} - 1\right),$$

где: L — длина печи в *м*;

D — средний диаметр печи в свету в *м*:

$$D = \frac{D_1L_1 + D_2L_2}{l} - 0{,}4.$$

В печах с отношением $\frac{L}{D} < 25$ цепи устанавливают редко, так как они быстро изнашиваются. Для предотвращения чрезмерного уноса сырья и сохранения цепей, шлам по выходе из цепной зоны должен иметь влажность не менее 8—10%. Сопротивление цепей составляет ~ 80% от всего аэродинамического сопротивления печи и равно на 1 *м* длины печи в цепной зоне:

а) при коридорной навеске за один конец—0,6 ÷ 0,8 *кг/м²*;

б) при коридорной навеске за один конец по винтовой линии — 0,8 ÷ 2 *кг/м²*;

в) при навеске гирляндами—2 ÷ 2,8 *кг/м²*.

В той части зоны подсушки, где влажность шлама меньше 10—14%, применяют металлические жаростойкие теплообменники различных конструкций —ячейковые (рис. 136), пересыпные лопатки, экранирующие башмаки и др. Они могут устанавливаться в температурных пределах от 700 до 1100°.

При температурах 1100—1400° устанавливают теплообменники из огнеупорного материала (рис. 137). В интервале 2 ÷ 3 *м*

выкладывают из высокосортного шамотного кирпича 2—3 свода длиной 2÷3 *м*, сходящиеся вершинами на оси печи. Они образуют 2—3 замкнутых ячейки, по которым распределяется нагре-

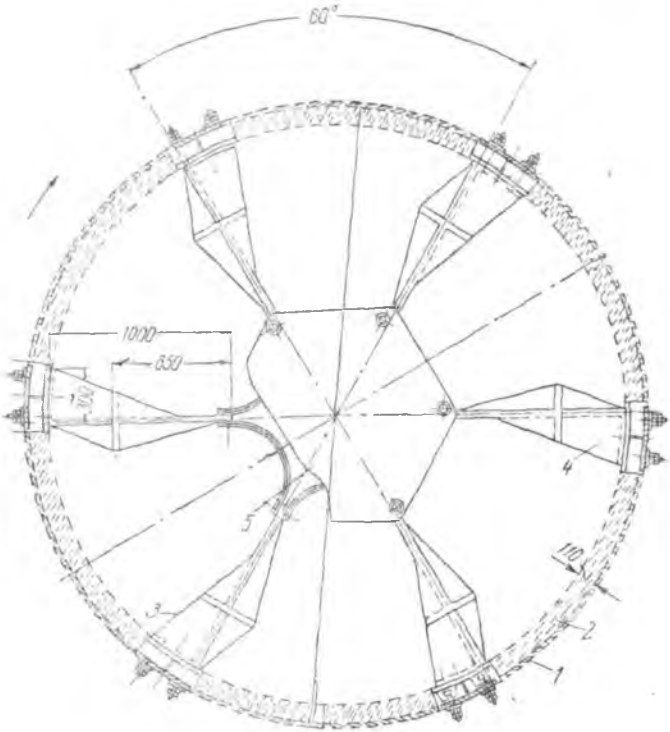


Рис. 136. Ячейковый теплообменник: *1* — корпус печи; *2*—футеровка; *3* — башмаки; *4* — полка теплообменника; *5*—соединительный лист.

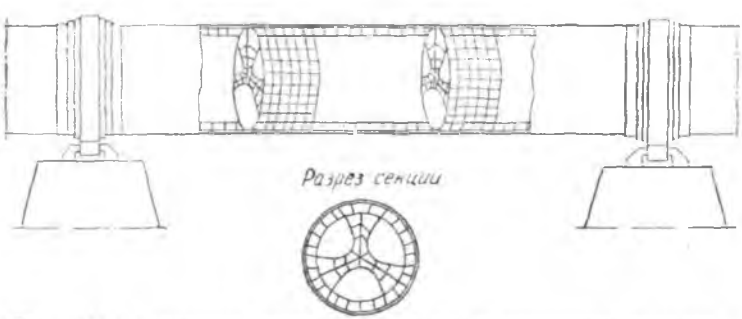


Рис. 137. Ячейковый теплообменник из огнеупорного кирпича.

ваемый материал, а газовый поток делится на 2—3 части. Аэродинамическое сопротивление таких теплообменников составляет 1 *кг/м*² на 1 *м* длины.

Питатели

В настоящее время основным типом питателя является ковшовый питатель с контрольными шламовыми бачками. Производительность ковшового питателя зависит от числа оборотов черпаков и от уровня шлама в резервуаре питателя.

Шлам в питателе поддерживается на постоянном уровне, установленном для подачи вполне определенного количества его в печь. Регулируя число оборотов ковша от 3 до 30 об/мин, машинист вращающейся печи со своего рабочего места может изменять количество поступающего в печь шлама. Существует также автоматическая регулировка питателя, в зависимости от скорости вращения печи. Для питания вращающейся печи, работающей по сухому способу производства, применяют сдвоенный шнековый питатель с регулируемым числом оборотов. За питателем устанавливается смесительный шнек, в котором при влажности 10—15% происходит грануляция материала. Из шнека подготовленная сырьевая смесь по желобу поступает в печь.

2. ГОРЕНИЕ ТОПЛИВА ВО ВРАЩАЮЩИХСЯ ПЕЧАХ

Во вращающихся печах сжигают пылевидное, жидкое и газообразное топливо.

Наиболее прост процесс сжигания газа. Скорость сгорания его зависит от подогрева газа, смешивания газа с воздухом, горения и отвода продуктов сгорания. Время, необходимое для завершения всего процесса, равно сумме периодов всех вышеприведенных стадий, причем оно определяется в основном скоростью протекания самой медленной стадии. При горении газообразного топлива такой стадией является смешивание газообразного топлива с воздухом, так как сам процесс горения газа происходит почти мгновенно.

При сжигании жидкого топлива, кроме этих процессов, происходит еще процесс испарения и разложения под действием высоких температур.

Более сложна схема горения твердого топлива, содержащего кроме влаги еще и золу. После предварительной подсушки топливо прогревают до температуры начала процесса пирогенетического разложения с выделением летучих частей и коксообразованием. Летучие, выделяясь при высокой температуре под значительным давлением, образуют вокруг твердой частицы пылевидного топлива газовую оболочку, на границах которой и происходит первая фаза горения—горение летучих.

Сама твердая частица топлива при первой фазе горения, не получая кислорода, который перехватывается газовой оболочкой, коксуется, пока все летучие не сгорят. После этого наступает вторая фаза горения—активный процесс в углеродной основе частицы. Для достижения необходимой температуры обжига клинкера зона спекания, зона экзотермических реакций и часть

зоны кальцинирования должны располагаться в пределах зоны горения. Поэтому процесс образования клинкера требует определенной длины, положения и температуры зоны горения, а также скорости движения материала (процесс клинкерообразования во вращающихся печах занимает не менее 15—20 мин.). Таким образом, длина и положение факела горения во вращающихся печах—важный эксплуатационный фактор.

Для определения длины зоны горения предложено несколько практических методов. Наиболее распространенными методами определения длины зоны горения являются: аналитический метод проф. К. И. Шарашкина и метод, основанный на опытных данных лауреата Сталинской премии доцента А. Н. Иванова.

Длина факела аналитически определяется по формуле проф. К. И. Шарашкина:

$$L = z_0 \cdot v_м,$$

где: L —длина факела горения в *м*;

z_0 —время горения угольной пылинки в сек.;

$v_м$ —скорость газов в зоне горения в *м/сек*.

Обычно в практике пользуются эмпирической формулой А. Н. Иванова:

$$L = 4{,}9\,D,$$

где D — диаметр печи в свету в зоне горения в *м*.

Из формулы видно, что длина зоны горения пропорциональна внутреннему диаметру печи. Чем больше диаметр печи в этой зоне, тем дольше процесс смешивания воздуха и топлива, и, следовательно, горение последнего. Так как длина зоны горения пропорциональна диаметру печи, то объем зоны горения пропорционален кубу диаметра, т. е. тепловая мощность печи должна быть пропорциональна кубу внутреннего диаметра печи. Это установлено доц. А. Н. Ивановым на основании опытных данных и выражено следующей формулой:

$$Q = 1{,}1\,D^3,$$

где: Q—мощность вращающейся печи в млн. *ккал* в *час*;

D—внутренний диаметр печи в *м*.

Тепловое напряжение зоны горения равно приблизительно 300 000 *ккал/м³ час*.

Воздух во вращающуюся печь подается тремя путями:

1) через форсунку—для угольной пыли и около форсунки—для мазута и газообразного топлива;

2) через холодильник или рекуператор;

3) через неплотность между головкой и корпусом печи.

Сжигание мазута во вращающихся печах. Мазут вводится в печь с помощью форсунки. Поступая в зону горения, он быстро нагревается. При температуре 150° начинается процесс испарения, который при дальнейшем повышении температуры становится

все интенсивней. После этого наступает процесс разложения углеводородов мазута и их окисление (горение). Практически скорость горения зависит от времени испарения мазута и смешивания полученного газа с кислородом воздуха, так как скорость реакции горения газа очень велика. При тонком распыливании мазута, большом избытке воздуха, малых скоростях выхода из форсунки и хорошем смешивании с воздухом получается короткий и бесцветный факел. Для создания светящегося длинного факела скорость вылета мазута из форсунки должна быть значительной (~60 *м/сек*), избыток воздуха небольшой (α—не более 1,05). Газ с воздухом должен смешиваться путем малой турбулизации (закручивания).

Диаметр отверстия форсунки можно определить по формуле:

$$d = 8{,}95 \sqrt{\frac{G_м}{\Omega \sqrt{\gamma_м P}}},$$

где: d — диаметр отверстия форсунки в *мм*;
$G_м$ — расход мазута в *кг/час*;
$\gamma_м$ — удельный вес мазута в *кг/м*^{3};
P — давление мазута перед форсункой в *кг/м*^{2};
Ω — коэффициент расхода мазута форсункой (0,79—0,86).

Давление перед форсункой расходуется на преодоление сопротивления ее и на создание скорости вылета мазута (скоростной напор). Оно определяется по формуле:

$$P = \frac{w_0^2}{2g}\gamma_м + \xi\frac{w_0^2}{2g}\gamma_м = (1+\xi)\frac{w_0^2}{2g}\gamma_м,$$

где: w_0^2 — скорость выхода мазута в *м/сек*;
$\gamma_м$ — удельный вес мазута в *кг/м*^{3}.
ξ — коэффициент гидравлического сопротивления форсунки = 0,15.

При сжигании мазута подается в печь 30—35% первичного воздуха, скорость выхода его составляет 15—20 *м/сек*.

Сжигание твердого пылевидного топлива во вращающихся печах. В пылевидном состоянии сжигают антрацит, каменный уголь, бурый уголь, сланец. Иногда пылевидное топливо составляют из двух-трех видов. Например, тощий каменный уголь смешивают с подмосковным бурым углем. При составлении смеси топлива стремятся к тому, чтобы теплотворность топлива находилась в пределах 5000—7000 *ккал/кг*, а количество летучих горючих—в пределах 18÷24%. Топливо предварительно подсушивают до 3÷4% остаточной влаги, после чего размалывают его в тонкий порошок с остатком на сите № 90 от 16÷18% — для богатых летучими малозольных углей и 8÷10% — для тощих углей. Тонкость помола топлива сокращает время горения.

Угольная пыль подается в печь первичным воздухом, который

должен обеспечить полное сжигание летучих частей топлива. Количество первичного воздуха зависит от качества топлива. Для тощих углей с малым выходом летучих можно брать минимальное количество (15% общего количества воздуха со скоростью выхода из форсунки до 50 *м/сек*). При этом для ускорения воспламенения пылинок воздух следует подогревать. Для углей с большим выходом летучих частей топлива количество первичного воздуха увеличивают до 30%, доводя скорость выхода его из форсунки до 80 *м/сек* с тем, чтобы сократить и удалить зону горения; при малой скорости и медленном смешивании летучих с воздухом получается очень растянутый факел горения. При большом выходе горючих летучих частей топлива температура зоны горения и тепловые напряжения снижаются, так как факел горения становится слишком растянутым. Тощие угли, наоборот, повышают температуру, так как тепло выделяется на коротком расстоянии, появляется механический недожог, газы выходят из трубы окрашенными в черный цвет. Перегрузка печи материалом сокращает активный (реакционный) объем печи и тоже вызывает неполное горение топлива с механическим недожогом.

Вторичный воздух поступает в печь через холодильник за счет разрежения, создаваемого дымососом и дымовой трубой. Проходя через холодильник и охлаждая поступающий туда с температурой 900—1000° клинкер, вторичный воздух нагревается до 250—300° и более. Поэтому нужно стремиться подавать в печь больше вторичного воздуха. Практически он составляет 65—80% от общего количества воздуха, входящего в печь.

Для сжигания угольной пыли во вращающихся печах применяют одноканальные и двухканальные форсунки.

Диаметр канала одноканальной форсунки определяется по формуле:

$$d_1 = \sqrt{\frac{1{,}27V_1}{w_1}}\ м,$$

где: V_1 — количество первичного воздуха в *м³/сек*;
w_1 — скорость первичного воздуха в *м/сек*.

Диаметр трубы второго (большого) канала двухканальной форсунки определяется по формуле:

$$d_2 = \sqrt{\frac{1{,}27V^2}{w_2} - d_3^2}\ м,$$

где: d_2 — внутренний диаметр второго канала в *м*;
d_3 — наружный диаметр первичного канала в *м*;
w_2 — скорость вторичного воздуха в *м/сек*.

Первичный воздух с угольной пылью подается при помощи дутьевого центробежного вентилятора.

Для подачи воздуха применяют центробежные вентиляторы среднего или высокого давления с давлением дутья 500 *кг/м²*

и выше. Например, 150-метровая вращающаяся печь при температуре воздуха 60° имеет дутьевой вентилятор с напором 600 *кг/м²* и производительностью 30 000 *м³/час*. Дутьевой вентилятор рассчитывается только на преодоление сопротивлений в трубопроводе до выхода аэросмеси из форсунки, включая скоростной напор, необходимый для создания требуемой скорости вылета аэросмеси из форсунки.

Для создания разрежения в печи и преодоления всех сопротивлений газового потока от входа в холодильник до выхода из дымовой трубы, а также для создания требуемой скорости его на отдельных участках служат дымососы и дымовая труба.

Во вращающихся печах при сумме всех сопротивлений 40—50 *кг/м²* и выше тягу создают главным образом при помощи дымососов.

3. ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ВРАЩАЮЩИХСЯ ПЕЧЕЙ

Производительность вращающейся печи зависит не только от работы ее, как топочного устройства, но и как теплообменного аппарата.

Количество тепла, выделяемое при сжигании топлива в единицу времени, называется **тепловой мощностью печи**. Это тепло печь должна рационально использовать, т. е. она должна быть хорошим теплообменником. Основным показателем работы печи, как теплообменника, является температура отходящих газов, зависящая от влажности шлама, конструкции печи, дутьевых и тяговых устройств, интенсивности теплопередачи по всей длине печи. В лучших вращающихся печах она составляет 200° и ниже.

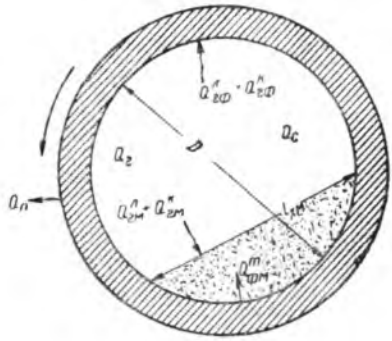


Рис. 138. Схема теплопередачи в полой части вращающейся печи.

В полой части вращающейся печи тепло от газового потока передается открытым поверхностям футеровки и материалу. В зоне больших температур это происходит главным образом излучением и в меньшей степени путем конвекции. Значение конвекции особенно падает в зоне высоких температур (зона спекания). Поэтому для большей передачи тепла материалу нужно стремиться к максимальному увеличению разности температур между газовым потоком и материалом. Это повышает производительность вращающейся печи.

Схему теплопередачи в полой части вращающейся печи можно представить в виде следующих уравнений теплового баланса в час на 1 *м* длины печи (рис. 138).

1. Тепловой баланс газового потока:

$$Q_г = Q^л_{г.ф} + Q^к_{г.ф} + Q^л_{г.м} + Q^к_{г.м} + Q_с \quad ккал/м\ час.$$

2. Тепловой баланс футеровки:

$$Q^л_{г.ф} + Q^к_{г.ф} = Q^л_{ф.м} + Q^т_{ф.м} + Q_п \quad ккал/м\ час.$$

3. Тепловой баланс обжигаемого материала:

$$Q_м = Q^л_{г.м} + Q^к_{г.м} + Q^л_{ф.м} + Q^т_{ф.м} \quad ккал/м\ час.$$

Из этих уравнений получаем общее уравнение теплового баланса на 1 *м* длины печи:

$$\boxed{Q_г = Q_м + Q_с + Q_п \quad ккал/м\ час.} \qquad (163)$$

В приведенных выше уравнениях приняты следующие обозначения:

$Q_г$ — общее количество тепла, отдаваемое газовым потоком, в *ккал/м час*;

$Q^л_{г.ф}$ — количество тепла, отдаваемое газовым потоком футеровке лучеиспусканием, в *ккал/м час*;

$Q^к_{г.ф}$ — количество тепла, отдаваемое газовым потоком футеровке конвекцией, в *ккал/м час*;

$Q^л_{г.м}$ — количество тепла, отдаваемое газовым потоком материалу лучеиспусканием, в *ккал/м час*;

$Q^к_{г.}$ — количество тепла, отдаваемое газовым потоком материалу конвекцией, в *ккал/м час*;

$Q^л_{ф.м}$ — количество тепла, отдаваемое футеровкой материалу лучеиспусканием, в *ккал/м час*;

$Q^т_{ф.м}$ — количество тепла, отдаваемое футеровкой материалу теплопроводностью, в *ккал/м час*;

$Q_п$ — количество тепла, теряемое в окружающую среду, в *ккал/м час*;

$Q_м$ — общее количество тепла, получаемое материалом, в *ккал/м час*;

$Q_с$ — общее количество тепла, отдаваемое газовым потоком газам и твердым частицам, выделяемым из материала, в *ккал/м час*.

Из уравнения (163) видно, что тепло газового потока расходуется на обжиг материала $Q_м$, на прогрев газовых и твердых частиц, выделяемых из материала $Q_с$ и на потери в окружающую среду $Q_п$.

Тепло, получаемое материалом, передается как непосредственно от газового потока путем излучения и конвекции, так и через футеровку излучением и теплопроводностью. Футеровка работает по регенеративному циклу, равному одному обороту печи. Футеровка, находясь в газовом потоке открытой, воспри-

нимает тепло. Затем, попадая под обжигаемый материал, она отдает ему тепло. Вновь попадая в газовый поток, футеровка нагревается и восстанавливает тепло, переданное материалу.

В цепной зоне часть тепла находится в газовом потоке, остальная — в материале. Имея значительную пластичность, шлам в начале цепной зоны покрывает (налипает) цепи, находящиеся в газовом потоке. В этой части зоны цепи увеличивают поверхность соприкосновения шлама с газовым потоком. По мере высыхания шлам теряет свою пластичность и не налипает на цепи.

С этого момента тепло передается материалу цепями. Они нагреваются в газовом потоке и, погружаясь в материал, охлаждаются, передавая ему тепло. Несомненно, кроме этого, материал в цепной зоне получает тепло также от газов и футеровки.

Теплообмен в металлических и керамических теплообменниках происходит также по регенеративному циклу. В ячейковых теплообменниках он более равномерно распределяется по всему сечению печи. Цепные завесы и теплообменники сокращают расход топлива на 5—15%.

4. ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ВРАЩАЮЩИХСЯ ПЕЧЕЙ

Производительность печи как транспортирующего устройства может быть определена по формуле:

$$G = 15\pi \cdot D^2 \cdot \psi \cdot w_м \cdot \gamma_м \ кг/час, \qquad (164)$$

где: D — средний диаметр печи в *м*;

ψ — коэффициент заполнения печи в долях единицы принимается равным 0,08—0,1;

$w_м$ — скорость движения материала в печи в *м/мин*;

$\gamma_м$ — насыпной вес материала в *кг/м*^{3}.

Скорость движения во вращающейся печи может быть определена по формуле:

$$w_м = \frac{4\pi \cdot Dn}{3} \cdot \frac{\sin^3 \frac{\varphi}{2}}{(\varphi - \sin\alpha)} \cdot \left(0{,}03 + \frac{\sin\alpha}{\sqrt{\sin^2\beta - \sin\alpha}}\right) м/мин, \qquad (165)$$

где: n — число оборотов в минуту;

φ — угол в радианах;

α — угол наклона печи;

β — угол естественного откоса материала.

Как видно, производительность вращающейся печи можно регулировать в широких пределах изменением диаметра наклона печи и числа оборотов.

Производительность печи, как теплового агрегата для обжига клинкера, зависит от многих факторов, из которых основными являются:

1) размеры и конструкция печи;
2) способ производства (сухой или мокрый);
3) температура обжига и степень спекаемости сырья;
4) способ образования обмазки футеровки;
5) влажность шлама;
6) наклон печи;
7) теплотворность топлива и степень его подготовки;
8) число оборотов печи;
9) степень разрежения при выходе газов из печи;
10) стойкость футеровки.

Математическая зависимость всех этих факторов, влияющих на производительность печи, до сих пор полностью не определена.

Предложено несколько формул, учитывающих лишь главнейшие технологические факторы. Гипроцементом разработаны эмпирические формулы, наиболее полно учитывающие основные факторы, влияющие на производительность печи (тип печи, начальная влажность шлама, поверхность теплоотдачи, качество сырья, способ производства).

Производительность вращающихся печей при обжиге обычного сырья (известняк, мел и глина, глинистый сланец) определяется по формуле:

$$G = \frac{abD^{1,5}\,L\,t^{m}}{1 + \frac{(w - w_c)\,n}{100}} \text{ кг/час}, \qquad (166)$$

где: G — производительность печи в *кг/час*;

a — коэффициент, зависящий от сырья; принимается на основании опытных данных для вращающихся печей с внутренними устройствами при мокром способе производства 5÷5,5, без внутренних устройств при мокром и сухом способах производства—2÷2,2;

b — коэффициент, равный отношению полной поверхности теплоотдачи к внутренней поверхности печи;

D — средний внутренний диаметр печи в *м*;

L — длина печи в *м*;

t — температура отходящих газов в град.;

m — коэффициент, зависящий от типа печи и способа производства; для печей с внутренними устройствами при мокром способе $m=0,25$ и при прочих условиях $m=0,5$;

w — влажность сырьевой смеси в проц.;

w_c — стандартная влажность сырьевой смеси равная 35%;

n — изменение количества тепла, передаваемого материалу для получения 1 *кг* клинкера, при отклонении влажности сырьевой смеси на 1% от стандартной, в %.

Подставив в эту формулу значения коэффициентов и постоянных величин, можно представить ее в следующих видах.

1. Для вращающихся печей с внутренними устройствами при мокром способе производства:

$$G = \frac{(5 \div 5{,}5)\, bD^{1,5} \cdot L \cdot t^{0,25}}{1 + \frac{(w-35)\,1{,}6}{100}} \text{ кг/час.}$$

2. Для вращающихся печей без внутренних устройств при мокром способе производства:

$$G = \frac{(2 \div 2{,}2)\, D^{1,5} \cdot L \cdot t^{0,5}}{1 + \frac{(w-35)\,1{,}6}{100}} \text{ кг/час.}$$

3. Для вращающихся печей без внутренних устройств при сухом способе производства:

$$G = (2 \div 2{,}2) D^{1,5} \cdot L \cdot t^{0,5} \text{ кг/час.}$$

5. МЕРОПРИЯТИЯ ПО ПОВЫШЕНИЮ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И ТЕПЛОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВРАЩАЮЩИХСЯ ПЕЧЕЙ

Обжиг клинкера при мокром способе производства состоит из следующих последовательно протекающих внутри печи физико-химических процессов:

а) испарения влаги в холодном конце печи на участке, равном ~30% длины печи, при температуре 200—400°;

б) удаления химически связанной воды из глинистой части сырья и нагрева материала; происходит при температуре 400 ÷ ÷ 800° на участке равном ~ 30% длины печи;

в) разложения карбонатов сырья с выделением CO_2; более интенсивно происходит при температуре 900—1100° на участке, равном ~ 20% длины печи;

г) образования клинкерных минералов; начинается при температуре 950° и заканчивается при температуре 1400—1450°; длина участка образования клинкерных минералов равна ~ 15% длины печи; перед холодильником или рекуператорами имеется зона охлаждения клинкера, равная ~ 5% длины печи.

Рассмотрим тепловую работу вращающейся печи в каждой зоне.

В зоне испарения влаги расходуется ~ 40% всего тепла, полезно используемого в печи. Передача тепла здесь происходит главным образом конвекцией и теплопроводностью, так как излучение газов вследствие малой температуры их незначительно. Конвективный обмен в значительной степени зависит от скорости газов и теплоотдачи от газов к футеровке, цепям и материалу. С увеличением скорости газов увеличивается коэффициент теплоотдачи и количество передаваемого тепла. Поэтому в зоне испарения навешивается густая цепная завеса, уменьшающая сечение печи; следовательно, увеличивается скорость газов и повышается теплоотдача их. При повышенной скорости газ приобретает турбулентное движение, вследствие чего коэффициент теплопередачи увеличивается почти в пять раз по сравнению с ламинарным движением. При вращении цепи покрываются шламом, увеличивая таким образом поверхность испарения и ускоряя этот процесс. Для размещения в этой зоне большого количества цепей (т. е. увеличения площади теплообмена) ее обычно делают расширенной, увеличивая диаметр в 1,1—1,3 раза по сравнению с основной частью печи.

Цепная зона имеет большое значение. Например, вращающаяся 150-метровая печь имеет цепную зону длиной 40 *м* с общей длиной всех цепей 6 *км* и весом 85 *т*. Поверхность теплоотдачи при этом равна 1320 $м^2$.

В зонах испарения, подогрева и кальцинирования расходуется около 85% общего количества полезно используемого тепла. Поэтому из зоны горения газы должны выходить с достаточно высокой температурой. Для обеспечения интенсивности передачи тепла в зонах кальцинирования и подогрева необходимо обеспечить бо́льшую поверхность соприкосновения материала с газами. Для этого в зоне кальцинирования устанавливают подпорные кольца и винтовые теплообменники, а в зоне подогрева—ячейковые теплообменники или пересыпающие лопасти. Повышение скорости газов и поперечное смывание поверхности футеровки и материала при помощи винтовых теплообменников увеличивают интенсивность теплообмена и повышают производительность этих зон.

В зоне спекания тепло передается обжигаемому материалу главным образом излучением и зависит от разности абсолютных температур газового факела и материала. Чем больше эта разность, тем больше тепла будет передано обжигаемому материалу. Повышение температуры факела горения стало возможным благодаря применению водяного охлаждения корпуса печи. Этому способствует также сжигание сухого и тонкоизмолотого топлива с наименьшим коэффициентом избытка воздуха (1,05) при подогреве первичного и вторичного воздуха теплом клинкера и максимальным сокращением подсоса воздуха через неплотности между головкой и корпусом печи. В холодильниках клинкер может охлаждаться до 50°, а воздух нагреваться до 500°.

Современные вращающиеся печи как теплообменные агрегаты высокой производительности характеризуются следующим:

1) развитой поверхностью теплопередачи в зоне испарения, что достигается устройством цепной завесы;

2) применением в зоне подогрева ячейковых, лопастных и других теплообменников;

3) повышением теплового напряжения за счет лучшего перемешивания воздуха и топлива с помощью завихрения факела;

4) устройством расширенной части печи в зоне горения с водяным охлаждением его.

5) повышением температуры подогрева первичного и вторичного воздуха, вследствие чего увеличивается температура факела и удлиняется зона горения.

Для повышения производительности вращающихся печей должно быть обеспечено равномерное питание их шламом; печи должны работать с минимумом тихих ходов; иметь длинную зону горения; температура отходящих газов из печи должна быть минимальной (200—250°); целесообразно применение плавней и минерализаторов (плавикового шпата), а также разжижителей шлама, снижающих его влажность и увеличивающих текучесть (например, сульфитно-спиртовой барды).

6. ВОДЯНОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ КОРПУСА ПЕЧИ

Водяное охлаждение корпуса печи (рис. 139) — важное условие улучшения теплового режима.

При водяном охлаждении:

1) снижается температура корпуса печи в среднем с 300 до 100°. Благодаря этому сокращаются тепловые напряжения и увеличивается срок службы корпуса и футеровки;

2) создаются благоприятные условия для образования намазки на футеровку в зоне спекания;

3) уменьшаются потери тепла во внешнюю среду и снижается температура воздуха в помещении;

4) нагретая вода после охлаждения корпуса печи используется в сырьевом цехе.

Количество воды, необходимое для охлаждения корпуса печи, можно рассчитать по следующей формуле:

$$B = \frac{K \cdot Q}{1000\,\Delta t}\ м^3/час,$$

где: K—коэффициент надежности, равный 1,5÷2;

Q—тепловая нагрузка охладительной установки в *ккал/час*.

$$Q = Aq,$$

где: A — площадь охлаждаемой части печи в $м^2$, а q — интенсивность охлаждения 1 $м^2$ площади корпуса печи в *ккал/час* $м^2$ — принимается равной 1700 ÷ 3000 *ккал/час* $м^2$;

Δt — допускаемый перепад свежей и отработанной воды в град.; обычно принимается равным 20 ÷ 30°.

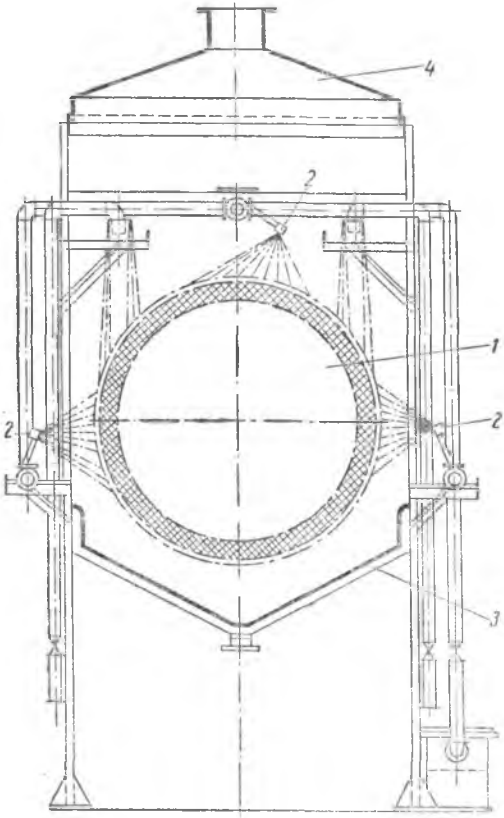


Рис. 139. Охлаждение зоны спекания вращающейся печи: *1*—печь; *2*—форсунки; *3*—корыто для сбора воды; *4*—колпак для удаления влажного воздуха.

7. УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕПЛА ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ И КЛИНКЕРА У ВРАЩАЮЩИХСЯ ПЕЧЕЙ

Котлы-утилизаторы

При сухом способе производства клинкера вследствие малой поверхности теплообмена в коротких вращающихся печах газовый поток по выходе из печи имеет высокую температуру, доходящую до 800°. Для использования тепла отходящих газов уста-

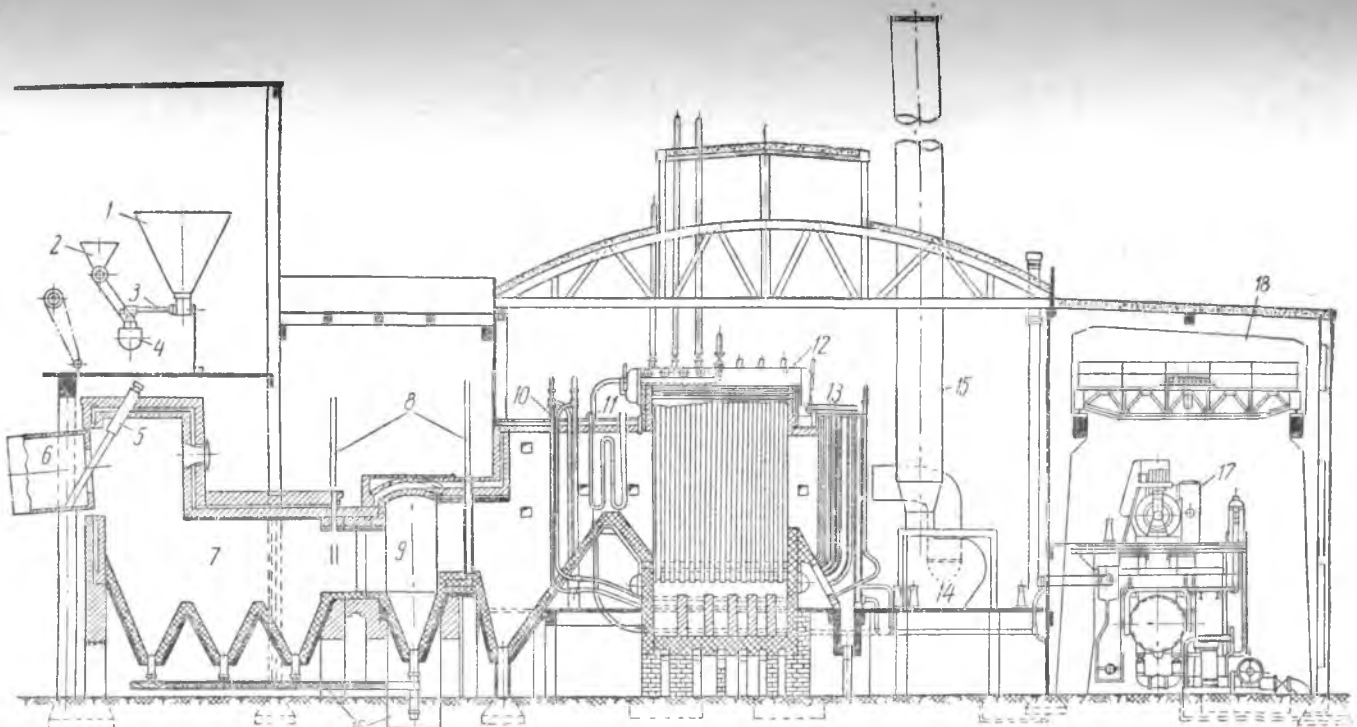


Рис. 140. Котел-утилизатор к вращающейся печи: *1*—бункер сырьевой смеси; *2* — бункер угольной пыли; *3* — шнековый питатель; *4*—смеситель; *5*—труба для подачи шлама; *6*—вращающаяся печь; *7*—пыльная камера; *8*—шиберы; *9*—соединительный газоход; *10*—экран; *11*—пароперегреватель; *12*—котел; *13*—экономайзер; *14* — дымосос; *15* — дымовая труба; *16*—шнек для транспортирования пыли; *17*—паровая машина; *18*—мостовой кран.

навливают запечные паровые котлы-утилизаторы. При мокром способе производства котлы-утилизаторы устанавливаются в сочетании со шлам-фильтром за короткими полыми печами. Это приближает режим работы печи к условиям сухого способа производства.

Температура газов, поступающих в котел-утилизатор, значительно ниже, чем в обычных паровых котлах. Поэтому необходима развитая поверхность нагрева.

Котел-утилизатор вращающейся печи 3×51 *м* имеет поверхность нагрева котла 700 *м*², экрана—55 *м*², пароперегревателя — 75 *м*² и водяного экономайзера—350 *м*² при температуре перегрева пара до 350—375° и давлении 15—20 *ати*. Паропроизводительность такого котла изменяется в большом диапазоне — от 7 до 11 *т/час*.

Особенно снижает производительность котла-утилизатора присос наружного воздуха через пыльную камеру, соединительный боров и обмуровку котла, которые поэтому обычно обшивают железными листами с тепловой изоляцией (для уменьшения потерь тепла). Шиберы, клапаны и люки также должны быть достаточно герметичными. В современных конструкциях котлы-утилизаторы примыкают к вращающейся печи непосредственно, а не через промежуточную пыльную камеру.

Вследствие неравномерности температуры газов в запечных котлах, температура перегрева пара изменяется с 350 до 500°. Так как это нарушает нормальную работу паровой турбины, то к котлам-утилизаторам устанавливают регуляторы перегрева.

К. п. д. котла-утилизатора в среднем составляет 0,60—0,65. Трубы котла, пароперегревателя и экономайзера для лучшего удаления с них пыли расположены вертикально: коэффициент полезного действия установки печь-котел составляет в среднем при сухом способе производства 0,57÷0,60, а при мокром—0,40÷0,45.

Общее сопротивление котельной установки составляет 60÷÷100 *кг/м*². Поэтому дымосос, создающий разрежение всей установки (печь, пыльная камера, котел и соединительные борова) должен создавать давление около 150÷180 *кг/м*². На рис. 140 приведена схема установки котла-утилизатора к вращающейся печи 3×51,3 *м*.

Шламовые фильтры

В целях снижения расхода топлива на обжиг клинкера и повышения производительности коротких вращающихся печей применяют шламовые фильтры. Они служат для механического удаления части воды из шлама перед поступлением его во вращающуюся печь.

Принцип работы шлам-фильтра заключается в следующем. На полый барабан (или диск) натягивают фильтрующий материал. При вращении барабана нижняя часть его погружается в ванну со шламом. Внутри барабана искусственно создается вакуум.

Благодаря этому из шлама, налипающего на фильтрующую материю, отсасывается часть влаги.

Установка фильтра за вращающейся печью увеличивает температуру отходящих газов до 600—650°. Для использования этого тепла отходящих газов устанавливают котел-утилизатор. По сравнению с работой печи наливным способом, производительность вращающейся печи с шлам-фильтром и котлом-утилизатором повышается на 20—30% при экономии топлива 15—20%.

Испарители и подогреватели

Испаритель (рис. 141) представляет собой горизонтальный цилиндрический вращающийся барабан, закрытый с торцов глухими стенками. Боковая поверхность барабана образована из стальных колосниковых плит с отверстиями шириной 70 *мм*. Внутренний объем барабана на 45—60% загружается специальными стальными кольцами диаметром 120 *мм* и длиной 125 *мм*. Барабан заключен в неподвижный металлический кожух, который соединяется переходной камерой с лотком для подачи высушенного материала из испарителя в печь.

В верхнюю часть барабана через распределительное корыто подается шлам, который затем через отверстия в колосниковой решетке попадает на кольца, заполняющие барабан. Из вращающейся печи в барабан испарителя навстречу шламу дымососом засасываются отходящие из печи горячие газы. Поступающий в испаритель шлам покрывает кольца тонкой пленкой толщиной около 1,5 *мм*. Пленка, высыхая, получает тепло от колец путем теплопроводности и от газов конвекцией и излучением. Когда пленка шлама достаточно высохнет, она отстает от колец, получая в дальнейшем тепло только от газов излучением и конвекцией. Освободившиеся от шлама кольца вновь нагреваются, воспринимая от газового потока тепло конвекцией и излучением, а при налипании на них в дальнейшем новой порции шлама опять отдают ему тепло, полученное от газов. Таким образом кольца, как теплообменные тела, работают по регенеративному принципу.

Количество тепла, передаваемое газами непосредственно к комочкам шлама, составляет около 50%. Остальное тепло передается кольцами шламу, находящемуся на их поверхности.

Барабан испарителя вращается со скоростью 1÷2 об/мин. Коэффициент аэродинамического сопротивления испарителя $\zeta = 13$, а величина аэродинамического сопротивления изменяется от 35 до 60 *кг/м²*.

Опытные данные о работе вращающихся печей с испарителями при мокром способе производства показывают, что производительность печи с испарителем возрастает на 25—30%, а расход топлива снижается на 20—25%. Подогреватели применяются при сухом способе производства у коротких печей.

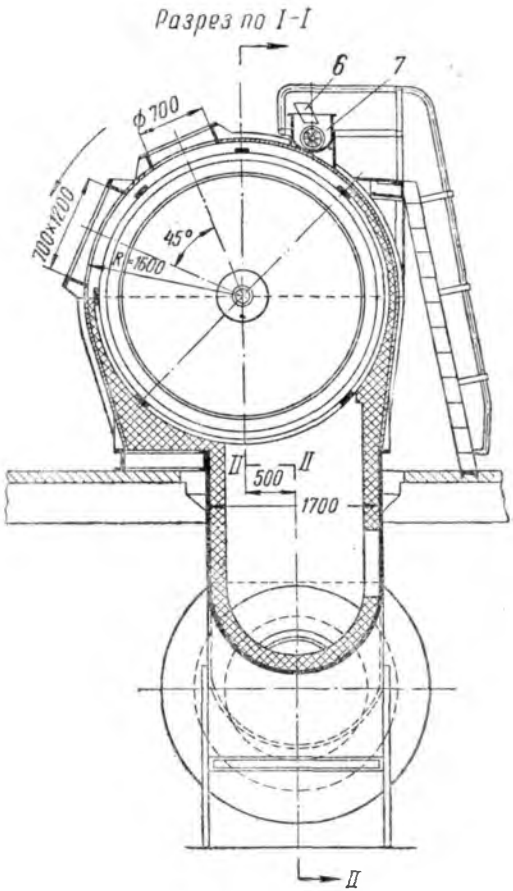
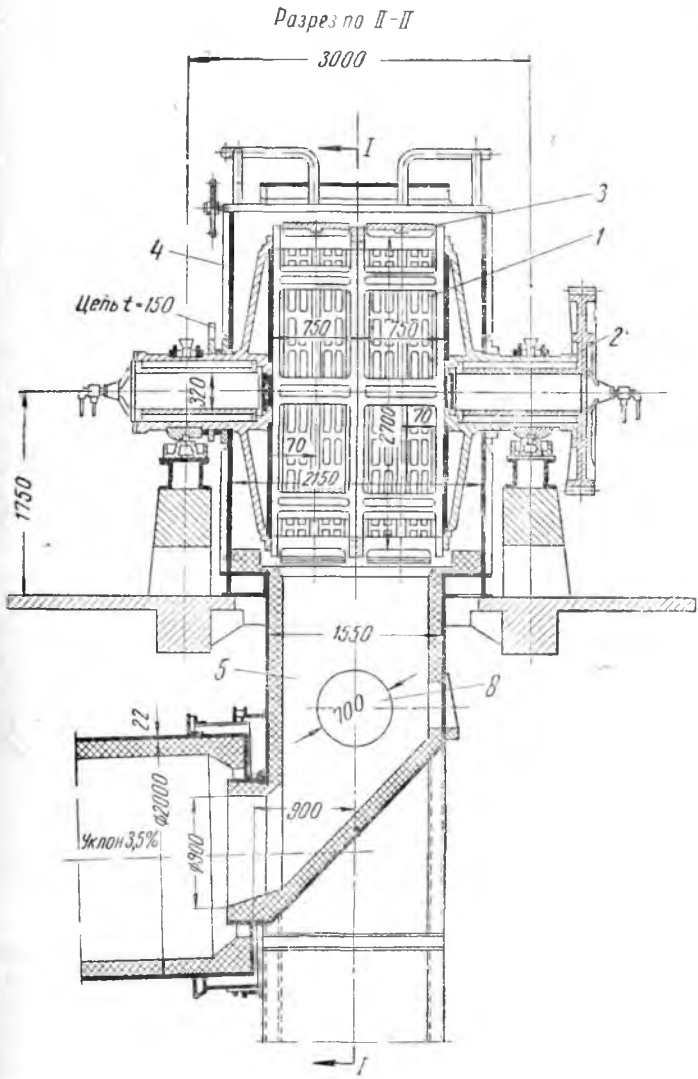


Рис. 141. Испаритель вращающейся печи системы УЗТМ: вая плита; 4—корпус; 5 — разгрузочная камера; 6—желоб;



1—барабан испарителя; 2—пустотелая цапфа; 3—колосников-
7—питатель; 8—окно для удаления газов при розжиге.

Кальцинаторы

Весьма совершенным тепловым агрегатом для обжига клинкера при сухом способе производства является вращающаяся **печь с кальцинатором.**

Кальцинатор представляет собой движущуюся колосниковую решетку, которая заключена в железную неподвижную футерованную камеру, разделенную на две части. Движущаяся колосниковая решетка подает гранулированную сырьевую муку в первую часть камеры-сушилки, а затем во вторую—нагревательную часть, в которой горячие газы, поступающие из вращающейся печи, проходят через слой материала и подсушивают, подогревают и частично декарбонизируют его. Подготовленный таким образом материал поступает во вращающуюся печь, а оттуда—в холодильник.

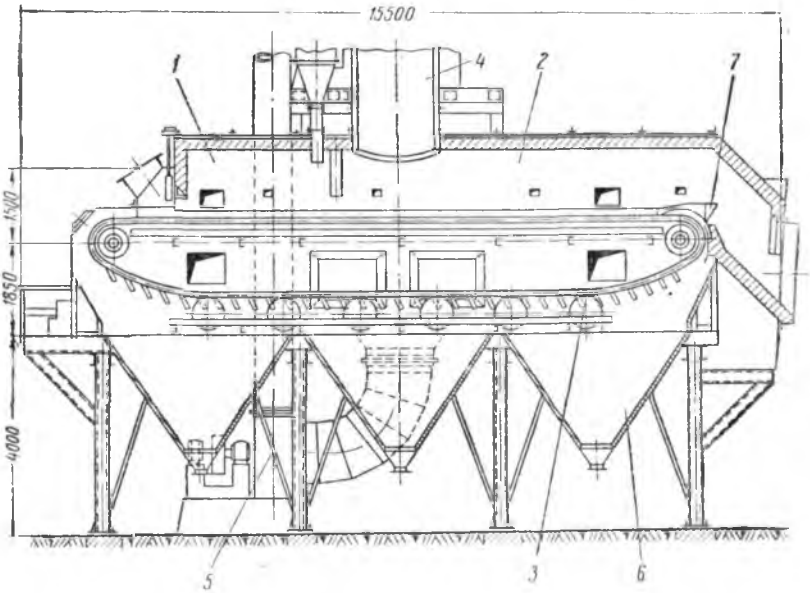


Рис. 142. Конвейерный кальцинатор: *1*—камера подсушки; *2*—камера кальцинирования; *3*—колосниковая решетка; *4*—труба для розжига печи; *5*—дымосос; *6*—бункеры для провала; *7*—переходный лоток ко вращающейся печи.

Часть горячего газового потока отводится из нагревательной камеры, смешивается с холодным воздухом и поступает в сушильную часть камеры с температурой 250—300°.

При таком способе обжига клинкера расход тепла составляет ~ 1000 *ккал* на 1 *кг* клинкера.

На рис. 142. приведена схема конвейерного кальцинатора.

Холодильники

Выходя из вращающейся печи с температурой около 1000° и с теплосодержанием 237—240 *ккал/кг*, клинкер направляется в холодильник, где бо́льшая часть его тепла используется для нагревания вторичного воздуха. Скорость охлаждения клинкера в холодильнике влияет как на его качество, так и на способность размалываться. В настоящее время существуют три типа холодильников: барабанные, рекуператорные, колосниковые.

Барабанный холодильник прост по конструкции и надежен в работе. Он представляет собой открытый с обеих торцовых сторон барабан диаметром 1,6—2,5 *м* и длиной от 10 до 25 *м*, вращающийся со скоростью 3÷8 об/мин. Барабан устанавливается обычно на двух опорах с уклоном к горизонту 3÷6°. Так как температура клинкера, поступающего из печи в холодильник, высокая, то для предохранения стального барабана от деформации внутренняя поверхность его от переднего конца, примыкающего к головке печи, длиной 8÷10 *м* футеруется стойким шамотным кирпичом толщиной 120—150 *мм*. Срок службы футеровки— 1—2 года.

На протяжении остальной длины барабана к внутренней поверхности болтами присоединены пересыпающие полки из швеллеров. На рис. 143 приведен холодильник барабанного типа.

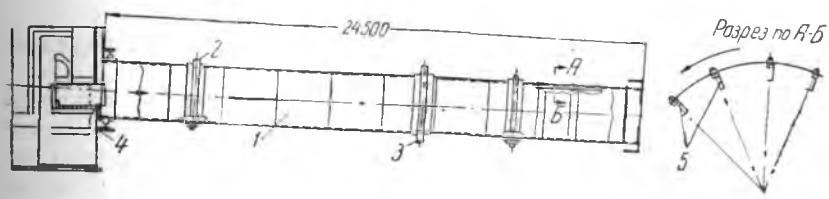


Рис. 143. Барабанный холодильник: *1*—корпус холодильника; *2*—бандаж; *3*—шестерня; *4*—уплотнение; *5*—лопатки для клинкера.

Клинкер из холодильника выходит с температурой 150—250°. Тепловой коэффициент полезного действия барабанного холодильника достигает 65%. Низкий к. п. д. этого холодильника, как теплового агрегата, объясняется тем, что площадь его внешней поверхности, соприкасающейся с воздухом, велика, и потери тепла в окружающую среду достигают 30—35%.

Количество тепла, отдаваемое воздуху охлаждающимся клинкером в холодильнике, определяется по формуле:

$$Q_{кх} = \alpha_0 F_0 \Delta t = \alpha_F F \Delta t \text{ ккал/час}, \qquad (167)$$

где: $Q_{кх}$ — количество передаваемого клинкером тепла воздуху в *ккал/час*;

α_0 — истинный коэффициент теплоотдачи в *ккал/м² град час*;

αF — условный коэффициент теплоотдачи в *ккал/м² град час*;

F_0 — истинная поверхность теплоотдачи в *м²*;

F — поверхность холодильника в *м²*;

Δt — средняя логарифмическая разность температур между клинкером и воздухом, определяется по формуле:

$$\Delta t = \frac{(t'_к - t'_в) - (t''_к - t''_в)}{2{,}3 \lg \cdot \frac{t'_к - t'_в}{t''_к - t''_в}},$$

где: $t''_к$ — начальная температура клинкера в град.;

$t'_в$ — конечная температура воздуха в град.;

$t''_к$ — конечная температура клинкера в град.;

$t''_в$ — начальная температура воздуха в град.

Для облегчения пользования формулой (167) применяют условный коэффициент теплоотдачи или тепловое напряжение поверхности холодильника. На основании опытных данных о работе барабанных холодильников тепловое напряжение поверхности холодильника определяется по следующей формуле:

$$\frac{Q_{кх}}{F} = 12\,000 W_в^{0,6} \quad ккал/м^2\ час,$$

где $W_в$ — скорость воздуха в холодильнике, отнесенная к нормальным условиям в *м/сек*.

Холодильники рекуператорного типа соединены с корпусом печи. Недостатком холодильника барабанного типа является необходимость размещать его под печью, что вызывает подъем печи вверх и увеличивает размеры помещения, в котором устанавливается вращающаяся печь. Этот недостаток отсутствует у вращающихся печей с холодильниками рекуператорного типа.

Рекуператорный холодильник (рис. 144) представляет собой 6—12 барабанов диаметром 0,8—1,3 *м* и длиной 6—8 *м*. Они располагаются вокруг горячего конца печи. Корпус рекуператора крепится к печи при помощи патрубка, соединяющего внутреннюю полость печи с внутренней полостью рекуператора.

В горячем конце рекуператор имеет футеровку из огнеупорного кирпича или жароупорных броневых плит, снабженных пересыпными лопастями. На остальной части рекуператор снабжен цепями или пересыпающими полками.

Тепловое напряжение поверхности рекуператорных холодильников определяется по следующей формуле:

$$\frac{Q_{кх}}{F} = 19\,000 W_в^{0,6} \quad ккал/м^2\ час.$$

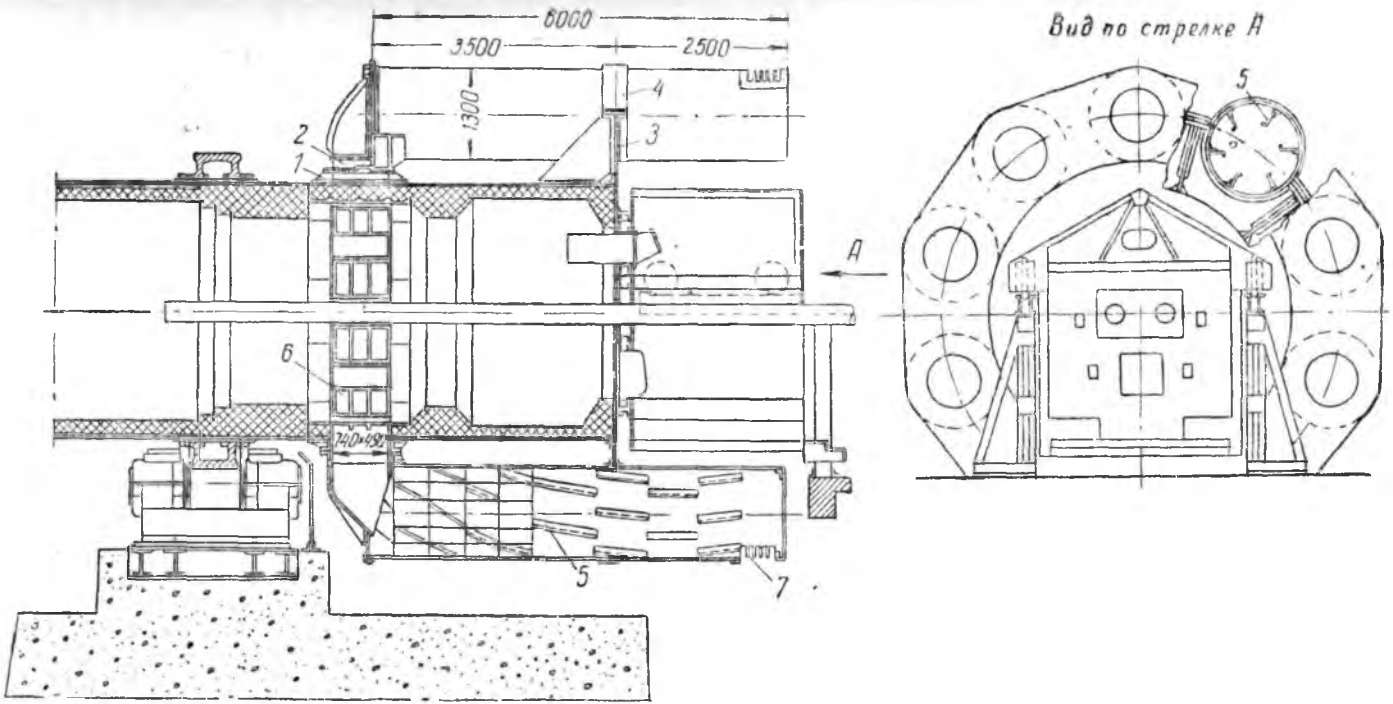


Рис. 144. Рекуператорный холодильник: *1*—горловина; *2*—патрубок; *3*—опорный лист; *4*—бандаж; *5*—сменные направляющие плиты; *6*—входная решетка; *7*—выходная решетка.

Клинкер из рекуператоров выходит с температурой 200—280°.

Характеристика рекуператорных холодильников приведена в табл. 42.

Таблица 42

Характеристики теплообменных устройств вращающихся печей

Показатели	Печи		
	3,5×150 *м*	3,6/3,3×150 *м*	3,0/2,7×125 *м*
Число рекуператоров . .	10	10	11
Длина рекуператора, *м*	6,0	6,0	6,0
Диаметр рекуператора, *м*	1,35	1,30	1,25
Вид теплообменного устройства	Цепи	Лопасти	Цепи
Количество цепей или лопастей	—	4 ряда по 6 штук	1320 концов
Длина участка навески, *м*	2,76	—	3,0
Вид футеровки	Бронеплиты	Бронеплиты	Огнеупорный кирпич и бронеплиты
Длина футеровки, *м* . .	2,5	2,3	—

Холодильники колосникового типа. Стремление увеличить эффективность действия холодильника, уменьшить его тепловые потери, упростить конструкцию и снизить первоначальные затраты привело к созданию холодильников колосникового типа. Имеется несколько конструкций колосниковых холодильников: а) скребковый; б) переталкивающий; в) вибрационный; г) цепной; д) вращающийся.

Холодильник скребкового типа составляет одно целое с вращающейся печью (рис. 145). К горячему концу печи присоединяется отлитое из жароупорного чугуна жаровое кольцо *1*, в боковой стенке которого имеются прямоугольные отверстия *2*. Отверстия эти расположены в одном поперечном сечении печи и снабжены решетками из жароупорного чугуна. Назначение решеток—предупредить попадание в холодильник крупных кусков клинкера, которые через обрез чугунного кольца и шахту *3* сваливаются в снабженный затвором специальный приемник, откуда их периодически удаляют на дробилку. Клинкер нормальной величины, проходя через решетки, падает вниз на колосниковую решетку *4*, смонтированную концентрично по отношению к печи. Решетка состоит из 4—7 рядов чугунных колосников, опирающихся на поперечные стальные сварные балки.

Длина колосниковой решетки от 2,4 до 4,8 *м*, ширина—от 1,8 до 3,2 *м*, площадь колосниковой решетки составляет от 4,3 до 16 *м*², причем живое сечение составляет примерно 25% площади решетки. Выпавший через отверстие в жаровом кольце клинкер при помощи лопаток *5*, установленных под определенным углом и вращающихся вместе с печью, принудительно движется вдоль колосниковой решетки. Лопатки закреплены на

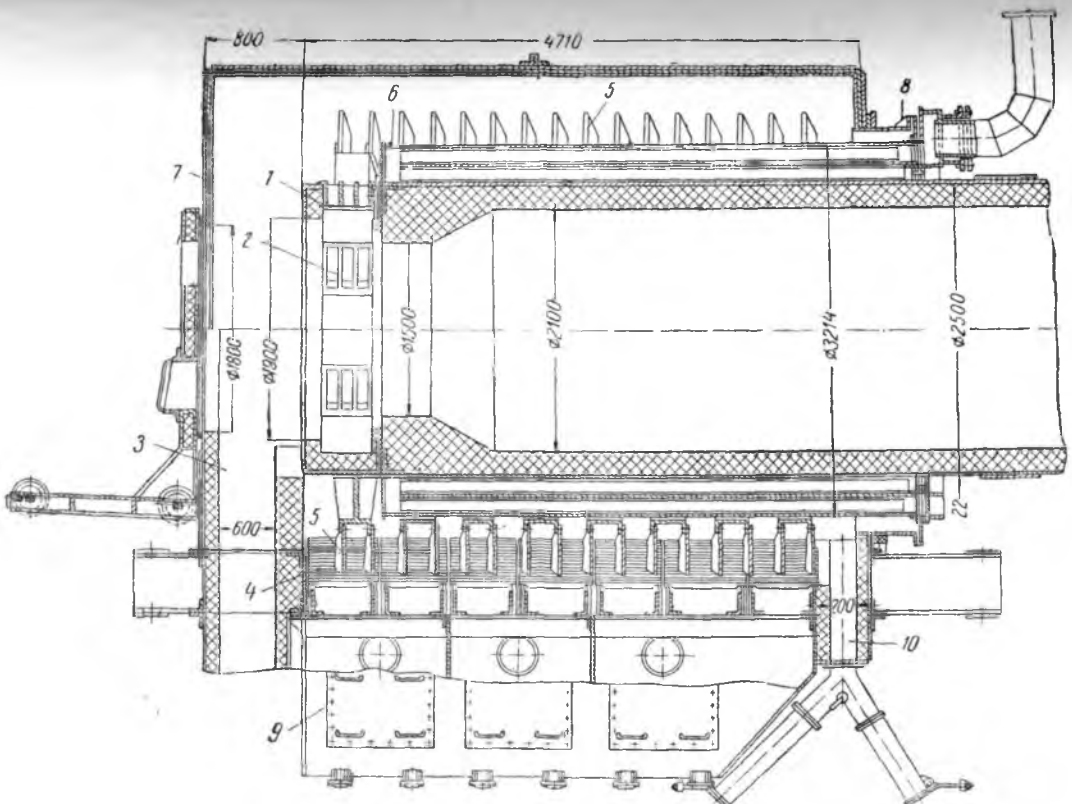


Рис. 145. Скребковый холодильник.

внешней поверхности кожуха *6*, охватывающего передний конец печи и образующего с ним пустотелое пространство, закрытое с передней торцовой стороны и открытое с противоположной. В это пространство вентилятором вдувается воздух для охлаждения горячей части корпуса. Лопасти имеют такую длину, что между их торцами и решеткой при вращении остается зазор в 50 *мм*. Следовательно, колосники всегда покрыты защитным слоем уже охлажденного клинкера, предохраняющего их от непосредственного соприкосновения с горячим, вновь поступаю-

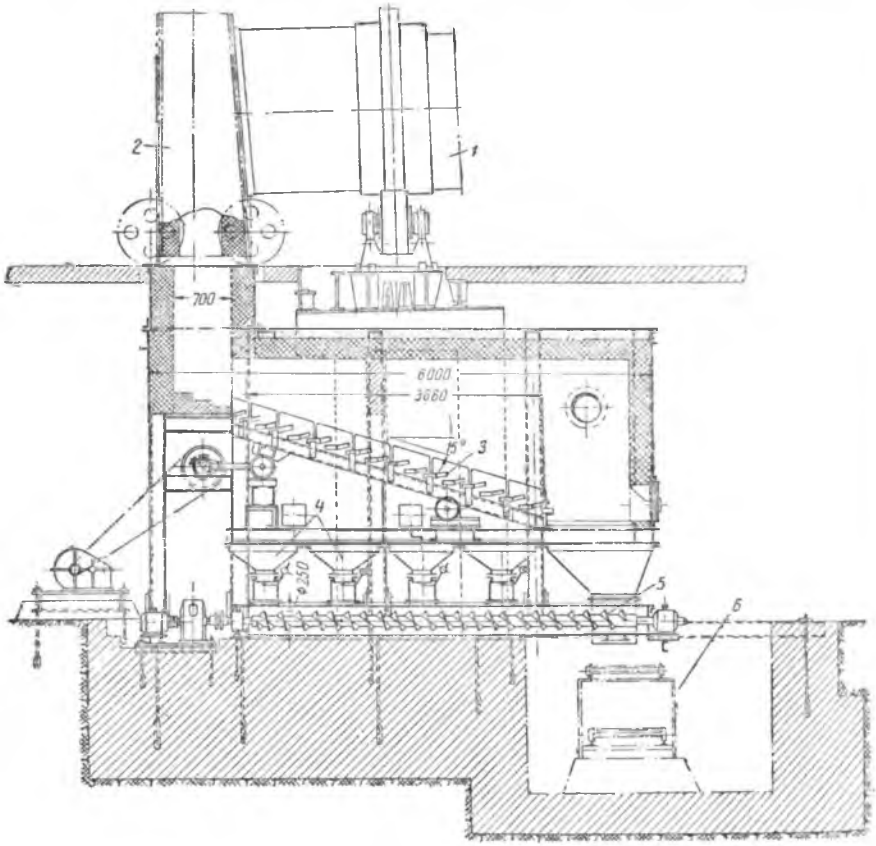


Рис. 146. Переталкивающий колосниковый холодильник Гипроцемента: *1*—вращающаяся печь; *2*—откатная головка; *3*—наклонно переталкивающий холодильник; *4*—воронки для сбора клинкера; *5*—шнек; *6*—транспортер.

щим клинкером. Вся передняя часть печи вместе с кожухом и колосниковой решеткой заключена в наружный общий кожух *7* с отверстием для форсунки у передней торцовой стенки. Задняя торцовая стенка имеет уплотнение *8* для уменьшения зазора между корпусом печи и торцовой стенкой наружного кожуха.

Под колосниковой решеткой расположена прямоугольная камера *9*, разделенная на 2—3 секции, которые соединены с вентилятором для подачи вторичного воздуха. Воздух, проходя через слой клинкера на решетку, охлаждает его, нагревается сам и поступает в печь через передний открытый конец для горения. Охлажденный клинкер падает в разгрузочную шахту *10* и оттуда через автоматический затвор—на транспортер.

Для выравнивания гребней, образующихся на решетке после прохода лопаток через слой клинкера, к кожуху прикреплены ковши из жароупорного чугуна. Снимая верхушку гребней, они захватывают при своем вращении часть клинкера и перебрасывают его на другую сторону решетки. Хорошее охлаждение клинкера и малая потеря тепла через изолированный кожух повышают тепловой коэффициент полезного действия такого холодильника до 90%. Клинкер в нем охлаждается до 60—100°.

Наклонно переталкивающие колосники конструкции Гипроцемента представляют собой ступенчатую решетку, в которой четные неподвижные ступени чередуются с нечетными подвижными ступенями, связанными общей рамой, совершающей возвратно-поступательное движение (10—15 ходов в минуту при ходе 60—80 *мм*). Из-за этого движения и небольшого наклона решетки слой клинкера передвигается к концу холодильника. Под решетку подается холодный воздух с давлением 120—125 *кг/м*^{2}, который, охлаждая клинкер до 60—80°, сам нагревается до 450° и направляется для горения в печь. Рис. 146 дает представление о переталкивающем колосниковом холодильнике Гипроцемента.

Глава V

ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ШАХТНЫХ И ВРАЩАЮЩИХСЯ ПЕЧЕЙ

Тепловой расчет печей заключается в составлении материального и теплового балансов, определении производительности печи и расхода топлива, определении температуры горения, выборе тяговых и дутьевых устройств.

1. МАТЕРИАЛЬНЫЙ БАЛАНС

Обычно материальный и тепловой балансы составляются на 1 *кг* клинкера, причем материальный баланс является базой для составления теплового баланса. Материальный баланс имеет следующие статьи прихода и расхода:

Приход: 1) топливо;
2) сырье;
3) воздух: а) сухой, б) влага воздуха.

Расход: 1) клинкер;
2) унос;
3) отходящие газы: а) сухие, б) влажные.

Материальные балансы составляются для:

а) действующих печей—на основании данных испытания;

б) проектируемых печей—на основании опытных данных по аналогичным действующим печам.

Отдельные статьи материального баланса определяются следующими расчетами.

Расход топлива

1. Расход твердого или жидкого топлива:

$$b_m = \frac{G_z^m}{G_{кл}} \text{ кг/кг клинкера.}$$

2. Расход газообразного топлива:

$$b = \frac{V_z^m}{100 \cdot G_{кл}} \left(CO_2^p \gamma_{CO_2} + CO^p \gamma_{CO} + CH_4^p \cdot \gamma_{CH_4} + H_2^p \gamma_{H_2} + \right.$$

$$\left. + C_n \cdot H_m^p \cdot \gamma_{C_nH_m} + O_2^p \gamma_{O_2} + N_2^p \cdot \gamma_{N_2} + H_2O^p \cdot \gamma_{H_2O} \right) \text{ кг/кг клинкера,}$$

где: G_z^m и V_z^m — расход рабочего топлива за испытание в *кг* и $м^3$;

$G_{кл}$ — выход клинкера за испытание в *кг*;

CO_2^p, CO^p, CH_4^p, $C_nH_m^p$, H_2^p, O_2^p, N_2^p, H_2O^p — содержание соответствующих компонентов в газообразном рабочем топливе в %;

γ_{CO_2}, γ_{CO}, γ_{CH_4}, $\gamma_{C_nH_m}$, γ_{H_2}, γ_{O_2}, γ_{N_2}, γ_{H_2O} — объемный вес соответствующих компонентов в $кг/м^3$.

При проектировании расход топлива находят из уравнения теплового баланса, в котором искомая величина обозначается буквой X.

Расход сырья

При испытании печей расход сырья:

$$q_{шл}^{вл} = \frac{G_{шл}^{вл}}{G_{кл}} \text{ кг на 1 кг клинкера,}$$

где $G_{шл}^{вл}$ —расход сырья за испытание в *кг*.

При проектировании даются состав абсолютно сухого шлама и его влажность. На основании этих данных расход сырья на 1 *кг* клинкера может быть определен по следующим формулам:

1. Теоретический расход абсолютно сухого шлама:

$$G^{т}_{шл} = \frac{100}{100 - \text{п. п. п.}} \text{ кг на 1 кг клинкера,}$$

где п. п. п. — потери при прокаливании в %;

2. Фактический расход сухого шлама с учетом уноса:

$$G^{ф}_{шл} = \frac{G^{т}_{шл} \cdot 100}{100 - q_{у}} \text{ кг на 1 кг клинкера,}$$

где: $q_{у}$ — процент уноса.

$q_{у}$ — при мокром способе принимается:

для полых печей — 3÷5%;

для печей с цепями — 2,5÷3,5%;

для печей с установками для разбрызгивания шлама — 10÷16%;

для печей с испарителями — 9÷14%.

$q_{у}$ при сухом способе принимается:

для полых печей — 4÷8%;

для печей с котлами-утилизаторами — 8÷10%;

для печей с подогревателями — 20÷30% (для шахтных автоматических печей — 0,5÷1%);

3. Расход влажного сырья — шлама, брикета при влажности $W_{шл}$ в процентах.

$$G^{вл}_{шл} = \frac{G^{ф}_{шл} \cdot 100}{100 - W_{шл}} \text{ кг на 1 кг клинкера.}$$

Количество уноса

Количество уноса может быть определено по формуле:

$$G_{ун} = G^{ф}_{шл} - 1 - G^{шл}_{CO_2} \text{ кг на 1 кг клинкера.}$$

Количество CO_2 из шлама определяется по формуле:

$$G^{шл}_{CO_2} = \frac{\text{п. п. п.}}{100} \left[G^{т}_{шл} + \left(G^{ф}_{шл} - G^{т}_{шл} \right) \frac{q_{д}}{100} \right] \text{ кг на 1 кг клинкера,}$$

где $q_{д}$ — количество уноса, в котором произошла диссоциация $CaCO_3$ и $MgCO_3$, в %; обычно при проектировании печи $q_{д} = 50\%$.

Расход сухого воздуха

Расход воздуха при проектировании определяется по заданному составу топлива по формулам:

1. Теоретический расход:

$$G^{т}_{в} = 0{,}1151 \cdot C_{ф} + 0{,}345\, H^{р}_{ф} + 0{,}043 \cdot \left(S^{р}_{ф} - O^{р}_{ф} \right) \text{ на 1 кг топлива,}$$

где $C_ф$ — содержание углерода в форсуночном топливе с поправкой на механическую неполноту горения топлива.

$$C_ф = C^p_ф \left(1 - \frac{q_4 \cdot Q^p_н}{100 \cdot 8100}\right),$$

где q_4 — потери тепла от механического и химического недожога принимаются от 3 до 4%.

2. Действительный расход воздуха на 1 *кг* клинкера:

$$G^{дейст.}_в = G^m_в \cdot \alpha \cdot b_m \text{ кг на 1 кг клинкера;}$$

$$V^{дейст.}_в = V^m_в \cdot \alpha \cdot b_m \text{ м}^3 \text{ на 1 кг клинкера.}$$

Для твердого топлива $\alpha = 1{,}1$; для мазута $\alpha = 1{,}05$; для газообразного топлива $\alpha = 1{,}0$.

Для газообразного топлива:

$$G^m_в = 0{,}0308\left(CO^m + 4CH^m_4 + 6C_2H^m_4 + H^m_2 - 2O^m_2\right) b_m \text{ кг на 1 кг клинкера;}$$

$$V^m_в = 0{,}0238\left(CO^m + 4CH^m_4 + 6C_2H^m_4 + H^m_2 - 2O^m_2\right) \cdot b_m \text{ м}^3 \text{ на 1 кг клинкера;}$$

где b_m — расход топлива на 1 *кг* клинкера.

Поступление влаги с воздухом

В соответствии с характеристикой окружающего воздуха определяют его влагосодержание при данной температуре и относительной влажности (по диаграмме $I - d$ или таблицам). Расход влаги составит:

$$G^д_{H_2O} = G^д_в \cdot \frac{d}{1000} \cdot \text{кг на 1 кг клинкера.}$$

Количество отходящих газов

1. Выход CO_2 из шлама:

$$G^{шл}_{CO_2} = \frac{п.п.п.}{100}\left[G^m_{шл} + \left(G^ф_{шл} - G^m_{шл}\right)\frac{q_д}{100}\right] \text{ кг на 1 кг клинкера.}$$

Выход CO_2 из шлама получается от разложения $CaCO_3$ и $MgCO_3$, причем:

$$G^{MgCO_3}_{CO_2} = \frac{MgO \cdot 44}{40{,}31 \cdot 100}\left[G^m_{шл} + \left(G^ф_{шл} - G^m_{шл}\right)\frac{q_д}{100}\right] \text{ кг на 1 кг клинкера}$$

$$G^{CaCO_3}_{CO_2} = G^{шл}_{CO_2} - G^{MgCO_3}_{CO_2} \text{ кг на 1 кг клинкера,}$$

где: MgO — содержание окиси магния в абсолютно сухом шламе в %.

2. Количество влаги из шлама:

$$G^{шл}_{H_2O} = G^{вл}_{шл} - G^ф_{шл} \text{ кг на 1 кг клинкера,}$$

3. Количество газов при полном сгорании твердого и жидкого топлива:

сухих:

$$G^m_{\text{о. г.}} = [0{,}0367\, C_ф + 0{,}02\, S^p_ф + 0{,}01\, N^p_ф + 0{,}768\, G^д_в + 0{,}232\, (\alpha - 1) \cdot G^m_в]\, b_m \text{ кг на 1 кг клинкера;}$$

влажных:

$$G^m_{H_2O} = \left(0{,}09\, H^p_ф + 0{,}01 W^p_ф + \frac{d \cdot G^д_в}{1000}\right) b_m \text{ кг на 1 кг клинкера.}$$

Количество газов от сгорания газообразного топлива:

сухих:

$$G^m_{O_2} = [0{,}0198(CO^m_2 + CO^m + CH^m_4 + 2C_2H^m_4) + 0{,}768 \cdot G^д_в + 0{,}0125\, N^m_2 + 0{,}232(\alpha - 1) \cdot G^m_в]\, b_m \text{ кг на 1 кг клинкера,}$$

влажных:

$$G^m_{H_2O} = \left[0{,}00805 \cdot (2CH^m_4 + 2C_2H^m_4 + H^m_2 + H_2O^m) + G^д_в \cdot \frac{d}{1000 \cdot 0{,}805}\right] b_m \text{ кг на 1 кг клинкера.}$$

Эти формулы служат для определения расхода при проектировании печи.

2. ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС

Приход: 1) теплосодержание топлива;
а) химическое;
б) физическое;
3) теплосодержание воздуха, поступающего в установку.

Расход: 1) теоретическое тепло клинкерообразования;
2) расход тепла на испарение воды из сырья;
3) потери тепла с отходящими газами;
4) потери тепла от механического и химического недожога топлива;
5) потери тепла с клинкером, выходящим из установки;
6) потери тепла с уносом;
7) потери тепла установкой в окружающую среду.

1. Теплосодержание топлива:

а) химическое $Q^m_x = b_m Q^p_н$ *ккал* на 1 *кг* клинкера,

где $Q^p_н$ — низшая теплотворность топлива;

б) физическое: $Q^m_ф = b_m C_m t_m$ *ккал* на 1 *кг* клинкера,

где C_m — теплоемкость топлива, которая может быть определена для твердого топлива по следующей формуле:

$$C_m = C^c_m \frac{100 - W^p_ф}{100} + \frac{W^p_ф}{100} \text{ ккал/кг град,}$$

где: C_m^c — теплоемкость абсолютно сухого топлива в *ккал/кг град*

0,22 — для антрацита,

0,24 — для тощих углей;

0,26 — для длиннопламенных углей,

0.27 — для бурых углей;

$W_ф^p$ — влажность топлива в %;

t_m — температура топлива, поступающего в печи.

2. Теплосодержание сырья:

$$Q_{шл} = (G_{шл}^{ф} \cdot C_{шл} + G_{H_2O}^{шл}) t_{шл} \text{ ккал на 1 кг клинкера,}$$

где: $C_{шл}$ — теплоемкость абсолютно сухого шлама, равная 0,21 *ккал/кг град*;

$t_{шл}$ — температура шлама, поступающего в печь.

3. Теплосодержание воздуха:

$$Q_в = \left(G_в^д \cdot C_в \cdot b_m + \frac{d}{1000} G_в^д \cdot C_{H_2O} \cdot b_m\right) t_в \text{ ккал на 1 кг клинкера,}$$

где $C_в$ и C_{H_2O} — теплоемкость воздуха и водяных паров при температуре воздуха $t_в$.

4. Теоретическое тепло клинкерообразования: количество тепла, необходимое для получения 1 *кг* клинкера из сухого сырья с температурой 0°, без материальных и тепловых потерь (тепловой эффект клинкерообразования), определяется как разность расхода (на нагревание сырья, дегидратацию каолина и декарбонизацию $CaCO_3$ и $MgCO_3$ и на образование жидкой фазы клинкера) и прихода тепла (в результате образования клинкерных минералов и их охлаждения)[1].

Приближенный, достаточно точный расход тепла на клинкерообразование может быть определен как разница между расходом тепла на диссоциацию $CaCO_3$ и $MgCO_3$ и теплом экзотермических реакций клинкера.

Расход тепла на диссоциацию $CaCO_3$ и $MgCO_3$:

$$Q_{дис} = \frac{G_{CO_2}^{CaCO_3} \cdot 100}{44} \cdot 396 + \frac{G_{CO_2}^{MgCO_3} \cdot 84,3}{44} \cdot 195 \text{ ккал на 1 кг клинкера,}$$

где: 396 — эндотермический эффект декарбонизации $CaCO_3$ в калориях на 1 *кг* $CaCO_3$;

195 — эндотермический эффект декарбонизации $MgCO_3$ в калориях на 1 *кг* $MgCO_3$;

44 — моль CO_2;

100 — моль $CaCO_3$;

84,3 — моль $MgCO_3$.

Тепло экзотермических реакций клинкера:

а) из обычного сырья (глина + известняк) — 100 ÷ 120 *ккал* на 1 *кг* клинкера;

б) при безжелезистом сырье — 70 ÷ 90 *ккал* на 1 *кг* клинкера;

---

[1] Точный расчет тепла клинкерообразования см. Е. И. Ходоров. Печи цементной промышленности, ч. I. Промстройиздат, 1950.

в) при сырье шлак+известняк—50÷70 *ккал* на 1 *кг* клинкера.

Отсюда расход теоретического тепла клинкерообразования:

$$Q^{m}_{кл} = Q_{дис} - Q_{экз} \text{ ккал на 1 кг клинкера.}$$

5. Потери тепла на испарение воды из сырья:

$$Q^{c}_{H_2O} = C^{шл}_{H_2O} \cdot 595 \text{ ккал на 1 кг клинкера,}$$

где 595—скрытая теплота парообразования воды при 0° в *ккал/кг*.

6. Физическая потеря тепла с отходящими газами определяется как сумма теплосодержаний отдельных компонентов при температуре отходящих газов:

$$Q^{ф}_{о.г} = [(G^{m}_{CO_2} \cdot C_{CO_2} + G^{m}_{SO_2} \cdot C_{SO_2} + G^{m}_{N_2} \cdot C_{N_2} + G^{m}_{O_2} \cdot C_{O_2} +$$
$$+ G^{m}_{H_2O} \cdot C_{H_2O}) \cdot b_m + G^{шл}_{CO_2} \cdot C_{CO_2} +$$
$$+ G^{шл}_{H_2O} \cdot C_{H_2O}] \cdot t_{о.г.} \text{ ккал на 1 кг клинкера,}$$

где C_{CO_2}, C_{SO_2}, C_{N_2}, C_{O_2}, C_{H_2O} — теплоемкость газов при температуре отходящих газов $t_{о.г}$.

7. Химическая потеря с отходящими газами:

$$Q_н = (Q^{p}_{н} \cdot q_4) : 100 \text{ ккал на 1 кг клинкера,}$$

где q_4—потери тепла от химического недожога.

В действующих печах химические потери тепла определяются на основании данных газового анализа.

8. Потери тепла с клинкером:

$$Q_{кл} = C_{кл} \cdot t_{кл} \text{ ккал на 1 кг клинкера,}$$

где $C_{кл}$ —теплоемкость клинкера принимается при температуре:

100° — 0,188,
500° — 0,212,
1000° — 0,238,
1500° — 0,268.

9. Потери тепла с уносом:

$$Q_{ун} = G_{ун} \cdot C_{кл} \cdot t_{о.г} \text{ ккал на 1 кг клинкера,}$$

где теплоемкость уноса $C_{кл}$ определяется при температуре газов по выходе из печи $t_{о.г}$.

10. Потери тепла в окружающую среду принимаются по отношению к общему расходу тепла в процентах:

При мокром способе:

для полых печей—8÷10%;

для длинных печей с цепной завесой—15÷17%;

для печей с установками для разбрызгивания шлама—10 ÷ 12%;

для печей с испарителями—12 ÷ 14%;

для печей с фильтрами и котлами-утилизаторами—9 ÷ 11%.

При сухом способе:

для полых печей—15 ÷ 17%;

для печей с котлами-утилизаторами—10 ÷ 12%;

для печей с конвейерными кальцинаторами—22%.

В шахтных автоматических печах—1 ÷ 2,5%.

Точный расчет потерь в окружающую среду:

$$Q_п = \frac{\Sigma f \alpha_п (t_п - t_в)}{G} \text{ ккал на 1 кг клинкера,}$$

где: f —площадь поверхности элемента печной установки в $м^2$;

$t_п$ —температура поверхности элемента установки в град.;

$t_в$ —температура наружного воздуха, окружающего печь;

$\alpha_п$ —коэффициент теплоотдачи с поверхности печи в *ккал/град м² час*;

G —производительность печной установки в *кг/час*.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ГОРЕНИЯ

Теоретическая и практическая температуры горения рассчитываются по методам, изложенным во втором разделе учебника — расчеты процесса горения.

Действительная температура всегда меньше теоретической; для перехода от теоретической к действительной пользуются термическими коэффициентами: для вращающихся печей $\sigma = 0{,}65 \div 0{,}75$ и для шахтных печей $\sigma = 0{,}75 \div 0{,}80$.

Следовательно, $t_д = t_m \sigma$.

Тепловой коэффициент полезного действия печной установки определяется как отношение теплового эффекта клинкерообразования к химической энергии топлива, расходуемого на обжиг:

$$\text{к. п. д.} = \frac{Q^m_{кл}}{Q^p_н B_m}.$$

4. ПРИМЕР ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЕЧИ

а) Исходные данные

1. Вращающаяся печь длиной 125 *м* и диаметром 3,0/2,7/3,0 *м* с рекуператорными холодильниками.

2. Топливо—смесь подмосковного угля (45%) и тощего донецкого угля (55%).

Влажность угольной смеси $W^p_ф = 4\%$.

Состав в %	C^p	H^p	N^p	O^p	S^p	A^p	W^p
Подмосковный уголь . .	26,8	2,0	0,5	8,3	2,4	27,0	33,0
Тощий уголь	69,3	3,2	1,2	1,6	1,7	17,0	6,0

3. Способ производства клинкера—мокрый.

4. Влажность шлама $W_{шл}=38\%$.

5. Температура отходящих газов из печи $t_{о.г}=200°$.

6. Процент уноса $q_y=3{,}5\%$.

7. Количество уноса, в котором произошла диссоциация $CaCO_3$ и $MgCO_3$, $q_д=50\%$.

8. Избыток воздуха в печи $\alpha_п=1{,}1$ и за пыльной камерой $\alpha_к=1{,}3$.

9. Потери тепла в окружающий воздух в *ккал* на 1 *кг* клинкера по опытным данным принимаем:

а) для вращающейся печи—230;

б) для рекуператоров—20;

в) для дымовой камеры—2.

10. Характеристика окружающего воздуха:

а) температура $t_в=15°$;

б) относительная влажность $\varphi=70\%$;

в) влагосодержание $d_0=7{,}56$ *г/кг* сухого воздуха.

11. Потери тепла: от механического недожога $q_4=3\%$, от химического недожога $q_4^{*}=1\%$.

12. Температура форсуночного топлива, поступающего в печь, $t_m=40°$ и шлама $t_{шл}=10°$.

13. Состав абсолютно сухого шлама: $SiO_2=14\%$; $Al_2O_3=2{,}63\%$; $Fe_2O_3=1{,}40\%$; $CaO=46\%$; $MgO=0{,}27\%$; $SO_3=0{,}10\%$; потери при прокаливании (п. п. п.) $=35{,}6\%$:

14. Температура клинкера, выходящего из рекуператоров, $_{кл}=200°$.

15. Теплоемкости в *ккал/кг град*:

а) абсолютно сухого шлама $C_{шл}=0{,}21$;

б) абсолютно сухого топлива $Cm=0{,}25$.

16. Количество первичного воздуха 23%, вторичного—72%, третичного—5%.

17. Площадь цепной завесы—750 *м*².

б) Расчет количества воздуха и уходящих газов на 1 *кг* клинкера

1. Состав угольной смеси в рабочем состоянии в %:

$$C_c^p=C_n^p\frac{45}{100}+C_m^p\frac{55}{100}=26{,}8\cdot0{,}45+69{,}5\cdot0{,}55=50{,}29.$$

Аналогично: $H_c^p=2{,}66$; $N_c^p=0{,}885$; $O_c^p=4{,}615$;

$S_{ф}^p=2{,}015$; $A_c^p=21{,}5$; $W_c^p=18{,}15$.

2. Рабочий состав форсуночного топлива при $W_{ф}^p=4\%$:

$$C_{ф}^p=C_c^p\frac{100-W_{ф}^p}{100-W_c^p}=50{,}285\frac{100-4}{100-18{,}15}=58{,}83.$$

Аналогично: $H_{ф}^p=3{,}18$; $N_{ф}^p=1{,}03$; $O_{ф}^p=5{,}415$;

$S_{ф}^p=2{,}36$; $A_{ф}^p=25{,}2$; $W_{ф}^p=4$.

3. Теплотворность форсуночного топлива по формуле Д. И. Менделеева:

$$Q_p^n = 81\ C_{ф}^p + 246\ H_{ф}^p + 26\,(S_{ф}^p - O_{ф}^p) - 6\ W_{ф}^p = 81 \cdot 58{,}83 + 246 \cdot 3{,}18 +$$

$$+ 26(2{,}36 - 5{,}4) - 6 \cdot 4 = 5444 \text{ ккал на 1 кг топлива.}$$

4. Содержание углерода с учетом механической неполноты горения:

$$C_{ф} = C_{ф}^p \left(1 - \frac{q_4 Q_n^p}{100 \cdot 8100}\right) = 58{,}83 \left(1 - \frac{3 \cdot 5444}{100 \cdot 8100}\right) = 57{,}65\%.$$

5. Теоретическое количество воздуха для сжигания топлива:

$$G_в^m = 0{,}1151\ C_{ф} + 0{,}345\ H_{ф}^p + 0{,}043\ (S_{ф}^p - O_{ф}^p) = 0{,}1151 \cdot 57{,}65 +$$

$$+ 0{,}345 \cdot 3{,}18 + 0{,}043(2{,}36 - 5{,}4) = 7{,}6 \text{ кг/кг.}$$

$$V_в^m = G_в^m : \gamma_в = 7{,}60 : 1{,}293 = 5{,}85 \text{ м}^3 \text{ на 1 кг топлива при } 0°.$$

6. Действительное количество воздуха:

$$G_в^q = G_в^m\ \alpha = 7{,}6 \cdot 1{,}1 = 8{,}36 \text{ кг/кг.}$$

$$V_в^д = V_в^m\ \alpha = 5{,}85 \cdot 1{,}1 = 6{,}44 \text{ м}^3 \text{ на 1 кг топлива при } 0°.$$

7. Количество отходящих газов при сжигании 1 *кг* топлива:

а) углекислый газ CO_2:

$$G_{CO_2}^m = 0{,}0367\ C_{ф} = 0{,}0367 \cdot 57{,}65 = 2{,}12 \text{ кг/кг;}$$

$$V_{CO_2}^m = G_{CO_2}^m : \gamma_{CO_2} = 2{,}12 : 1{,}977 = 1{,}07 \text{ м}^3 \text{ на 1 кг топлива при } 0°;$$

б) сернистый газ SO_2:

$$G_{SO_2}^m = 0{,}02\ S_{ф}^p = 0{,}02 \cdot 2{,}36 = 0{,}0472 \text{ кг/кг.}$$

$$V_{SO_2}^m = G_{SO_2}^m : \gamma_{SO_2} = 0{,}0472 : 2{,}927 = 0{,}016 \text{ м}^3 \text{ на 1 кг при } 0°;$$

в) азот N_2:

$$G_{N_2} = 0{,}01\ N_{ф}^p + 0{,}768\ G_{ф}^д = 0{,}01 \cdot 1{,}03 + 0{,}768 \cdot 8{,}36 = 6{,}43 \text{ кг/кг.}$$

$$V_{N_2}^m = G_{N_2}^m : \gamma_{N_2} = 6{,}43 : 1{,}251 = 5{,}13 \text{ м}^3 \text{ на 1 кг топлива при } 0°:$$

г) кислород O_2:

$$G_{O_2}^m = 0{,}232(\alpha - 1)\ C_в^m = 0{,}232\,(1{,}1 - 1)\,7{,}60 = 0{,}1763 \text{ кг/кг}$$

$$V_{O_2}^m = G_{O_2}^m : \gamma_{O_2} = 0{,}176 : 1{,}429 = 0{,}123 \text{ м}^3 \text{ на 1 кг топлива при } 0°:$$

д) водяные пары H_2O:

$$G_{H_2O}^m = 0{,}09\ H_{ф}^m + 0{,}01\ W_{ф}^p + \frac{d}{1000}\ G_в^д =$$

$$= 0{,}09 \cdot 3{,}18 + 0{,}01 \cdot 4 + \frac{7 \cdot 56}{1000} \cdot 8{,}36 = 0{,}389 \text{ кг/кг.}$$

$$V_{H_2O}^m = G_{H_2O}^m : \gamma_{H_2O} = 0{,}389 : 0{,}805 = 0{,}485 \text{ м}^3 \text{ на 1 кг топлива при } 0°.$$

8. Расход абсолютно сухого шлама на 1 *кг* клинкера:

$$G^{m}_{шл}=\frac{1\cdot 100}{100-\text{п.п.п.}}=\frac{100}{100-35,6}=1,55\ кг.$$

9. Расход сухого шлама с учетом уноса в количестве 3,5%:

$$G^{ф}_{шл}=\frac{G^{m}_{шл}\cdot 100}{100-q_{у}}=\frac{1\cdot 55\cdot 100}{100-3,5}=1,6\ кг\ на\ 1\ кг\ клинкера.$$

10. Расход влажного шлама при влажности $W_{шл}=38\%$:

$$G^{вл}_{шл}=\frac{G^{ф}_{шл}\,100}{100-W_{шл}}=\frac{1,6\cdot 100}{100-38}=2,58\ кг\ на\ 1\ кг\ клинкера.$$

11. Количество CO_2 из шлама:

$$G^{шл}_{CO_2}=\frac{\text{п.п.п.}}{100}\left[G^{m}_{шл}+\left(G^{ф}_{шл}-G^{m}_{шл}\right)\frac{q_{д}}{100}\right]=$$

$$=\frac{35,6}{100}\left[1,55+(1,60-1,55)\right]\frac{50}{100}=0,561\ кг;$$

$$V_{CO_2}=G^{шл}_{CO_2}:\gamma_{CO_2}=0,561:1,977=0,285\ м^3\ на\ 1\ кг\ клинкера\ при\ 0°.$$

12. Количество CO_2 из $MgCO_3$:

$$G^{MgCO_3}_{CO_2}=\frac{MgO\cdot 44}{40,31\cdot 100}\left[G^{m}_{шл}+\left(G^{ф}_{шл}-G^{m}_{шл}\right)\frac{q_{к}}{100}\right]=$$

$$=\frac{0,27\cdot 44}{40,31\cdot 100}\left[1,55+(0,6-1,55)\frac{50}{100}\right]=0,005\ кг\ на\ 1\ кг\ клинкера.$$

13. Количество CO_2 из $CaCO_3$:

$$G^{CaCO_3}_{CO_2}=G^{шл}_{CO_2}-G^{MgCO_3}_{CO_2}=0,561-0,005=0,556\ кг\ на\ 1\ кг\ клинкера.$$

14. Количество испаренной влаги из шлама на 1 *кг* клинкера:

$$G^{шл}_{H_2O}=G^{вл}_{шл}-G^{ф}_{шл}=2,58-1,6=0,98\ кг;$$

$$V^{шл}_{H_2O}=G^{шл}_{H_2O}:\gamma_{H_2O}=0,98:0,805=1,22\ м^3\ при\ 0°.$$

15. Количество уноса на 1 *кг* клинкера:

$$G_{ун}=G^{ф}_{шл}-1-G^{шл}_{CO_2}=1,60-1-0,561=0,039\ кг.$$

в) Определение расхода топлива на 1 *кг* клинкера

Обозначим удельный расход топлива на 1 *кг* клинкера через X.

16. Химическое тепло топлива:

$$Q^{x}_{m}=Q^{p}_{н}\,X=5444X\ ккал.$$

17. Физическое тепло топлива

$$Q^{ф}_{m}=C'_{m}\,t_{m}\,X=0,28\cdot 40\cdot X=11,2X\ ккал,$$

где C'_m определяется по формуле:

$$C'_m = \frac{100 - W^p_\phi}{100} + \frac{W_\phi}{100} = 0,25\,\frac{100-4}{100} + \frac{4}{100} = 0,28 \text{ ккал}.$$

18. Тепло, вносимое воздухом для горения топлива:
а) первичным воздухом при $t_в = 40°$:

$$Q^п_в = \left(G^д_в C_в X \frac{23}{100} + \frac{d}{1000} \cdot \frac{23}{100} G^д_в C_{H_2O} X \right) t'_в =$$

$$= \left(8,44 \cdot 0,238 \cdot X 0,23 + \frac{7,56}{1000}\, 0,23 \cdot 8,44 \cdot 0,36X\right) 40 = 19,95\, X \text{ ккал};$$

б) вторичным и третичным воздухом (72+5=77% при $t'_в = 15°$:

$$Q^{вт}_в = \left(0,77 \cdot 8,44 \cdot 0,238\, X + \frac{7,56}{1000}\, 0,77 \cdot 8,44 \cdot 0,36\, X\right) 15 = 23,4X.$$

19. Тепло, вносимое шламом:

$$Q_{шл} = \left(G^ф_{шл} \bar{C}_{шл} + G^{шл}_{H_2O} \right) t_{шл} = (1,6 \cdot 0,21 + 0,98) 10 = 13,18 \text{ ккал}.$$

20. Тепло от экзотермических реакций при образовании клинкера принимаем равным 84 *ккал*.

21. Общий приход тепла:

$$5444X + 11,2X + 19,95X + 23,4X + 13,18 + 84 = 5498,55X +$$
$$+ 97,2 \text{ ккал на 1 кг клинкера.}$$

22. Расход тепла на диссоциацию $CaCO_3$ и $MgCO_3$:

$$Q_{дис} = \frac{G^{CaCO_3}_{CO_2} \cdot 100}{44} \cdot 396 + \frac{G^{MgCO_3}_{CO_2} \cdot 84,3}{44}\, 195 = \frac{0,556 \cdot 100}{44} \cdot 396 +$$

$$+ \frac{0,005 \cdot 84,3}{44}\, 195 = 501,92 \text{ ккал на 1 кг клинкера.}$$

23. Расход тепла на испарение влаги из шлама:

$$Q^{шл}_{H_2O} = 595\; G^{шл}_{H_2O} = 595 \cdot 0,98 = 583,1 \text{ ккал на 1 кг клинкера.}$$

24. Потери тепла с отходящими газами при средних теплоемкостях газов: $t = 200°$:

$$C_{CO_2} = 0,2174 \text{ ккал/кг·град}; \quad C_{SO_2} = 0,158 \text{ ккал/кг·град};$$

$$C_{N_2} = 0,2471 \text{ ккал/кг·град}; \quad C_{O_2} = 0,2234 \text{ ккал/кг·град};$$

$$C_{H_2O} = 0,4523 \text{ ккал/кг·град};$$

$$Q_з = \left[\left(G^m_{CO_2} \cdot C_{CO_2} + G^m_{SO_2} \cdot C_{SO_2} + G^m_{N_2} C_{N_2} + G^m_{H_2O} C_{H_2O} \right) X + \right.$$

$$\left. + G^{шл}_{CO_2} \cdot C_{CO_2} + G^{вл}_{шл} \cdot C_{H_2O} \right] t'_{о.г} =$$

$$= [(2,12 \cdot 0,2174 + 0,0472 \cdot 0,158 + 6,43 \cdot 0,2471 + 0,176 \cdot 0,2234 +$$

$$+ 0,389 \cdot 0,4523)\, X + 0,561 \cdot 0,2174 + 0,98 \cdot 0,4523]\, 200 =$$

$$= 457,14\, X + 113,06 \text{ ккал на 1 кг клинкера.}$$

25. Потери тепла от механической и химической неполноты сгорания топлива:

$$Q_4 = (0{,}03 + 0{,}01)\, Q_н^р X = 0{,}04 \cdot 5444\, X = 217{,}76\, X \text{ ккал на 1 кг клинкера.}$$

26. Потери тепла в окружающий воздух:

$$Q_5 = 230 + 20 = 250 \text{ ккал на 1 кг клинкера.}$$

27. Потери тепла с выходящим из рекуператоров клинкером:

$$Q_{кл} = 1\, C_{кл}\, t_{кл} = 1 \cdot 0{,}193 \cdot 180 = 35 \text{ ккал на 1 кг клинкера.}$$

28. Потери тепла с уносом пыли:

$$Q_{ун} = G_{ун}\, C_{кл}\, t_{о.г} = 0{,}039 \cdot 0{,}198 \cdot 200 = 1{,}55 \text{ ккал на 1 кг клинкера.}$$

29. Общий расход тепла:

$$504{,}92 + 582 + 457{,}14\, X + 113{,}06 + 217{,}76\, X + 250 + 35 + 1{,}55 =$$
$$= 1486{,}53 + 684{,}9\, X.$$

Расход топлива на 1 *кг* клинкера определяем из уравнения теплового баланса:

$$5498{,}55\, X + 97{,}28 = 1486{,}53 + 684{,}9\, X;\ 4813{,}65\, X =$$
$$= 1390{,}2, \text{ отсюда } X = \frac{1390{,}2}{4813{,}65} = 0{,}29 \text{ кг на 1 кг клинкера.}$$

30. Расход тепла на обжиг 1 *кг* клинкера:

$$Q_{кл} = X Q_н^р = 0{,}29 \cdot 5444 = 1579 \text{ ккал.}$$

Это примерно соответствует технологическим нормам удельного расхода тепла клинкера—1550 *ккал/кг*.

Материальный баланс вращающейся печи на 1 *кг* клинкера

	Количество	
Приход	в *кг*	в %
Топливо	0,29	5,48
Сырье	2,58	48,8
Воздух 8,36 · 0,29	2,42	45,6
Влаги из воздуха (2,42 : 7,56) : 1000	0,01	0,18
Итого	5,30	100,00
Расход		
Клинкер	1,000	18,85
Углекислый газ из сырья	0,561	10,65
Влага из сырья	0,980	18,52
Унос сырья	0,039	0,70
Отходящие газы:		
а) сухие 8,77 · 0,29	2,544	48,15
б) влажные 0,389 · 0,29	0,113	2,14
Унос золы топлива 0,04 · 0,29	0,012	0,23
Итого	5,26	
Невязка	0,04	0,76
	5,30	100,00

Невязка составляет 0,76%, что вполне допустимо.

Тепловой баланс вращающейся печи на 1 *кг* клинкера

Определяем численные значения статей прихода и расхода тепла, выраженные через x:

а) тепло, внесенное воздухом

первичным

$$19{,}96x = 19{,}96 \cdot 0{,}29 = 5{,}7 \ \frac{ккал}{кг \text{ кл.}}$$

вторичным

$$23{,}4\,x = 23{,}4 \cdot 0{,}29 = 6{,}8 \ \frac{ккал}{кг \text{ кл.}}$$

б) тепло, внесенное топливом

химическое

$$5444 \cdot 0{,}29 = 1578{,}76 \ \frac{ккал}{кг \text{ кл.}}$$

физическое

$$11{,}2\,x = 11{,}2 \cdot 0{,}29 = 3{,}22 \frac{ккал}{кг \text{ кл.}}$$

в) потери тепла с отходящими газами

$$457{,}14\,x + 113{,}06 = 245{,}63 \ \frac{ккал}{кг \text{ кл.}}$$

г) потери тепла от химического недожога

$$217{,}76\,x = 217{,}76 \cdot 0{,}29 = 63{,}15 \ \frac{ккал}{кг \text{ кл.}}$$

Остальные статьи теплового баланса определены ранее. Ниже приведены результаты расчета теплового баланса.

	Количество тепла	
	в *ккал*	в %
Приход тепла		
Химическое тепло топлива	1578,76	98,21
Физическое тепло топлива	3,22	0,20
Тепло, внесенное шламом	13,18	0,82
Тепло, внесенное воздухом:		
первичным	5,70	0,35
вторичным и третичным	6,80	0,42
	1607,66	100,00
Расход тепла		
Теоретическое тепло клинкерообразования 501,92—84,0	417,92	26,02
На испарение влаги сырья	583,10	36,27
С отходящими газами	245,63	15,32
С химическим недожогом	63,15	3,92
С клинкером	39,60	2,47
С пылью уноса	1,55	0,09
В окружающую среду 230+20	259,00	15,52
Невязка	6,31	0,39
	1607,66	100,00

Невязка баланса равная 0,39% вполне допустима.

$$\text{К. п. д.} = \frac{Q_x^к}{Q_н^р \cdot b_m} = \frac{417{,}92}{1578{,}76} = 0{,}262 \text{ или } 26{,}2\%.$$

Глава VI

УСТАНОВКИ ДЛЯ ОБЖИГА ГИПСА

1. СОВМЕЩЕННЫЙ ПОМОЛ И ОБЖИГ ГИПСА

Сущность способа заключается в том, что в мельницу, размалывающую предварительно раздробленный материал, подаются горячий воздух или дымовые газы, подсушивающие мелко размолотые частицы. Благодаря хорошему смешению и большой поверхности соприкосновения частиц материала и газов обжиг происходит очень интенсивно. Установки занимают мало места и расходуют немного топлива. В качестве помольного агрегата применяют быстроходные аэробильные мельницы (рис. 147).

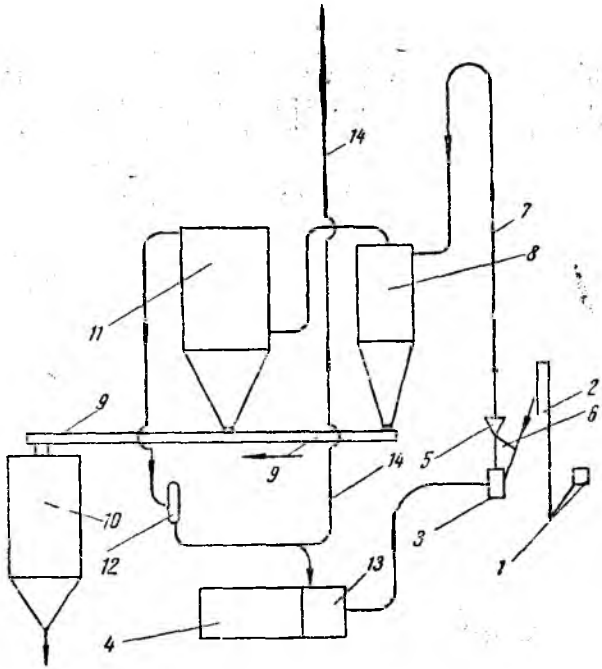


Рис. 147. Схема установки с аэробильной мельницей для обезвоживания гипса во взвешенном состоянии.

Гипсовый камень, предварительно раздробленный в молотковой дробилке *1*, подается элеватором *2* через питатель в быстроходную мельницу *3*, где подвергается тонкому измельчению. Из топки *4* в мельницу поступают горячие дымовые газы. Размолотый и частью обезвоженный гипсовый порошок сильной газовой струей выносится в сепаратор *5*, где происходит разделение молотых частиц по крупности.

Крупные частицы возвращаются обратно в мельницу по трубе *6*, а наиболее легкие фракции уносятся газовым потоком в обжиговую трубу *7* диаметром 0,6 *м* и высотой 25 *м*, где окончательно обжигаются. Обожженный гипс вместе с газами поступает в циклон *8*, откуда поступает в шнек *9*, которым передается в бункер *10*. Отработанные газы после циклона проходят через фильтр *11*, где происходит дополнительное отделение наиболее мелких частиц гипса. Очищенный газ отсасывается вентилятором *12;* часть его возвращается обратно в смесительную камеру топки *13*, а другая часть удаляется в атмосферу по трубе *14*.

Температура газов перед мельницей 400—450°, после циклона—120°. Расход условного топлива 5% от веса готовой продукции, расход электроэнергии около 30 *квт-час* на 1 *т* гипса.

2. ВАРОЧНЫЕ КОТЛЫ ДЛЯ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ ГИПСА

Для обезвоживания гипса широко применяются варочные котлы. Варочный котел (рис. 148) представляет собой металлический цилиндр с толщиной стенки 14—16 *мм*, со сферичес-

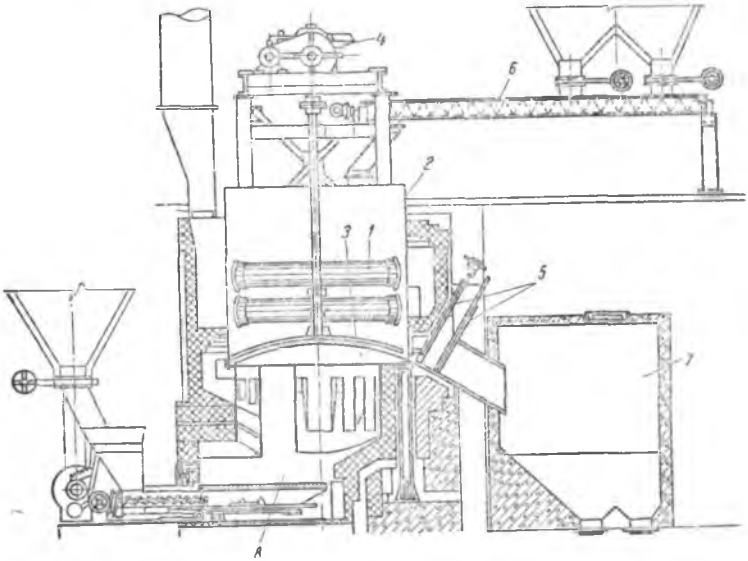


Рис. 148. Варочный котел для гипса: *1*—жаровые трубы; *2*—котел; *3*—мешалка; *4*—привод мешалки; *5* — шиберы; *6* — загрузочный шнек; *7* — бункер томления; *8* — топка с механической загрузкой топлива.

ким чугунным днищем, опирающимся кольцом из угловой стали на кирпичную кладку. Днище состоит из отдельных чугунных секций, имеющих фаски и выступы для создания плотности при сборке.

Гипсовый камень загружается через патрубок в крышке котла; в последней, кроме того, имеются отверстия для удаления образующегося пара. Котел снабжается мешалкой со скребками для постоянного перемешивания гипсового порошка. Обезвоженный гипс выгружается через люк в нижней части котла.

Процесс варки происходит при температуре около 165—170°. Весь цикл варки, включая выпуск готового гипса, длится от 2 до 3,5 часа.

Расход условного топлива, вследствие больших потерь из-за высокой температуры отходящих газов (500—600°), составляет около 7% от веса готового продукта.

Для увеличения поверхности нагрева в варочных котлах устраивают внутренние жаровые трубы, через которые проходят газы по пути из топки в дымовую трубу. Котлы этого типа обладают большой емкостью и высокой производительностью—до 120 *т* гипса в сутки.

Варочные котлы являются установками периодического действия и имеют невысокий к. п. д.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОВТОРЕНИЯ К ДЕВЯТОМУ РАЗДЕЛУ

1. В чем состоит различие между обжигом вяжущих веществ и керамических изделий?
2. Какие основные типы печей применяются для обжига вяжущих веществ?
3. Какие типы шахтных печей для обжига извести вам известны?
4. Почему при пересыпном способе сжигания топлива в шахтных печах следует применять короткопламенное топливо?
5. Чем объясняется увеличение производительности известковообжигательных печей при обжиге однородного по размерам известняка?
6. В чем состоят достоинства выгрузочного устройства системы Г. Г. Антонова для шахтных печей?
7. Дайте сравнительную теплотехническую и эксплуатационную характеристику вращающихся и шахтных печей, применяемых в цементной промышленности.
8. Расскажите о конструкциях механизированных шахтных печей для обжига цементного клинкера.
9. Как проходит процесс сгорания топлива в шахтных печах при обжиге цементного клинкера?
10. Назовите главнейшие способы увеличения производительности шахтных печей для обжига цементного клинкера.
11. Опишите устройство вращающейся печи и укажите назначение основных частей ее конструкции.
12. Какие виды топлива применяются для сжигания во вращающихся печах?
13. Как происходит процесс теплопередачи от газов к обжигаемому материалу во вращающихся печах?
14. От каких факторов зависит производительность вращающихся печей?
15. Какие огнеупорные материалы применяются для футеровки вращающихся печей?
16. Для чего применяют водяное охлаждение корпуса вращающихся печей?
17. Какие устройства для экономии тепла применяются во вращающихся печах?

РАЗДЕЛ ДЕСЯТЫЙ

ПЕЧИ СТЕКОЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Типы печей стекольного производства

Печи стекольного производства, в зависимости от назначения, делятся на две основные группы: а) стекловаренные; б) отжигательные.

Кроме того, при ремонтах основных печей на стекольных заводах применяют вспомогательные печи для обжига и нагрева огнеупорных изделий. Эти печи называются опечками, они представляют собой небольшие однокамерные печи периодического действия, обычно с нисходящим направлением пламени. Объем рабочей камеры в опечках — от 50 до 100 $м^3$. Опечки отапливают твердым или газообразным топливом.

Устройство и работа опечков принципиально не отличаются от периодических печей (горнов) для обжига строительной керамики (см. раздел восьмой).

Основным видом печей в стекольном производстве являются стекловаренные печи.

По устройству рабочей камеры стекловаренные печи делят на: а) ванные и б) горшковые.

Процесс варки стекла происходит при температурах 1400—1500°. Вследствие этого отходящие из печи продукты горения вместе с газообразными продуктами разложения стекольной шихты имеют высокую температуру и уносят из рабочей камеры печи значительные количества тепла. В зависимости от способа использования тепла отходящих дымовых газов стекловаренные печи бывают регенеративными и рекуперативными.

Основным типом стекловаренных печей, применяемых в производстве строительного листового стекла, является ванная регенеративная печь непрерывного действия.

Глава I

ВАННЫЕ СТЕКЛОВАРЕННЫЕ ПЕЧИ

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ УСТРОЙСТВЕ ВАННЫХ ПЕЧЕЙ

Ванная регенеративная печь состоит из следующих основных частей: ванны, в которой непосредственно варят стекло; горелок, через которые поступают в ванну генераторный газ и воздух и отводятся из печи отходящие дымовые газы; регенераторов для подогрева газообразного топлива и воздуха; переводных клапанов для изменения направления поступающих в печь и отходящих из печи газов; каналов для движения газов.

В ванне происходит процесс варки стекла, т. е. плавка шихты, осветление, студка и выработка стекломассы для изготовления стекольных изделий.

Ванна печи представляет собой прямоугольный бассейн, дно и стены которого сложены из шамотных донных и стеновых брусьев. Сверху ванна имеет свод, выложенный из динаса. В одной торцовой стене имеется загрузочное отверстие для засыпки шихты — засыпочный карман. С противоположного торца ванны обычно производится выработка стекломассы ручным или механизированным способом.

Расположение горелок зависит от направления пламени относительно продольной оси ванны. По этому признаку различают печи трех видов: а) с поперечным пламенем; б) с подковообразным пламенем; в) с продольным пламенем.

В ванных печах с поперечным пламенем, наиболее распространенных на заводах строительного стекла, горелки расположены вдоль бассейна ванны по обеим сторонам ее. Обычно количество горелок характеризуется числом их пар. Например, если говорят, что ванна имеет семь пар горелок, то это значит, что вдоль противоположных сторон ванны имеется по семи симметрично расположенных горелок.

В печах с продольным направлением пламени горелки обычно расположены по торцам ванны. Вследствие этого пламя движется вдоль продольной оси печи.

В ванных печах с подковообразным направлением пламени всего две горелки, но расположены они в одном торце ванны. Из одной горелки пламя выходит и описывает вдоль ванны подковообразную траекторию; отходящие газы уходят во вторую горелку, расположенную рядом с первой.

Продольное и подковообразное направления пламени применяют обычно в небольших ванных печах при ручной выработке стекломассы.

Схема движения пламени и расположение горелок в ванных печах представлены на рис. 149.

По стадиям стекловаренного процесса ванную печь по ее длине можно разбить на четыре зоны: а) зону варки; б) зону осветления; в) зону студки; г) зону выработки.

В каждой зоне должна поддерживаться определенная температура, а характер пламени соответствовать происходящим в данной зоне процессам стекловарения.

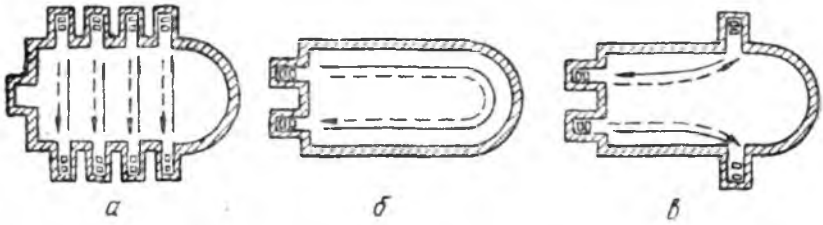


Рис. 149. Схемы направления пламени в ванных печах: *а*—печь с поперечным направлением; *б* — печь с подковообразным направлением; *в*—печь с продольным направлением.

Часть ванны, в которой происходит плавка шихты и осветление стекольного расплава, называется варочной частью, а часть, где осуществляется студка и выработка, называется выработочной частью. Варочная часть отапливается, а выработочная обычно обогревается за счет тепла, получаемого от сгорания топлива в варочной части.

По способу разделения варочной и выработочной частей различают ванные печи с общим и разделенным бассейнами.

2. ВАННЫЕ ПЕЧИ ДЛЯ ВАРКИ ЛИСТОВОГО СТЕКЛА

В настоящее время наиболее распространенным типом ванных стекловаренных печей на механизированных заводах листового строительного стекла в СССР является печь с поперечным направлением пламени и общим бассейном (рис. 150). Она представляет собой сложенный из огнеупорных материалов бассейн, имеющий в плане выработочной части форму прямоугольника. Печь в большинстве случаев соединяется при помощи перешейка с машинным каналом, над которым установлены машины для вертикального вытягивания стекла.

Длина и ширина ванны зависят от требуемой производительности и других условий и колеблются в широких пределах. Современные ванные печи на заводах строительного стекла имеют обычно длину до 30 *м* и ширину до 7 *м*.

Глубина ванны зависит главным образом от состава стекломассы и ее цвета. Чем темнее стекломасса, тем хуже она проводит тепловые лучи и медленнее прогревается. Следовательно, тем меньшую глубину должна иметь ванна, и наоборот. На заво-

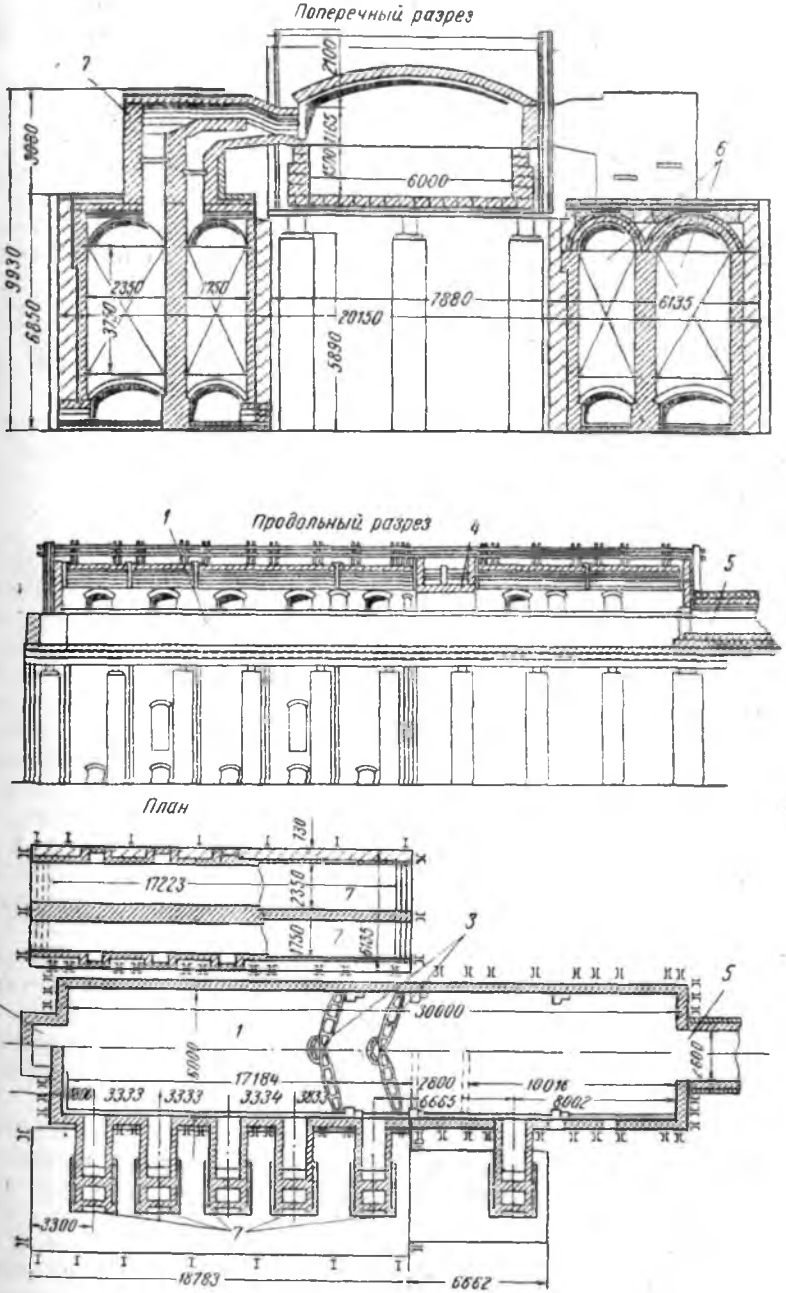


Рис. 150. Ванная печь для варки листового стекла: *1*—ванна; *2*—засыпочное отверстие; *3*—заградительные лодки; *4* — экран; *5* — перешеек; *6*—регенераторы; *7*—горелки.

дах строительного стекла высокой прозрачности глубина ванны составляет 1,2—1,5 *м*. Чем глубже ванна, тем дольше служит дно ее без ремонта.

Как уже упоминалось, в одном торце ванны делают особые устройства для засыпки стекольной шихты—засыпочные карманы. Обычно ванные печи имеют один засыпочный карман, и только большие ванные печи имеют два засыпочных кармана.

Большинство ванных стекловаренных печей отапливается газообразным топливом, преимущественно генераторным газом. Подвод в печь газа и воздуха, а также отвод из печи отходящих дымовых газов, состоящих из продуктов горения и разложения шихты, производятся при помощи нескольких пар горелок, симметрично расположенных вдоль обеих продольных стен бассейна. Большинство печей с поперечным движением пламени имеет от 4 до 7 пар горелок.

Бассейн ванны опирается на колонны, по которым проложены металлические балки, поддерживающие дно печи. Поперечные балки, на которые укладываются шамотные донные брусья, имеют три опоры: среднюю—на прогоне, лежащем на кирпичных столбах, и две крайние—на стенах регенераторов. В больших ванных печах крайние опоры обычно переносят на специальные продольные прогоны, также лежащие на столбах. Благодаря этому регенераторы освобождаются от нагрузки, что позволяет ремонтировать их независимо от ремонта бассейна ванны.

Верхние два ряда стеновых брусьев имеют меньшую толщину, чем нижние. Это объясняется тем, что воздушное охлаждение, применяемое для увеличения срока службы двух верхних рядов брусьев, является эффективным лишь при небольшой толщине их. Это создает также большую постель третьего ряда брусьев, облегчая смену их при горячих ремонтах бассейна.

Свод ванной печи не опирается на ее боковые стены, а лежит на специальных опорах, поддерживаемых кронштейнами, укрепленными на металлических колоннах. Подъем свода составляет обычно около $^1/_8$ ширины его.

Свод ванной печи выдерживает весьма высокие температуры, доходящие в варочной части до 1500°. Поэтому свод, а также стены пламенного пространства печи делают из динаса.

Ввиду того, что через свод отдается большое количество тепла в окружающую среду, то его, как и стены пламенного пространства ванны, покрывают тепловой изоляцией.

Между варочной и выработочной частями свод имеет местное снижение, образующее так называемый э к р а н, предназначенный для создания наиболее благоприятных температурных условий в выработочной части ванны и защиты находящейся здесь стекломассы от излишнего воздействия на нее тепла, выделяющегося в варочной части. Кроме экрана, в печах с общим бассейном варочная часть ванны отделяется от выработочной части при помощи так называемых з а г р а д и т е л ь н ы х ло-

д о к. Изображенные на рис. 150 шамотные заградительные лодки помещаются в ванную печь перед экраном парами и, имея меньший удельный вес, чем жидкая стекломасса, плавают в ней, погружаясь на 300—500 *мм* и выступая над поверхностью на 200—300 *мм*.

Лодки закрепляются одним концом в гнезда, специально сделанные в стенах бассейна. Другим концом они упираются друг в друга, образуя угол, который закрепляется еще шамотным замком, также плавающим в стекломассе. Благодаря этому заградительные лодки всегда сохраняют свое постоянное положение в ванной печи, не перемещаясь в горизонтальном направлении.

Так как удельный вес хорошо проваренной и очищенной стекломассы больше удельного веса стекольной шихты и еще непроваренной стекломассы, то заградительные лодки препятствуют поступлению в выработочную часть ванны непроваренного, плавающего на поверхности стекла, пропуская в нее только вполне проваренное, так сказать глубинное стекло.

В ванных печах с машинным каналом заградительные лодки (обычно одну лодка особой конструкции) устанавливают непосредственно у выхода стекла из ванны в перешеек машинного канала.

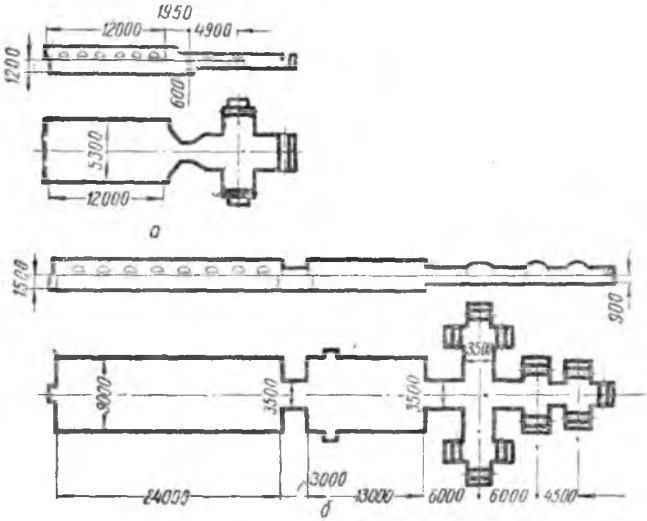


Рис. 151. Схемы ванных печей для листового стекла: *а*—печь с протоком; *б*—печь с пережимом.

Помимо вышеописанной ванной печи для производства листового строительного стекла применяются в а н н ы е п е ч и с п р о т о к о м (рис. 151,*а*) и с п е р е ж и м о м (рис. 151,*б*).

Печь с протоком имеет следующие особенности:

а) варочная и выработочная части печи перекрыты общим сводом, благодаря чему обогрев выработочной части осуществляется за счет тепла от сгорания топлива в варочной части бассейна;

б) у протока, соединяющего обе части печи, устроен экран.

По сравнению с другими типами ванных печей печи с протоком и общим сводом характеризуются наиболее высоким удельным съемом стекломассы с 1 $м^2$ зеркала ванны.

Печь с пережимом имеет суженный переход от варочной части к выработочной. Выработочная часть отделяется от варочной при помощи заградительных лодок и сниженного свода.

Из описанных типов ванных печей для производства строительного листового стекла наибольшее распространение получили печи с общим бассейном.

Достоинствами этих печей являются: достижение высокой гомогенности стекломассы, меньшая сложность конструкции ванны и лучшая доступность ее для обслуживания и ремонтов.

3. РЕГЕНЕРАТОРЫ ВАННЫХ ПЕЧЕЙ

Регенераторы предназначены для нагрева генераторного газа и воздуха с целью достижения в печи высокой температуры горения, необходимой для варки стекла.

Регенераторы представляют собой кирпичные камеры, заполненные насадкой из шамотного кирпича таким образом, чтобы отдельные кирпичи образовывали решетку с промежутками для прохода газов.

Стекловаренные печи, отапливаемые генераторным газом, имеют четыре регенератора: два для подогрева газа (газовые регенераторы) и два для подогрева воздуха (воздушные регенераторы). Печи, отапливаемые природным газом или жидким топливом, имеют только два воздушных регенератора. Устройство газовых и воздушных регенераторов одинаково; отличаются они только размерами. Схема действия регенераторов ванной печи представлена на рис. 152.

В зависимости от направления движения газов регенераторы могут быть горизонтальными и вертикальными. Наиболее распространенными являются вертикальные регенераторы. Они имеют следующие элементы:

а) поднасадочный канал с небольшими сводами, поддерживающими насадку;

б) насадку регенератора;

в) подсводовое пространство над насадкой.

Вертикальные регенераторы ванной печи представлены на рис. 153.

Насадка регенератора выполняется из уложенного на ребро

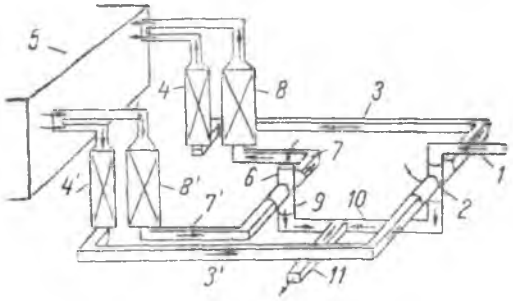


Рис. 152. Схема действия регенераторов ванной печи: *1*—газопровод от газогенераторной станции; *2* — переводной газовый клапан; *3* и *3'*—газопроводы; *4* и *4'*—газовые регенераторы; *5*—ванная печь; *6*—переводной воздушный клапан; *7* и *7'*—воздушные каналы; *8* и *8'*—воздушные регенераторы; *9*, *10* и *11*—дымоходы к дымовой трубе.

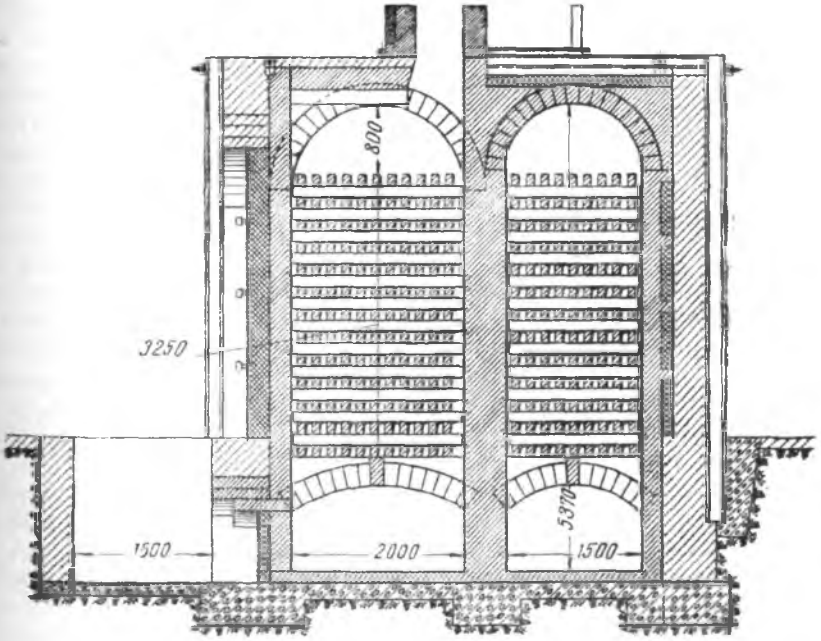


Рис. 153. Регенераторы ванной печи.

стандартного шамотного кирпича (250×125×65 *мм*) или из специального шамотного насадочного кирпича большего размера (400×150×75 *мм* или 500×150×75 *мм*).

Промежутки между кирпичами в насадке составляют от 60 до 100 *мм*.

Отношение объема кирпича к сумме объемов кирпича и промежутков называется степенью заполнения насадки регенератора. При расстоянии между кирпичами в насадке, равном толщине кирпича, т. е. 75 *мм*, степень заполнения равна 0,5 или 50%, а при толщине кирпича 75 *мм* и ширине промежутков 100 *мм* степень заполнения составит: $\frac{75}{75+100}=0{,}43$ или 43%.

Применение для насадки толстого кирпича нецелесообразно, так как вследствие тепловой инерции кирпича температура в середине его не станет изменяться в зависимости от периода работы регенератора, а будет оставаться почти неизменной—такой кирпич не будет участвовать в интенсивном теплообмене.

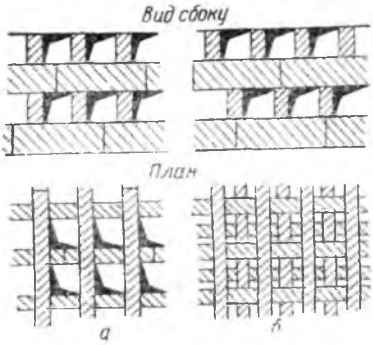


Рис. 154. Типы насадок регенераторов: *а* — колодезная насадка; *б*—шахматная насадка.

Насадка регенераторов может быть выполнена различными способами: сплошными колодцами, в шахматном порядке и др. (рис. 154).

При насадке сплошными колодцами ряды кирпичей как вдоль, так и поперек регенератора расположены один над другим (рис. 154,*а*). Насадка в шахматном порядке (рис. 154,*б*) выкладывается так, чтобы выше лежащие ряды кирпичей располагались над промежутками ниже лежащих рядов. В первом случае насадка оказывает меньшее сопротивление проходу газов и менее подвержена засорению уносимой из печи пылью, чем во втором. При насадке в шахматном порядке значительно увеличивается путь прохождения газов и улучшается теплообмен.

Размеры регенераторов зависят от температуры нагрева газа и воздуха и от производительности ванных печей.

Температура нагрева газа и воздуха в регенераторах должна быть 900—1000°. Температура нагрева только воздуха может быть выше. Температура же поступающих в регенератор дымовых газов должна быть выше необходимой температуры нагрева газа и воздуха на 200—300°. Снижение температуры отходящих дымовых газов при проходе их через насадку регенератора не должно превышать 400°.

По экономическим соображениям большие перепады температур отходящих дымовых газов в регенераторах не допускаются, так как при дальнейшем падении температуры теплообмен между газовым потоком и насадкой замедляется, а размеры регенератора увеличиваются.

Воздушные регенераторы должны иметь несколько больший объем насадки, чем газовые, так как для нагрева воздуха вследствие большего количества его необходимо иметь больше тепла, чем для нагрева газа.

Практически соотношение между объемами насадки в газовых и воздушных регенераторах в зависимости от состава и теплотворности генераторного газа составляет от 1 : 1,2 до 1 : 1,5.

4. ГОРЕЛКИ ВАННЫХ ПЕЧЕЙ

Горелки ванных регенеративных печей служат для подвода в ванну генераторного газа и воздуха, смешения их и отвода из ванны отходящих газов. Горелки соединяют ванну с регенераторами и состоят из горизонтальной части и вертикальной шахты с воздушным и газовым каналами. Перегородка между горизонтальными каналами называется языком горелки.

Горелки ванных печей должны хорошо смешивать газ и воздух и придавать пламени определенное направление в ванне над зеркалом стекла. По конструкции они делятся на: горелки без языка, с языком, угловые и обтекаемые (рис. 155).

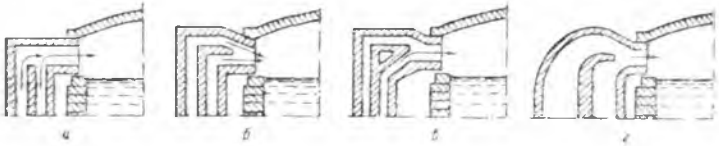


Рис. 155. Типы горелок: *а*—без языка; *б*—с языком; *в*—угловая; *г*—обтекаемая.

Горелка без языка имеет два вертикальных канала, по которым движутся газ и воздух, смешивающиеся между собой в горизонтальной части горелки. Эти горелки в настоящее время почти не применяются, так как в результате интенсивного смешения газа и воздуха и образования пламени в самой горелке огнеупор быстро изнашивается.

В горелке с языком последний устраивается для уменьшения интенсивности смешения газа и воздуха в самой горелке, так как газ и воздух приходят в соприкосновение лишь у конца языка, где смешиваются и воспламеняются. При удлинении языка вертикальную шахту горелок можно относить на большее расстояние

от ванны. Это облегчает ее обслуживание. Горелки с языком применяют в широких ванных печах с поперечным пламенем и в печах с подковообразным пламенем для увеличения длины факела горения.

Угловая горелка устраивается при необходимости интенсивного смешения газа и воздуха до входа их в ванну и одновременного отдаления шахты горелки от ванны. При встрече потоков газа и воздуха под углом происходит интенсивное смешение их. При значительном расстоянии места встречи газа и воздуха от входа газовоздушной струи в ванну может так же, как и в горелках без языка, произойти сильный разгар влетов.

Горелки обтекаемой формы, являющиеся наиболее рациональными, создают меньшее сопротивление при повороте газов из вертикального канала в печь. Они являются и более стойкими в смысле износа огнеупора, чем другие горелки.

Выходящие из горелок газы должны быть направлены под небольшим углом к зеркалу стекла, чтобы пламя удаляло с поверхности стекломассы слой более холодных газов.

При отоплении ванных регенеративных печей жидким топливом горелки подводят в ванну подогретый в регенераторах воздух, частично смешивают его с парами распыленного жидкого топлива и отводят отходящие газы. В этих случаях горелки имеют только один воздушный канал. Жидкое топливо подается в горизонтальную часть горелки, где и распыливается при помощи форсунок высокого давления (см. раздел пятый).

Форсунки низкого давления в стекловаренных печах не применяются.

5. ПЕРЕВОДНЫЕ КЛАПАНЫ

Для периодического изменения направления движения генераторного газа, воздуха и отходящих дымовых газов в регенеративных печах служат переводные клапаны.

Регенеративные печи, работающие с подогревом газа и воздуха, имеют два переводных клапана—для перевода газа и для перевода воздуха; печи, работающие лишь с подогревом воздуха, имеют только один переводной клапан для перевода воздуха.

В стекольной промышленности применяют следующие типы переводных клапанов: 1) с перекидным языком; 2) с перекидным колпаком; 3) барабанные; 4) тарельчатые; 5) шиберные.

К переводным клапанам предъявляются следующие основные требования:

а) наибольшая герметичность как в моменты переводов газа и воздуха, так и в периоды между переводами;

б) небольшое сопротивление проходу газов;

в) легкость управления;

г) доступность отдельных частей клапанов для осмотра[1].

Для изменения направления воздуха применяются клапаны с перекидным языком, барабанные, шиберные и тарельчатые.

Клапан с перекидным языком (рис. 156) состоит из чугунного разъемного корпуса *1*, поставленного на три окна, соеди-

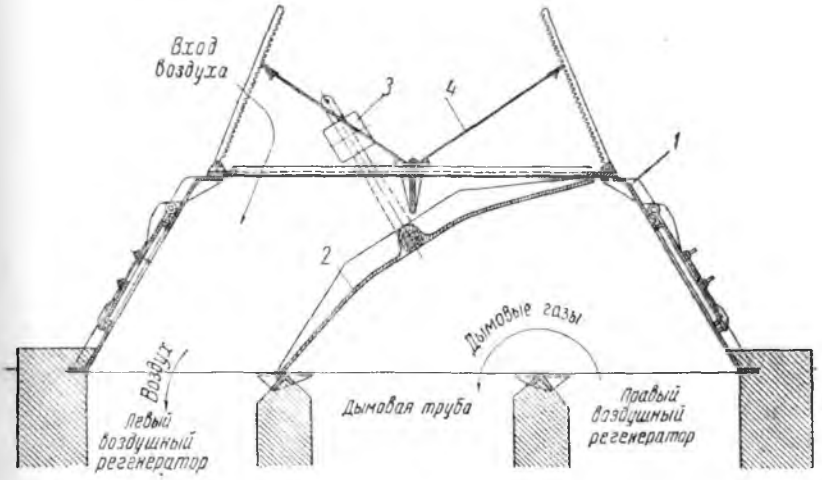


Рис. 156. Клапан с перекидным языком.

няющих клапан с левым и правым регенераторами и дымовой трубой. Внутри корпуса на горизонтальной оси поворачивается чугунный язык *2* при помощи рычага с противовесом *3*. В верхней части корпуса имеется два люка *4*, через которые в клапан снаружи поступает воздух. Количество поступающего воздуха можно регулировать, изменяя степень открытия люков.

При положении перекидного языка, указанном на рис. 156, наружный воздух поступает для подогрева в левый регенератор печи, а дымовые газы направляются в дымовую трубу из правого регенератора печи.

Барабанный трехходовой клапан для перевода воздуха (рис. 157) состоит из чугунной чаши и поворачивающегося вокруг вертикальной оси барабана с перегородкой внутри. В чугунной чаше три отверстия: два отверстия соединены с воздушными регенераторами печи, а третье—с дымовой трубой. Для входа воздуха в клапан служит отверстие в крышке барабана. Внутренняя перегородка (на рисунке не показана) изогнута под

[1] Подробное описание переводных клапанов приведено в книге К. Л. Вейнберга, М. П. Нолькена и др. Оборудование стекольных заводов. Промстройиздат, 1952.

углом 120° для того, чтобы при переводе воздуха она погружалась в желобы кольца и крестовины чаши, создавая водяной затвор.

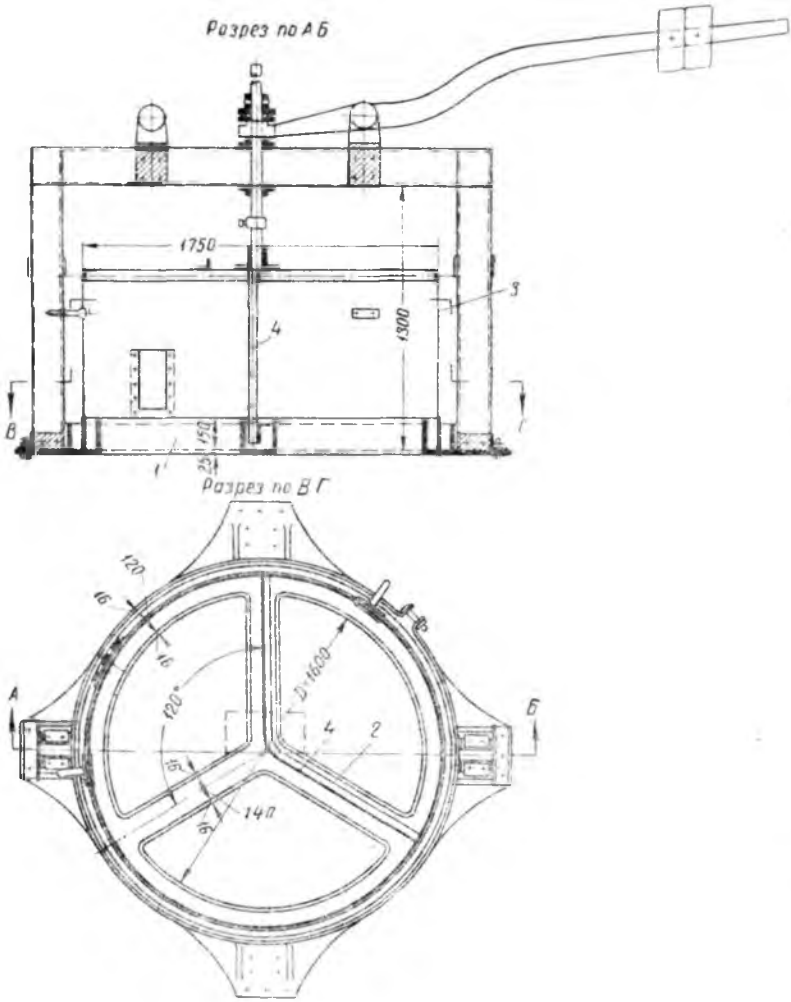


Рис. 157. Барабанный трехходовой клапан: *1*—отверстия; *2*—желоб; *3*—барабан; *4*—перегородка под углом 120°.

Шиберный клапан (рис. 158) применяется для изменения направления воздуха и дыма. Клапан состоит из чугунного шибера и рамы, в которой он движется. Шибер устанавливается наклонно, благодаря чему часть его веса передается на направляющие плоскости рамы, что создает уплотнение. Для этой же

щели поверхности соприкосновения шибера и рамы чисто обрабатываются. Шибер поднимается и опускается при помощи троса.

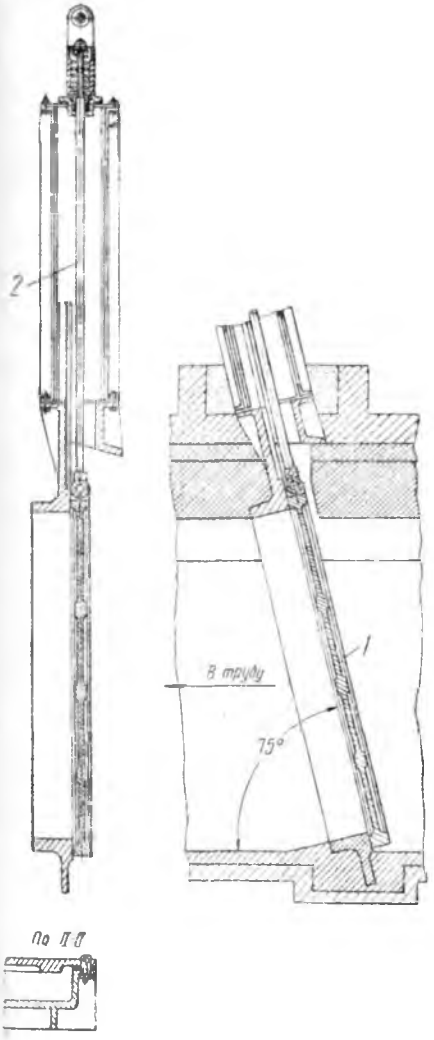


Рис. 158. Шиберный клапан: *1*—шибер; *2*—рама.

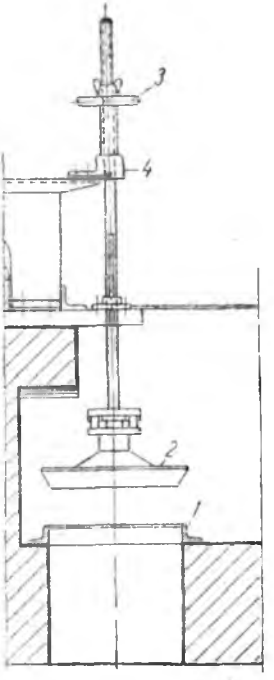


Рис. 159. Тарельчатый клапан: *1*—седло клапана; *2*—клапан; *3*—маховичок; *4*—шток клапана.

Тарельчатый клапан (рис. 159) состоит из седла и поднимающейся на штоке тарелки.

Клапан поднимается и опускается вращением вручную при помощи маховичка на штоке с винтовой резьбой или от электродвигателя.

Для перевода газа служат клапаны с перекидным колпаком, барабанные и тарельчатые клапаны.

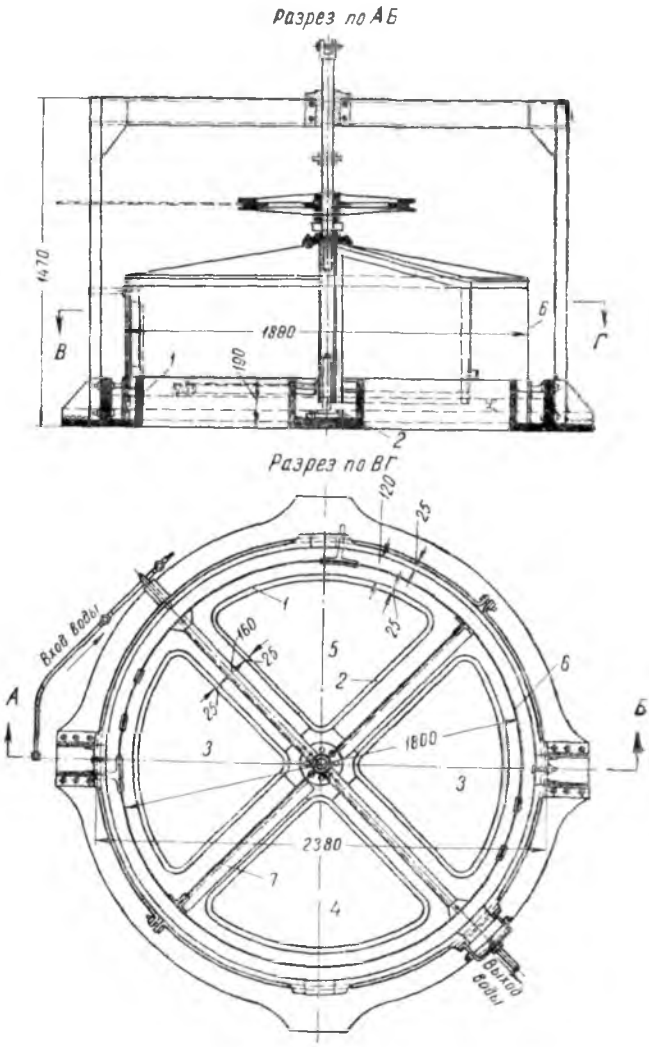


Рис. 160. Барабанный четырехходовой клапан: 1—кольцевой желоб; 2—прямые желобы; 3—окна к регенераторам; 4—окно к газогенераторам; 5—окно к дымовой трубе; 6—барабан; 7—перегородка.

Барабанный четырехходовой клапан для перевода газа (рис. 160) состоит из двух основных частей: чугунного кольца желобчатой формы с чугунной крестовиной, образующих четыре отверстия (каждое в форме сектора) и цилиндрического барабана с перегородкой, проходящей по его диаметру. В крестовину наливают воду и барабан устанавливают так, чтобы нижний край цилиндрической стенки его был погружен в круглый желоб, а поперечная перегородка—в один из диаметральных желобов крестовины. Таким образом барабан с перегородкой образует внизу гидравлический затвор, герметически отделяющий одну половину барабана от другой.

Клапан устанавливают так, чтобы одно из четырех отверстий его соединялось с газопроводом от газогенераторной станции, второе—с дымовой трубой, а два остальных—с газовыми регенераторами печи.

Перегородка барабана расположена так, что каждый газовый регенератор в данный момент соединяется или с газогенераторной станцией или с дымовой трубой.

Для изменения направления движения газов барабан с помощью рычага поднимают настолько, чтобы перегородка его вышла из желоба с водой, поворачивают на 90° и вновь опускают. Благодаря этому перегородка барабана опускается в другой диаметрально расположенный желоб, перпендикулярный к первому. Регенератор, ранее соединенный с дымовой трубой, соединяется с газогенераторной станцией.

Клапан с перекидным колпаком для перевода газа (рис. 161) имеет в чаше три отверстия, из которых правое и левое соединены с регенераторами, а среднее—с дымовой трубой.

Верхнее отверстие в кожухе клапана с перекрывающим его тарельчатым затвором служит для ввода генераторного газа который входит в кожух клапана и затем через открытое отверстие чаши поступает в один из регенераторов.

Герметичность создается погружением нижнего края кожуха *1* и колпака *2* в заполняющую чашу воду, образующую водяной затвор *3*.

При показанном на рис. 161 положении перекидного колпака генераторный газ, входя через верхнее отверстие в клапан, поступает в левое открытое отверстие в чаше и направляется по каналу в левый газовый регенератор. Отходящие дымовые газы из правого регенератора поступают по дымовому каналу в правое отверстие чаши и, пройдя под перекидным колпаком, уходят через среднее отверстие в дымовую трубу.

Для переключения регенераторов при помощи рычага приподнимают перекидной колпак так, чтобы края его вышли из водяного затвора чаши, и переводят в левое положение, при котором соединяются среднее и левое отверстия в чаше.

В этом положении перекидного колпака генераторный газ поступает в правое отверстие чаши и через него в правый регенератор, а отходящие дымовые газы из левого регенератора — через левое и соединенное с ним среднее отверстия чаши — в дымовую трубу.

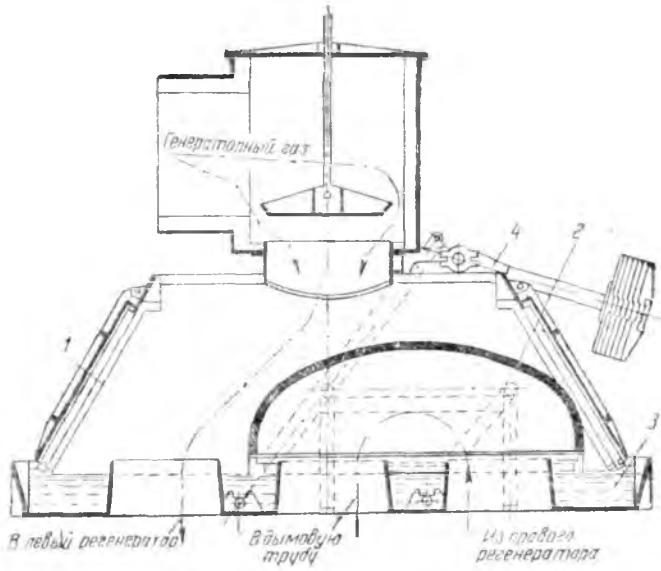


Рис. 161. Клапан с перекидным колпаком: *1*—кожух клапана; *2*—колпак клапана; *3*—водяной затвор; *4*—рычаг с противовесом.

Тарельчатые клапаны для перевода газа ничем не отличаются от таких же клапанов для перевода воздуха.

Дистанционное управление переводными клапанами. Перевод клапанов вручную требует больших физических усилий. Поэтому в настоящее время стали применять дистанционное управление, т. е. управление переводом клапанов на расстоянии при помощи лебедок, соединенных тросами с рычагами переводных клапанов.

Приборы управления выносят на рабочую площадку стекловара, который перекидывает клапаны не сходя с места.

Наиболее удобными для управления являются клапаны, перевод которых производится одним поворотом рычага: тарельчатые, шиберные, с перекидными языком и колоколом. Схема дистанционного управления переводными клапанами представлена на рис. 162. Для пуска электродвигателя лебедки служат кнопочные пускатели. Остановка производится автоматически

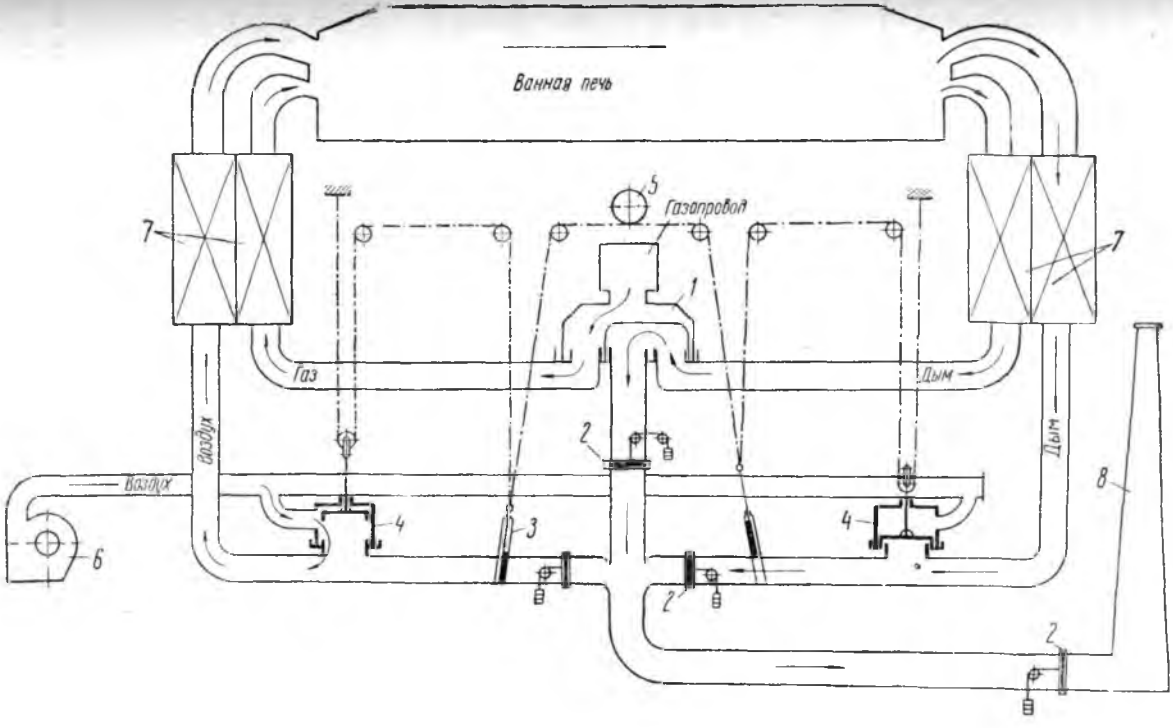


Рис. 162. Схема дистанционного управления переводными клапанами: *1*—клапан с перекидным колпаком для газа; *2*—вспомогательные шиберы; *3*—шиберный клапан для дыма; *4*—тарельчатые клапаны для воздуха; *5*—лебедка для перевода клапанов; *6*—вентилятор для подачи воздуха в печь; *7*—регенераторы; *8*—дымовая труба.

26 Зак. 1058

концевым выключателем при помощи муфт, закрепленных на тросах, соединяющих лебедку с клапанами.

Дистанционное управление переводными клапанами является переходным этапом к автоматическому управлению ими.

6. ТЕПЛОПЕРЕДАЧА В ВАННЫХ ПЕЧАХ

Теплопередача в пламенных стекловаренных печах происходит преимущественно лучеиспусканием. Нагретые до высокой температуры продукты горения передают свое тепло шихте, а также своду и стенам печи.

Некоторое количество тепла теряется кладкой во внешнюю среду, но бо́льшая часть воспринятого кладкой тепла опять же лучеиспусканием передается шихте и стекломассе.

При этом известная часть тепла, излучаемого кладкой, будет поглощаться потоком газов в печи.

Процессы теплообмена в ванной печи зависят в основном от степени черноты газового потока: чем больше степень черноты, тем больше и количество тепла, получаемого самим газовым потоком, тем интенсивнее происходит нагревание шихты в ванне и кладки печи.

Светящееся пламя в ванных печах предпочтительнее несветящемуся.

Передача тепла конвекцией имеет меньшее значение в общем теплообмене в ванной печи.

Стекломасса лишь в известной мере прозрачна и способна пропускать лучистое тепло, поэтому в процессе теплообмена достаточно интенсивно участвуют в основном только поверхностные слои ее. Этим и объясняется эффективность тонкослойной варки стекла.

Количество передаваемого излучением тепла, как известно из закона Стефана—Больцмана, прямо пропорционально абсолютной температуре в четвертой степени. Поэтому интенсивность теплообмена в ванной печи, а следовательно, и интенсивность процессов стекловарения можно увеличить, повышая температуру печи, что в конечном результате приводит к увеличению ее производительности.

7. ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ВАННЫХ ПЕЧЕЙ

Производительность ванной печи зависит от ее конструкции, состава шихты, способа загрузки шихты в ванну, теплового режима и обслуживания печи. Производительность ванной печи характеризуется удельным съемом стекла в *кг* с 1 $м^2$ варочной части ванны в сутки (*кг*/$м^2$ сутки). Удельный съем стекла в ванных печах для выработки листового стекла с общим бассейном в настоящее время достигает 1000 *кг*/$м^2$ сутки.

Для увеличения производительности ванных печей необходимо интенсифицировать процессы стекловарения. Основными факторами интенсификации являются улучшение условий передачи тепла стекломассе и повышение температуры ее варки. Одним из способов увеличения производительности ванных печей является тонкослойная варка стекла, предложенная советскими специалистами. Сущность способа состоит в том, что загрузка шихты в ванную печь производится не в одном месте, а по всей ширине ванны. Благодаря этому воздействию теплового излучения подвергается не куча шихты, а тонкий слой ее с большой поверхностью восприятия тепла. Это приводит к более быстрому нагреву шихты, ускорению всех процессов стекловарения и улучшению использования тепла в печи.

Устройство для тонкослойной загрузки шихты в печь представлено на рис. 163. Шихта подается в загрузочный карман

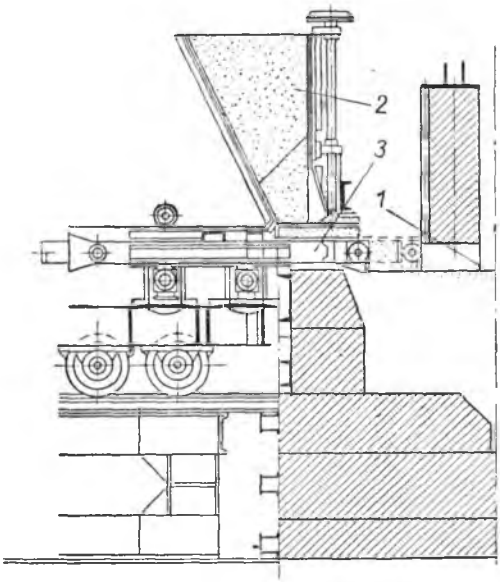


Рис. 163. Тонкослойный загрузчик: *1*—зеркало стекла; *2*—бункер для шихты; *3*—загрузочный стол.

шириной 5 000 *мм* механическим тонкослойным загрузчиком с возвратно-поступательным движением его рабочей части—стола, выполняющего роль загрузочной лопаты. Работа тонкослойного загрузчика состоит в следующем: при движении стола в сторону печи на него поступает шихта из бункеров, заполняя собой всю площадь стола; при движении стола обратно, вследствие сопро-

тивления шихты в бункерах, шихта тонким слоем ссыпается со стола в загрузочный карман на поверхность зеркала стекла.

Тонкослойный загрузчик делает в минуту 2—2,5 возвратно-поступательных хода, проталкивая каждый раз шихту на 200—250 *мм* по длине ванны. Шихта покрывает зеркало стекла слоем 9—12 *см* на протяжении до 3,5 *м*. Благодаря этому варка стекла заканчивается, примерно, через 15 мин. после поступления шихты в печь.

Скорость подачи шихты в ванну печи автоматически регулируется поплавковым уровнемером-регулятором, позволяющим поддерживать поверхность стекломассы в ванне на постоянном уровне.

Повышение температуры также является весьма эффективным средством увеличения производительности ванной печи: при повышении температуры в печном пространстве резко увеличивается количество тепла, воспринимаемое стекломассой, и возрастает производительность печи.

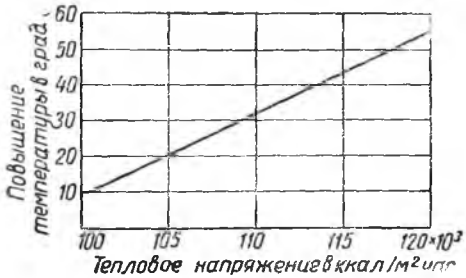


Рис. 164. Зависимость теплового напряжения варочной части ванной печи от температуры.

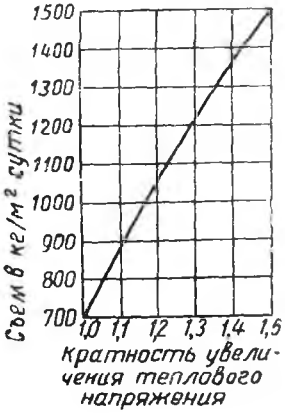


Рис. 165. Зависимость съема стекла от теплового напряжения варочной части ванной печи.

Влияние температуры печного пространства на тепловое напряжение площади варочной части ванны представлено на рис. 164, а увеличение удельного съема стекла в зависимости от относительного увеличения теплового напряжения — на рис. 165.

Повышение температуры варки стекла ускоряет химическое взаимодействие составных частей шихты, облегчает диффузию в силикатном расплаве и способствует осветлению и гомогениза-

ции стекломассы. Температура в ванных печах может быть повышена путем:

а) повышения нагрева газа и воздуха в регенераторах за счет сокращения периода переключения переводных клапанов;

б) устройства рациональных экранов;

в) применения тепловой изоляции.

8. ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ВАННЫХ ПЕЧЕЙ

Ванные стекловаренные печи имеют невысокий коэффициент полезного действия. Количество тепла, непосредственно используемого для процессов стекловарения, составляет в них от 15 до 25% всего тепла, поступающего в печь.

Основными видами тепловых потерь в ванных печах являются потери кладкой печи во внешнюю среду и потери тепла с уходящими дымовыми газами.

На рис. 166 наглядно представлен тепловой баланс ванной печи для варки листового стекла (по данным проф. Д. Б. Гинзбурга). Из рассмотрения его следует, что на варку стекла расходуется только 15,5% тепла; тепло, уносимое дымовыми газами в дымовую трубу, составляет 27,4%, а потери тепла в окружающую среду — 55%.

Количество тепла, возвращаемое в ванну печи за счет работы регенераторов, составляет 58% по отношению к приходу тепла. Как видно из схемы теплового баланса, 31% возвращается за счет нагрева воздуха и 27% — за счет нагрева генераторного газа.

Примечание. В схеме теплового баланса за 100% принято количество тепла, поступающее в ванну в виде теплотворности генераторного газа и теплосодержания шихты. Тепло, возвращаемое в ванну за счет работы регенераторов, как непрерывно циркулирующее в печи, учитывается поэтому сверх 100%.

Так как к. п. д. ванных печей, работающих с большей производительностью, выше, чем к. п. д. ванных печей с меньшей производительностью, то повышение производительности ванных печей приводит, помимо увеличения выработки стекла, также к улучшению теплоиспользования. На рис. 167 приведена зависимость к. п. д. ванной печи и удельного расхода тепла на варку стекла от производительности печи; с увеличением съема стекла с 1 $м^2$ зеркала ванны удельный расход тепла на варку стекла уменьшается, а к. п. д. ванной печи возрастает.

Для сокращения потерь тепла в окружающую среду свод и подвесные стены ванны, горелки и регенераторы покрывают снаружи теплоизоляционными материалами: легковесным шамотом, диатомитовым кирпичом и другими. При тепловой изоляции свода ванной печи потери тепла сводом в окружающую среду со-

кращаются на 45%; при тепловой изоляции горелок потери тепла сокращаются на 50%.

Тепловая изоляция позволяет повысить к. п. д. печей примерно до 22%, сэкономив около 25% топлива, расходуемого на

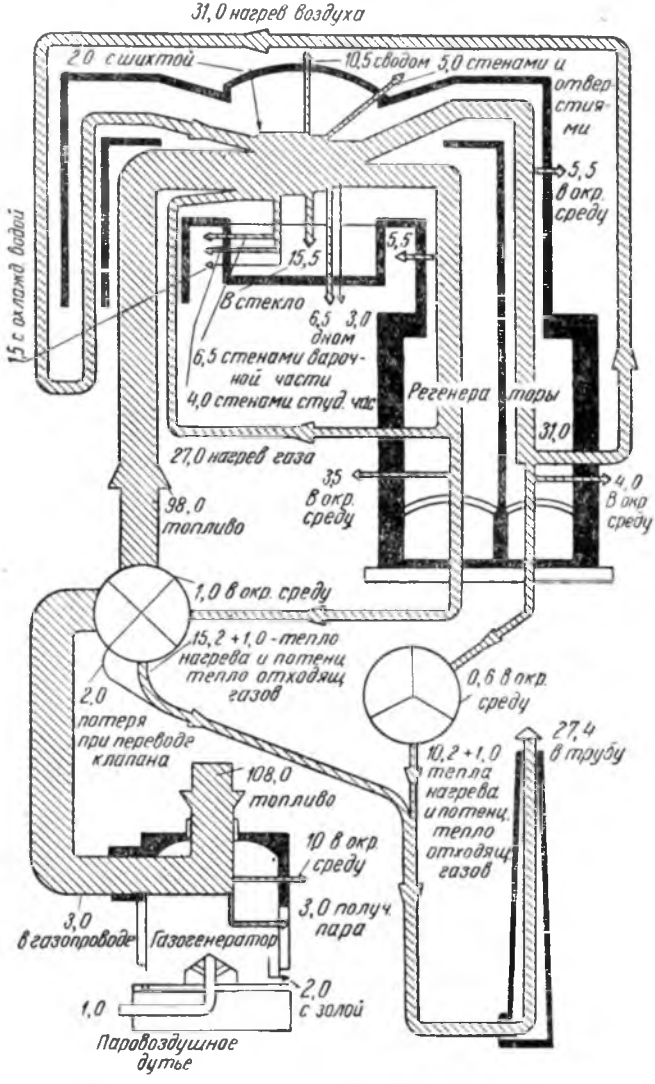


Рис. 166. Тепловой баланс ванной стекловаренной печи.

варку стекла. Вместе с тем применение тепловой изоляции, снижая температуру наружных поверхностей кладки, облегчает условия труда рабочих у печей.

Отходящие в дымовую трубу газы уносят до 30—35% тепла, поступающего в печь. Эти газы необходимо использовать для нагревания котлов-утилизаторов и экономайзеров, а при газификации влажных дров и торфа — для подсушки их перед загрузкой в газогенераторы.

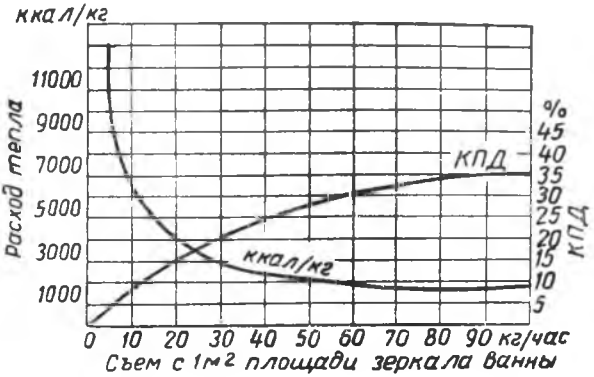


Рис. 167. Зависимость удельного расхода тепла и к. п. д. ванной печи от ее производительности.

9. ПРИМЕР РАСЧЕТА ТЕПЛОВОГО БАЛАНСА ВАННОЙ СТЕКЛОВАРЕННОЙ ПЕЧИ ДЛЯ ВЫРАБОТКИ ЛИСТОВОГО СТЕКЛА

Исходные данные для расчета. Печь должна обслуживать 8 машин для вертикального вытягивания стекла с шириной ленты 1700 *мм* (вместе с бортами). Средняя скорость вытягивания стекла—70 *м/час*. Топливо—генераторный газ. Состав газа в %: CO_2=9,2; CO=19,2; CH_4=2,0; H_2 = 10,0; O_2=0,4; N_2=32,2; H_2O=27,0. Теплотворность газа: $Q_н^р$=1008 *ккал/м³*.

Состав продуктов горения (по предварительному расчету процесса горения) в %: CO_2 = 15,9; H_2O = 21,4; O_2 = 2,1; N_2 = 60,6. Количество продуктов горения—1,92 *м³/м³* газа. Расход воздуха—1,06 *м³/м³* газа (при = 1,2).

Площадь варочной части ванной печи (принятой для данного расчета конструкции)—21,5×6,0=128 *м²*.

Определение производительности ванной печи. Суточная производительность: 0,002 · 1,7 · 2,5 · 70 · 24=114 *т/сутки* (0,002—толщина ленты в *м*; 1,7—ширина ленты в *м*; 2,5—удельный вес стекла).

Секундная производительность: 114000 : (3600 · 24) = 1,32 *кг/сек*.

Удельный съем стекла с 1 *м²* площади варочной части ванны: 114000 : : 128 = 900 *кг/м²* сутки.

Определение расхода топлива. Определение расхода топлива производится по тепловому балансу варочной части ванной печи, отнесенному к секундным количествам тепла. Искомый расход топлива (генераторного газа) обозначим через *x м³/сек*.

Приход тепла

1. Тепло от сгорания генераторного газа 1008 x *ккал*.
2. Тепло, вносимое генераторным газом, нагретым до 950°:

CO_2 — 0,508·0,092 = 0,047 *ккал*

$CO + H_2 + O_2 + N_2$ — 0,331·0,618 = 0,204 *ккал*

CH_4 — 0,671·0,020 = 0,013 *ккал*

H_2O — 0,396·0,270 = 0,080 *ккал*

0,344·950 x = 327 x *ккал*

3. Тепло, вносимое воздухом, нагретым до 1000°:

0,332·1000·1,06 x — 352 x *ккал*

Всего приход тепла[1] . . . 1687 x *ккал*

Расход тепла

1. Расход тепла на варку стекла.

По практическим данным удельный расход тепла на варку стекла из содовой шихты равен 640 *ккал/кг* стекла, а из сульфатной шихты—760 *ккал/кг*.

В данном случае щелочный компонент шихты состоит из 30% соды и 70% сульфата:

$$Q_1 = 640 \cdot 0{,}3 \cdot 1{,}32 + 760 \cdot 0{,}7 \cdot 1{,}32 = 909 \text{ ккал/сек.}$$

2. Потеря тепла излучением во влеты горелок.

Общая площадь влетов всех горелок — 9,3 *м*². Принимаем температуру в печном пространстве варочной части ванны равной 1550°, а температуру внутренних стен горелок — 1400°. Количество тепла, излучаемого во влеты горелок, определяем по формуле:

$$Q = 0{,}9 \frac{4{,}0}{3600} \left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right] \text{ ккал/сек,}$$

где: 0,9 — коэффициент диафрагмирования;
4,0 — коэффициент взаимного излучения газов и стен;
T_1 и T_2 — абсолютные температуры газов и стен.

$$Q_2 = 9{,}3 \cdot 0{,}9 \frac{4{,}0}{3600}\left(110\,450 - 78\,340\right) = 300 \text{ ккал/сек.}$$

3. Потеря тепла на излучение в студочную часть ванны.

Площадь излучения $F_2 = 1{,}6$ *м*². Принимаем температуры $t_1 = 1400°$ и $t_2 = 1200°$.

Применяя ту же формулу, получаем:

$$Q_3 = 1{,}6 \cdot 0{,}9 \frac{4{,}0}{3600}(78\,340 - 47\,080) = 50 \text{ ккал/сек.}$$

4. Потеря тепла с отходящими из ванны газами.

---

[1] Теплосодержанием шихты и стекольного боя пренебрегаем ввиду незначительности этих величин.

Средняя теплоемкость газов при 1550°:

$$CO_2 — 0,563 \cdot 0,159 = 0,090 \text{ ккал}$$
$$H_2O — 0,442 \cdot 0,214 = 0,095 \text{ ккал}$$
$$O_2 + N_2 — 0,351 \cdot 0,627 = 0,220 \text{ ккал}$$

Всего . . . . 0,405 *ккал/м³ град.*

$$Q_4 = 0,405 \cdot 1550 \cdot 1,92\,x = 1160\,x$$

5. Потери тепла кладкой варочной части печи во внешнюю среду, подсчитанные при известных значениях внутренних температур и термических сопротивлениях ограждений $\frac{\delta}{\lambda}$, приведенные в табл. 43, составляют 312 *ккал/сек.*

Таблица 43

Потери тепла отдельными элементами ванной печи

Наименование теплоотдающих поверхностей	Материал кладки печи	Толщина кладки в *м*	Температура внутренней поверхности кладки в град.	Коэффициент теплопроводности материала в *ккал/мчас град*	Термическое сопротивление ограждений в *ккал/м² час град*	Удельная потеря тепла в *ккал/м² сек*	Поверхность теплоотдачи в *м²*	Общая потеря тепла в *ккал/сек*
Свод варочной части	Динас	0,320	1500	1,5	1,20	0,320	136	43,5
	Шамот легковесный	0,125		0,4				
	Диатом легковесный	0,125		1,18				
Дно варочной части	Шамот	0,3	1175	0,99	0,3	0,912	127,0	116,0
Продольные стены ванны на уровне стекла . . .	Шамот	0,4	1350	1,03	0,4	0,804	38,0	31,0
То же	Муллит	0,3	1400	5,5	0,1	3,160	25,6	81,0
Продольные стены ванны выше уровня стекла . . .	Динас	0,5	1500	1,16	0,43	0,808	24,3	20,0
Торцовая стена выше уровня стекла . . .	Шамот	0,4	1300	1,0	0,4	0,773	9,0	7,0
Торцовая стена выше уровня стекла . . .	Динас	0,63	1350	1,1	0,6	0,532	2,1	1,0
Торцовая стена над экраном	Динас	0,5	1350	1,1	0,45	0,725	10,2	5,5
Торцовая стена над уровнем стекла . . .	Динас	0,5	1350	1,1	0,45	0,725	7,3	43,5
Всего		—	—	—	—	—	—	312,0

6. Неучтенные потери тепла определяем ориентировочно в 5% от всего прихода тепла, т. е. равными

$0,05 \cdot 1687x$	$84x$
Всего расход тепла	$1571 + 1244x$ *ккал*

Уравнение теплового баланса

Приход		Расход
$1687x$	=	$1571 + 1244x$

Решая уравнение теплового баланса, получаем

$$x = 3,55 \text{ м}^3/\text{сек}.$$

Часовой расход генераторного газа на варку стекла:

$$3,55 \cdot 3600 = 12\,750 \text{ нм}^3/\text{час}.$$

Удельный расход условного топлива на варку стекла с учетом к. п. д. газогенератора и потерь тепла в газопроводах и переводном клапане:

$$\frac{1008 \cdot 3,55}{1,32 \cdot 7000 \cdot 0,7} = 0,55 \text{ кг/кг}$$

(0,7—к. п. д. газогенератора; 1,32—выход газа в $м^3/кг$).

Тепловое напряжение зеркала стекла в варочной части ванной печи:

$$\frac{1008 \cdot 12\,600}{128} = 10\,000 \text{ ккал/м}^2\text{час}.$$

Тепловой баланс варочной части ванной печи

№ статей	Статьи теплового баланса	Количество тепла	
		ккал/сек	%
	Приход тепла		
1	Тепло от сгорания генераторного газа: 1008·3,55	3578	59,7
2	Тепло, вносимое нагретым генераторным газом: 327·3,55	1161	19,4
3	Тепло, вносимое нагретым воздухом: 352·3,55	1250	20,9
	Всего приход тепла .	5989	100,0
	Расход тепла		
1	Расход тепла на варку стекла . . .	909	15,2
2	Потеря тепла излучением во влеты горелок	300	5,0
3	Потеря тепла излучением в студочную часть	50	0,8
4	Потеря тепла с отходящими из ванны газами: 1160·3,55	4120	68,8
5	Потеря тепла кладкой во внешнюю среду	312	5,2
6	Неучтенные потери тепла: 84·3,55 .	208	5,0
	Всего расход тепла .	5989	100,0

Глава II

ПРОЧИЕ ПЕЧИ СТЕКОЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

1. МАШИННЫЕ КАНАЛЫ

При выработке листового стекла по способу вертикального вытягивания для подачи стекломассы из ванны печи к машинам служит машинный канал. Ванная стекловаренная печь соединяется с машинным каналом перешейком. Стекломасса, поступающая по каналу к машинам, должна обладать определенной вязкостью, ввиду чего машинный канал обогревается.

По длине канал делится на камеры, которые в зависимости от назначения называются подмашинными и подогревательными. Первые камеры, как показывает само название, расположены под машинами, которые вытягивают из них ленты стекла. Подогревательные камеры, расположенные между подмашинными, служат для подогрева стекломассы.

Стекломасса приносит с собой из печи большое количество тепла. Но так как необходимая для вытягивания стекла температура сравнительно невысока (1000—1100°), то для отопления машинного канала достаточно подогревать только воздух, что и осуществляется в воздушных регенераторах.

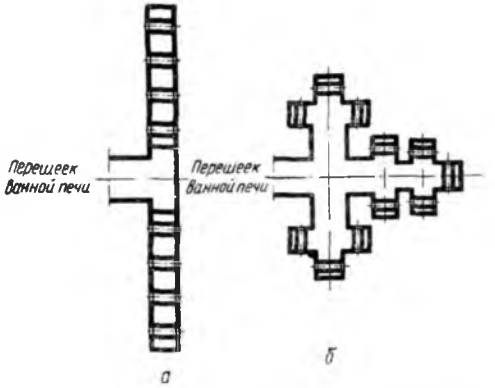


Рис. 168. Схемы расположения машинных каналов: *а* — с параллельным расположением машин; *б*—с крестообразным расположением машин.

Две наиболее распространенные схемы расположения машинных каналов приведены на рис. 168.

В теплотехническом отношении устройство машинного канала с непосредственным питанием каждой машины вертикально-

го вытягивания стекла (сокращенно—ВВС) стекломассой эффективнее, чем последовательное расположение машин: в первом случае расход тепла на обогрев машинного канала в 2—4 раза меньше, чем во втором.

Крестообразное расположение машинного канала рациональнее и технологически, так как при этом стекломасса непосредственно из печи поступает к машинам, не проходя под другими машинами, не загрязняясь и не охлаждаясь столь значительно, как при последовательном расположении машин. Это обеспечивает получение листового стекла более высокого качества.

2. ГОРШКОВЫЕ СТЕКЛОВАРЕННЫЕ ПЕЧИ

Горшковые стекловаренные печи получили свое название от шамотных сосудов—горшков, в которых производится варка стекла. Горшковые печи могут быть печами периодического и непрерывного действия, но самый процесс стекловарения в горшковых печах, в отличие от ванных печей, всегда осуществляется только периодически. Шихта засыпается в горшки, в которых последовательно протекают все стадии процесса стекловарения: варка, дегазация и студка. Готовую стекломассу вырабатывают из горшков либо вручную, причем горшки остаются в печи, либо путем выливания жидкого стекла из горшков, для чего их вынимают из печи. После выработки стекломассы из горшков в них вновь загружают шихту и весь цикл стекловарения повторяется в том же порядке.

Горшковые печи — более старый тип стекловаренных печей, чем ванные печи. В настоящее время они применяются преимущественно для варки технических стекол.

Горшковые печи менее экономичны, чем ванные. Они характеризуются большим удельным расходом топлива на варку стекла и меньшей производительностью. Но в горшках можно лучше проваривать шихту и достигать большей однородности стекломассы, чем в ванных печах. А это очень важно при производстве специальных стекол.

В промышленности строительных материалов горшковые печи применяют только при производстве зеркального стекла литым способом.

Горшковая печь для производства такого стекла изображена на рис. 169.

Рабочая камера печи состоит из: 1) пода, на котором установлены шесть стекловаренных горшков; 2) боковых стенок («окружки»), обычно наклоненных внутрь печи, с окнами для вставки и выемки горшков; 3) свода.

Горшки имеют круглую или овальную форму. Выемка горшков со стеклом и установка их обратно производятся специаль-

ным механизмом с клещами. В последнее время для ускорения варки применяют перемешивание стекломассы в горшках особыми механическими мешалками.

Генераторный газ и воздух, нагретые в регенераторах, поступают в рабочую камеру печи через горелку, расположенную в одном из торцов печи. Продукты горения, пройдя вдоль печи,

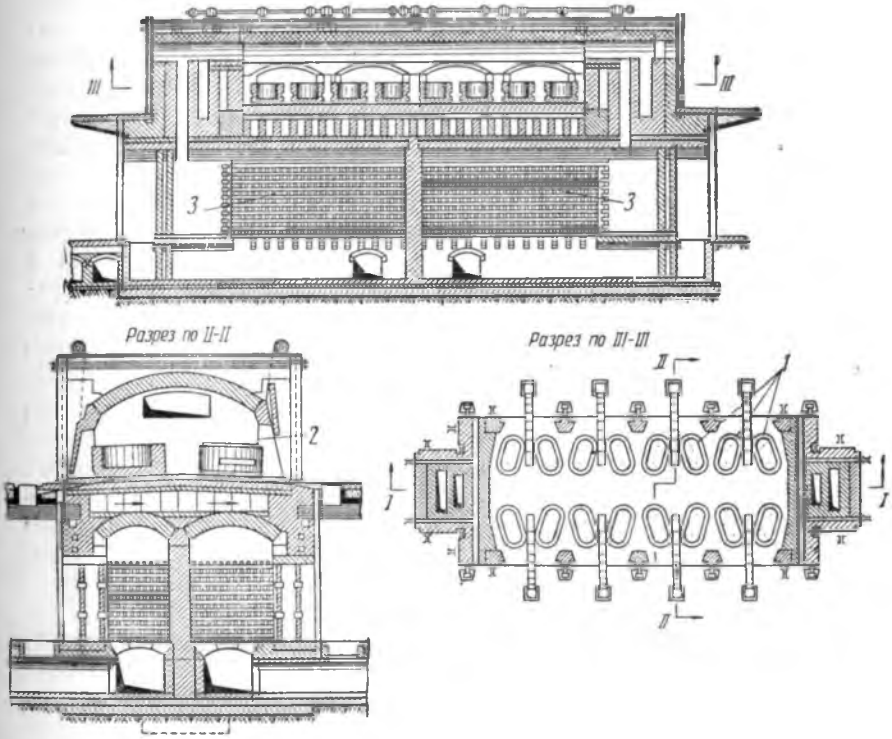


Рис. 169. Горшковая печь для варки стекла: *1* — стекловаренные горшки; *2*—рабочие окна печи; *3*—регенераторы.

удаляются через противоположную горелку. Направление пламени изменяется так же, как и в ванных регенеративных печах, переключением переводных клапанов. Горшки с содержащейся в них стекломассой обогреваются сверху, поэтому такие печи называются печами с верхним пламенем.

Существуют и другие типы горшковых печей, но на заводах строительного стекла они не применяются[1].

---

[1] Подробно о горшковых стекловаренных печах см. книгу Д. Б. Гинзбург. Стекловаренные печи. Гизлегпром, 1948.

3. ОТЖИГАТЕЛЬНЫЕ ПЕЧИ

Стекло, как и все прочие физические тела, расширяется при нагревании и сжимается при охлаждении. Но так как теплопроводность стекла невелика, то остывание его снаружи происходит быстрее, чем внутри.

Поэтому наружные слои сильнее стремятся к сокращению объема, а внутренние, остывающие медленнее, препятствуют сжатию. Вследствие этого при быстром охлаждении стекло затвердевает с некоторыми внутренними напряжениями, тем большими, чем толще стекло и чем быстрее происходило охлаждение его при выработке. Такое стекло непрочно и при малейшем ударе, толчке или царапине, а иногда и без внешнего воздействия, трескается и разрушается. Во избежание этого стекольные изделия после выработки подвергаются отжигу — медленному охлаждению до температуры воздуха. Благодаря этому происходит равномерное сокращение объема во всей массе стекла и устраняются вредные внутренние напряжения. Чем толще стекольные изделия, чем больше объем их и сложнее форма, тем тщательнее должен быть отжиг. Режим отжига зависит также от состава стекла.

При некоторых способах выработки стекла, например, при производстве листового стекла по способу вертикального вытягивания, медленное охлаждение стекольной ленты происходит непосредственно в процессе ее вытягивания из стекломассы, и отдельного отжига не требуется. В других случаях необходим специальный отжиг стекла в особых печах, называемых отжигательными (рис. 170).

Процесс отжига можно осуществлять двумя способами:

1) стекло вводится в отжигательную печь в холодном состоянии, подвергается в ней сперва медленному нагреванию до температуры отжига, а затем вновь охлаждается с заданной скоростью снижения температуры;

2) стекло вводится в отжигательную печь уже нагретым до температуры отжига и подвергается только медленному охлаждению.

Верхняя температура отжига в большинстве случаев составляет 500—600°, а нижняя температура отжига равняется обычно температуре воздуха в помещении цеха, т. е. примерно 20°.

В настоящее время в стекольной промышленности применяют для отжига:

а) тянульные рукава (тягуны);

б) леры.

Тянульные рукава напоминают туннельные печи для обжига керамических изделий, рассмотренные в восьмом разделе. Длина тягуна зависит от продолжительности отжига стекла, составляя в большинстве случаев от 12 до 20 *м*. Продвижение отжигаемого

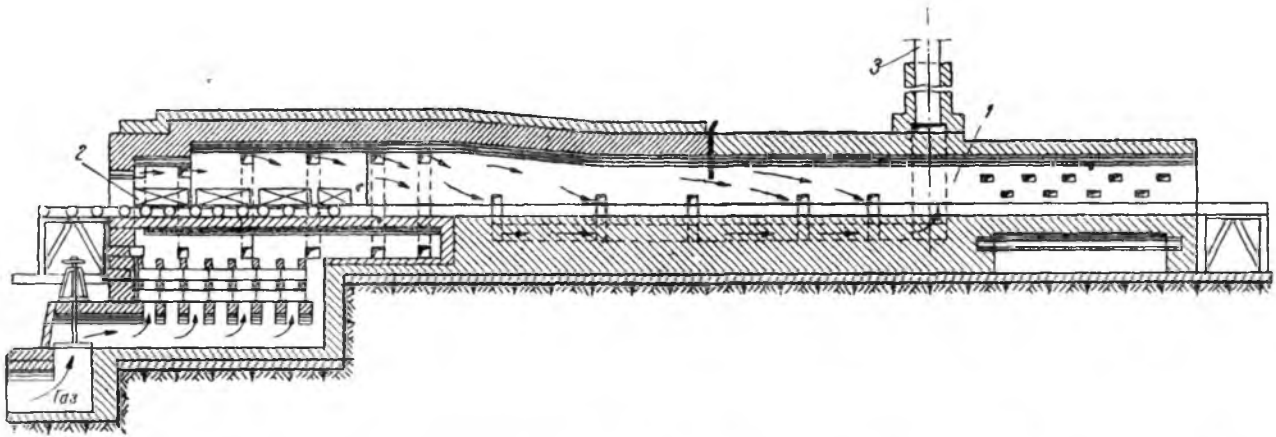


Рис. 170. Отжигательная печь: *1*—отжигательный канал; *2*—вагонетки с отжигаемыми изделиями; *3*—дымовая труба для отвода газов.

стекла вдоль печи производится на движущихся по рельсам вагонетках, образующих сплошной поезд.

В зависимости от температурного режима отжига по длине тягуна различают следующие пять зон: а) подогрев вагонеток; б) загрузка изделий; в) отжиг; г) медленное охлаждение; д) быстрое охлаждение.

Тягуны отапливаются горячими газами. Продукты горения входят в первую зону печи и нагревают стекло. Постепенное снижение температуры отжигаемых изделий обеспечивается продвижением вагонеток с определенной скоростью вдоль тянульного рукава, а также за счет параллельного движения отходящих дымовых газов, которые отводятся обычно с противоположного конца печи.

Тягуны применяют в настоящее время только на небольших стекольных заводах.

Леры представляют собой механизированные муфельные печи для отжига стекла. В лерах нагретые продукты горения не соприкасаются с отжигаемыми изделиями. Стенки муфеля для лучшей передачи тепла делают из очень теплопроводного материала, например, из карбофракса.

Отжигаемые изделия перемещаются вдоль печи на особом пластинчатом транспортере в виде ленты, движущейся с определенной скоростью, соответствующей скорости снижения температуры, обычно от 0,07 до 0,1 *м/мин*.

Для сохранения тепла все конструкции тягунов и леров должны иметь хорошую тепловую изоляцию.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОВТОРЕНИЯ К ДЕСЯТОМУ РАЗДЕЛУ

1. Какие типы печей являются основными в стекольном производстве?
2. Какие виды топлива применяют для сжигания в печах стекольного производства?
3. Опишите виденные вами на производственной практике стекловаренные печи.
4. Расскажите про устройство и работу регенеративной системы ванных печей.
5. Изложите преимущества шахматной насадки регенераторов.
6. В чем преимущества шиберных переводных клапанов перед другими типами их?
7. Какие типы горелок вам известны?
8. Какие достоинства имеют горелки обтекаемой формы?
9. Для чего служат заградительные лодки в ванных печах?
10. Какими способами передается тепло от газового потока к стекломассе в ванной стекловаренной печи?
11. В каких единицах измеряют съем стекломассы в ванных печах и чему он численно равен?
12. Для чего применяют воздушное обдувание наружных поверхностей ванных печей?
13. Какие части ванных печей подвергаются тепловой изоляции?

14. Назовите значения температур в различных частях ванной стекловаренной регенеративной печи.

15. Чему равен к. п. д. ванной стекловаренной регенеративной печи?

16. Назовите основные мероприятия по улучшению топливоиспользования в ванных стекловаренных печах.

17. Какие типы машинных каналов применяются на стекольных заводах СССР?

18. Каким образом соблюдается определенный температурный режим в отжигательных печах?

---

27 Зак. 1058

РАЗДЕЛ ОДИННАДЦАТЫЙ

УСТАНОВКИ ДЛЯ ПРОПАРИВАНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Общие сведения о пропаривании (тепловодяной обработке) строительных изделий

В производстве ряда строительных изделий, изготовляемых с применением вяжущих веществ, например, силикатного кирпича, бетонных и железобетонных деталей и других, для придания им прочности, долговечности и прочих свойств применяют прогрев их во влажной среде. Пропаривание (тепловодяная обработка) изделий производится насыщенным водяным паром, при относительно низкой температуре — 60 — 200° *. Тепловодяная среда способствует ускорению и полноте происходящих в материале реакций, в результате которых изделия приобретают нужные технические свойства. Например, при производстве силикатного кирпича под действием насыщенного пара, в результате взаимодействия кремнезема песка и извести по уравнению $SiO_2 + Ca(OH)_2 = CaO \cdot SiO_2 \cdot H_2O$ происходит ускоренное образование в водной среде гидросиликата кальция, и изделия из силикатной массы приобретают значительную прочность и другие качества.

Температура насыщенного водяного пара и количество тепла, содержащееся в нем, как известно, связаны с его давлением. В зависимости от величины давления пара, применяемого для тепловодяной обработки, различают пропаривание при атмосферном давлении и пропаривание при повышенном давлении. Соответственно и устройства для пропаривания делятся на две группы: а) пропарочные камеры, где пар имеет атмосферное давление, и б) пропарочные котлы-автоклавы, в которых давление водяного пара больше атмосферного и составляет обычно 8—10 *ати*.

---

* До прохождения данного раздела следует повторить свойства насыщенного водяного пара по курсу общей теплотехники, например, по учебному пособию А. М. Воронова — Теоретические основы теплотехники. Госэнергоиздат, 1952.

Глава I

ПРОПАРОЧНЫЕ КАМЕРЫ

Обработка насыщенным водяным паром при атмосферном давлении преимущественно распространена в производстве бетонных, шлакобетонных и железобетонных изделий.

Для пропаривания этих видов изделий применяют режим пропаривания с сокращенным периодом подачи пара в камеры, как наиболее экономный.

Каждый цикл пропаривания изделий при таком режиме состоит из следующих периодов:

а) подъем температуры в камере путем впуска в нее пара;

б) выдерживание изделий при заданной температуре пропаривания с подачей пара в камеру;

в) выдерживание изделий в герметически закрытой камере без впуска в нее пара при снижении температуры не более 2—3° в час до 60—65°, так как пропаривание при температуре ниже 60° неэффективно;

г) охлаждение изделий после пропаривания до температуры окружающего воздуха (может происходить как в камере, так и вне ее — в помещении цеха).

Пропарочные камеры делятся на камеры периодического и непрерывного действия.

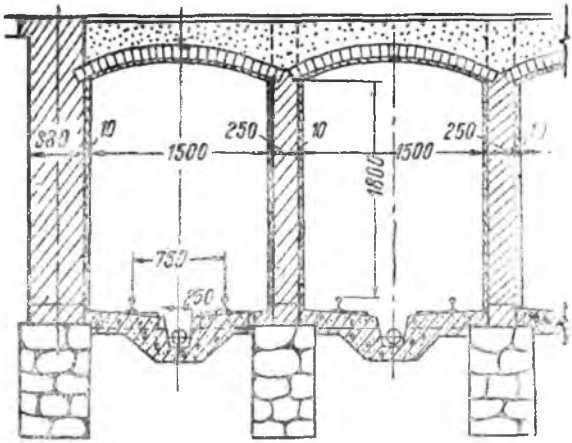


Рис. 171. Пропарочные камеры периодического действия (поперечный разрез).

Камеры периодического действия по устройству напоминают камерные сушилки, представляя собой коридоры различной длины и ширины в зависимости от размеров пропариваемых изделий (рис. 171). При пропаривании небольших изделий в сте-

нах камер делают выступы для полок, загружаемых изделиями вручную или при помощи сбрасывающей тележки.

Пропариваемые изделия помещаются на этажерках или подаются в камеры на вагонетках по узкоколейному рельсовому пути, проложенному на полу камеры.

Камеры объединяются в блоки с односторонней или двусторонней разгрузкой по типу камерных или туннельных сушилок, с устройством вдоль дверей камер путей для подачи вагонеток в отдельные камеры.

В камерах имеются паропроводы для впуска в них пара. В полу камеры устраиваются лотки для отвода конденсата. Потолок камер делают с небольшим уклоном к одной стене для облегчения стока конденсата. Чтобы пар не проникал в помещение цеха, двери камер должны плотно затворяться. Для удаления излишнего пара по окончании процесса пропаривания в потолке камер предусматриваются вентиляционные устройства. В дверях камер устанавливают термометры.

Пропарочные камеры непрерывного действия применяются главным образом для тепловодяной обработки крупных железобетонных изделий при массовом изготовлении их. Они представляют собой туннели, часто многоэтажные, вдоль которых на вагонетках или роликах перемещаются пропариваемые изделия.

В зависимости от температурно-влажностных условий процесса пропаривания, камеры по длине делятся на отдельные зоны: а) зону предварительного подогрева, б) зону изотермического прогрева, в) зону охлаждения.

На рис. 172 приведен схематический разрез трехъярусной пропарочной камеры непрерывного действия, которая используется на заводах железобетонных деталей.

Перемещение пропариваемых изделий вдоль камеры происходит в формах-вагонетках *1* по рельсовым путям.

Для создания в отдельных зонах камеры соответствующих температурно-влажностных условий камера оборудована водоподогревателем *2*, воздухоподогревателями *3*, вентиляторами для перемещения воздуха между отдельными зонами *4* и насосом для перекачивания горячей воды *5*.

В зоне подогрева изделия нагреваются от 10—15°, примерно, до 50° за счет тепла горячего воздуха, нагнетаемого в конце и отсасываемого в начале зоны. Теплообмен в этой зоне между воздухом и изделиями происходит по принципу противотока.

Режим пропаривания в изотермической зоне заключается в выдерживании изделий в условиях постоянной температуры, примерно, при 50—80°. Прогрев изделий в этой зоне происходит при помощи расположенных в каждом ярусе труб, по которым циркулирует нагретая в водоподогревателе до 90° горячая вода.

В зоне охлаждения подача холодного воздуха осуществляет-

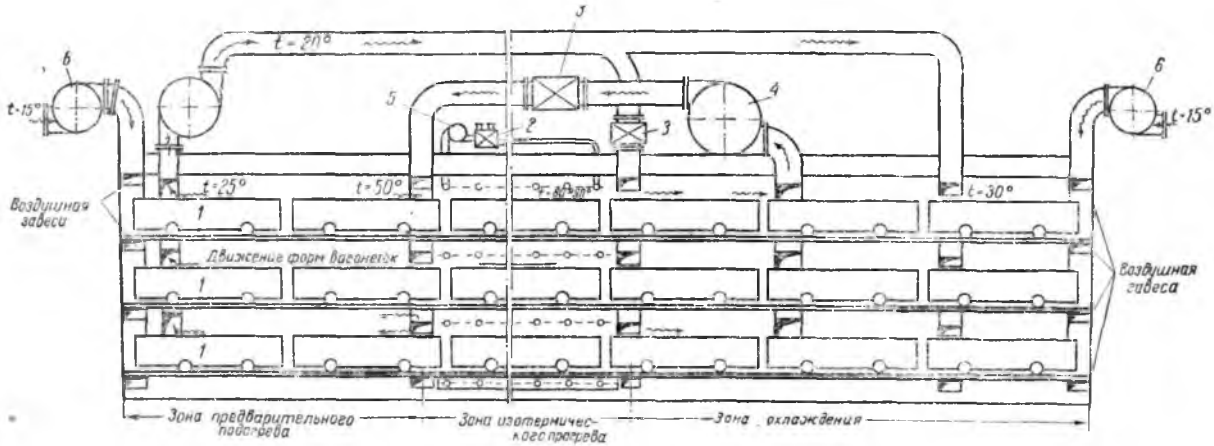


Рис. 172. Пропарочная камера непрерывного действия (схематический продольный разрез).

ся в конце зоны, а отсос отработанного воздуха — в середине ее. Температура изделий снижается в этой зоне до 25—30°.

Для предотвращения засоса в камеру холодного воздуха при входе в камеру и при выходе из нее вентиляторами *6* создаются воздушные завесы.

Глава II

ПРОПАРОЧНЫЕ КОТЛЫ (АВТОКЛАВЫ)

Тепловодяная обработка паром с давлением больше атмосферного широко применяется в производстве силикатного кирпича и некоторых других изделий, называемых автоклавными строительными материалами.

Процесс пропаривания в этом случае производится в пропарочных котлах-автоклавах.

1. УСТРОЙСТВО ПРОПАРОЧНЫХ КОТЛОВ (АВТОКЛАВОВ)

В промышленности в настоящее время применяются автоклавы двух типов: а) автоклавы с крышками, укрепляемыми вручную с помощью большого числа (обычно 48) болтов, расположенных по окружности крышки, и б) автоклавы с быстросъемными крышками, присоединяемыми к корпусу автоклава с помощью особого запорного устройства.

Операции по закреплению и открыванию крышек, укрепляемых болтами, очень трудоемки и требуют много времени на закрепление и открепление откидных болтов.

Более совершенным типом автоклавов являются автоклавы с быстросъемными крышками, позволяющими открывать и закрывать крышки быстро и без большой затраты физического труда.

На рис. 173 приведен автоклав нового типа с быстросъемной крышкой.

Автоклав представляет собой стальной цилиндрический котел *1* с двумя крышками (днищами) по торцам. Передняя крышка *2* делается съемной, задняя—глухой. Для снятия съемной крышки автоклава служит подъемное приспособление *3*. Для закрывания и открывания крышки служит поворотный механизм *4*. Внутри автоклава проложен рельсовый путь для вагонеток с пропариваемыми изделиями *5*; через глухое днище проходит труба для впуска пара *6*. Выпуск конденсата производится через штуцер *7*.

Автоклав располагается на опорах *8*, позволяющих ему удлиняться при нагревании. Для выпуска пара из автоклава слу-

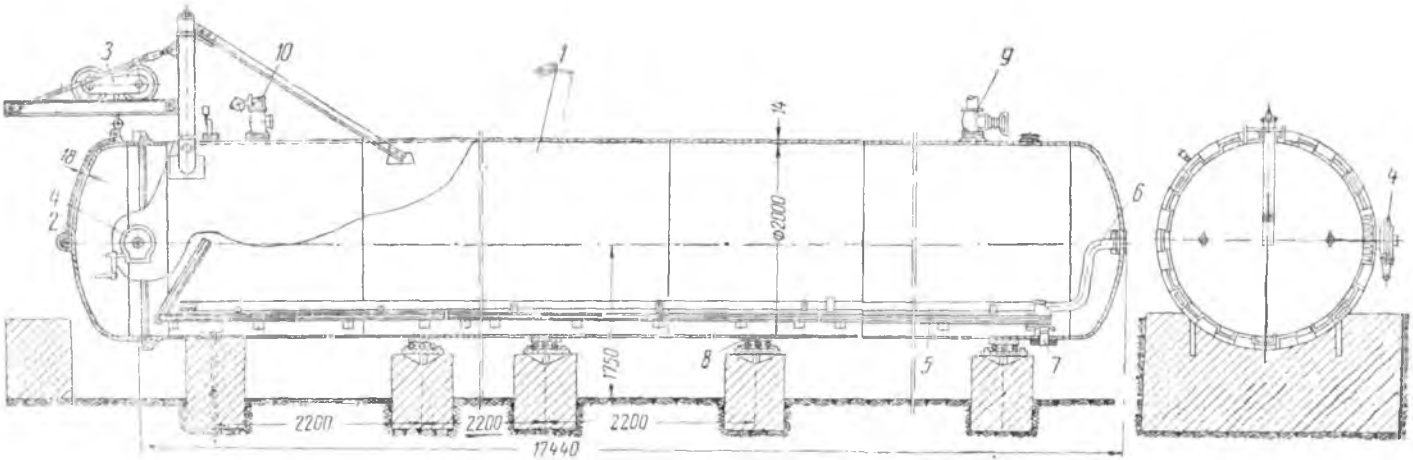


Рис. 173. Автоклав с быстросъемной крышкой

жит паровой вентиль *9*. Для предотвращения взрыва автоклав имеет предохранительный клапан *10*.

К переднему торцу автоклава прикрепляется кольцо, которое имеет выступы и вырезы. Такие же вырезы и выступы имеются по краям крышки, которая подвешена на консольной балке. Для закрывания автоклава крышка с выступами вводится в вырезы кольца и с помощью поворотного механизма поворачивается так, что выступы крышки входят в вырезы кольца и закрепляются.

В целях уменьшения потерь тепла автоклавом во внешнюю среду цилиндрическую поверхность автоклава и глухое днище покрывают тепловой изоляцией.

Процесс пропаривания на большинстве заводов силикатного кирпича происходит под давлением 8 *ати* в течение 6—8 час., не считая времени для впуска и выпуска пара.

Впуск пара длится 1,5—2 часа, так как при более быстром впуске возможно разрушение сырых сформованных изделий, которые вначале процесса пропаривания обладают небольшой прочностью. Выпуск может происходить быстрее. В среднем период выпуска пара длится 1—1,5 часа.

Производительность автоклава зависит от длительности отдельных операций, составляющих полный цикл его работы. Сюда входят: а) загрузка, б) закрепление крышки, в) подъем давления до 8 *ати*, г) выдержка под давлением в 8 *ати*, д) выпуск пара, е) открывание крышки, ж) выгрузка кирпича.

2. ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА АВТОКЛАВОВ

Расход пара на пропаривание изделий состоит из следующих основных затрат тепла:

1) прогрев пропариваемых изделий;

2) прогрев автоклава, вагонеток и форм, находящихся в автоклаве;

3) возмещение потерь тепла во внешнюю среду.

По окончании процесса пропаривания пар может выпускаться в атмосферу или же перепускаться в другой автоклав со свежезагруженными изделиями для их подогрева. В последнем случае, при работе с перепуском, достигается значительная экономия пара, так как первоначальный подъем температуры во втором автоклаве происходит за счет тепла отработанного пара из первого автоклава. Эта экономия достигает 23% от общего расхода пара и поэтому работа с перепуском пара широко применяется на заводах силикатного кирпича.

Фактический расход пара на пропаривание 1000 штук силикатного кирпича составляет около 500 *кг* пара при работе на выхлоп и около 400 *кг* при работе с перепуском.

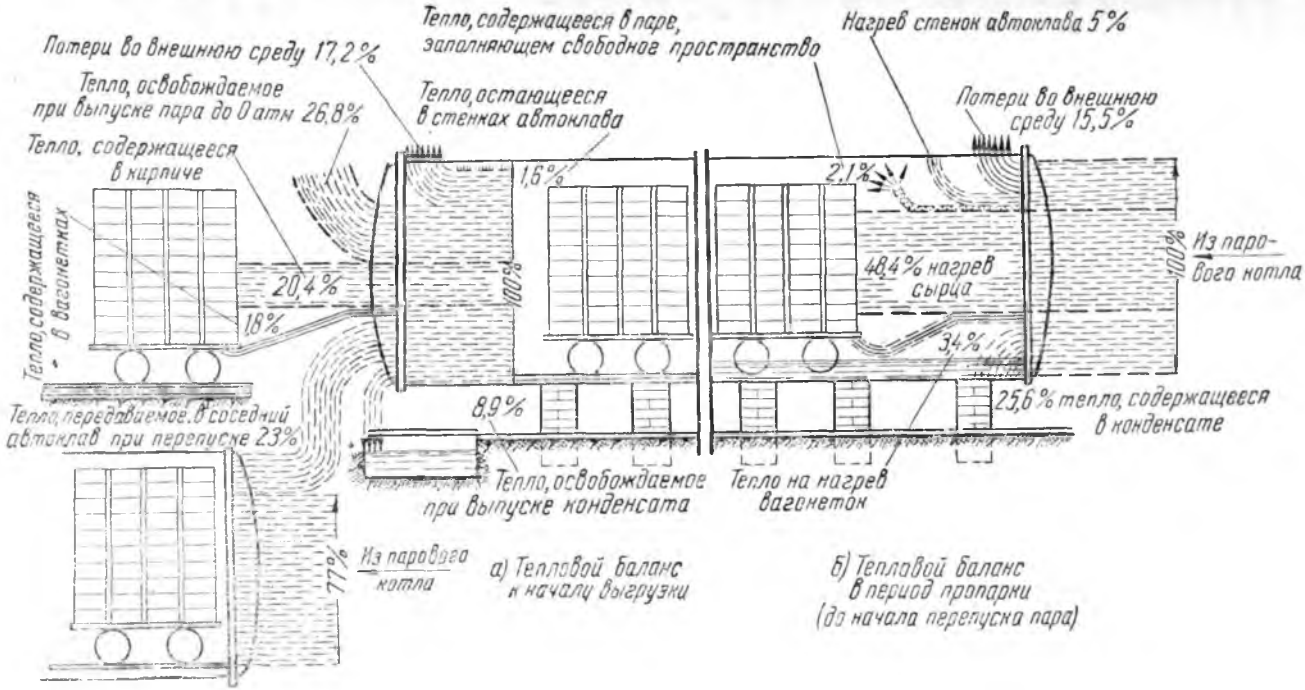


Рис. 174. Тепловой баланс автоклава при пропаривании силикатного кирпича.

Тепловой баланс автоклава для силикатного кирпича по испытаниям проф. А. В. Волженского приведен на рис. 174[1].

Из приведенного баланса видно, что на нагрев кирпича расходуется около 48% всего тепла. Для уменьшения общего расхода пара следует улучшать тепловую изоляцию котла, по возможности повышать температуру сырца, поступающего в автоклав, использовав для увлажнения и гашения известково-песчаной массы получающийся конденсат, не выпускать в атмосферу часть пара, остающегося в автоклаве после перепуска, а использовать ее на отопление и подогрев воды для питания паровых котлов.

Проведение этих мероприятий может значительно повысить общий к. п. д. автоклава и снизить удельный расход пара.

3. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАБОТЕ АВТОКЛАВОВ

Устройство и работа автоклавов как аппаратов, находящихся под давлением, должны отвечать тем же требованиям, которые предъявляются к паровым котлам. Автоклавы должны иметь манометры для измерения давления пара и предохранительные клапаны от взрывов (рис. 175). Контргруз клапана уравновешен на соответствующее давление (при пропаривании силикатного кирпича обычно 10 *ати*).

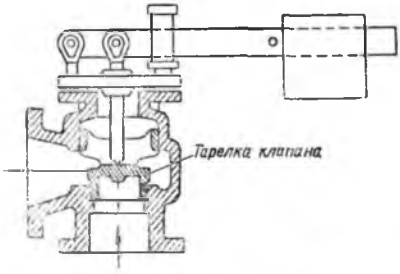


Рис. 175. Предохранительный клапан от взрыва пара.

При подъеме давления в котле выше предусмотренного клапан открывается и пар выходит наружу.

Кроме установки предохранительных клапанов, регулирование давления пара в автоклавах может производиться автоматически при помощи регуляторов давления пара в паровых котлах, из которых пар поступает в автоклавы. При достижении в автоклаве давления, близкого к предельному, электрический манометр включает цепь электромагнита, который управляет клапанами паровых котлов. Клапаны подачи пара в котельной закрываются и доступ пара в автоклавы прекращается.

---

[1] А. Волженский. Водотермическая обработка строительных материалов в автоклавах. Тепловой баланс автоклава для запаривания силикатного кирпича. Изд. Академии архитектуры СССР, 1944.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОВТОРЕНИЯ К ОДИННАДЦАТОМУ РАЗДЕЛУ

1 Для чего пропаривают строительные изделия?

2. Какое значение имеет давление водяного пара при пропаривании изделий?

3. В чем особенность режима пропаривания в камерах с сокращенным периодом подачи пара?

4. Для чего производится перепуск пара при работе автоклавов?

5. Почему нельзя быстро впускать пар в автоклав?

6. Какие меры по технике безопасности должны приниматься при работе автоклавов?

РАЗДЕЛ ДВЕНАДЦАТЫЙ

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ И АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫМИ ПРОЦЕССАМИ

Общие сведения о типах контрольно-измерительных приборов

Теплотехнический контроль служит для установления и соблюдения заданных режимов тепловой обработки в целях получения продукции определенного качества, а также для увеличения производительности сушилок и печей и снижения удельного расхода топлива.

Теплотехнический контроль осуществляют при помощи контрольно-измерительных приборов, которые по своему назначению делятся на следующие группы:

а) приборы для измерения температуры—пироскопы, термометры и пирометры;

б) приборы для измерения давления и разрежения—манометры, тягомеры и напоромеры, а для измерения атмосферного давления—барометры;

в) приборы для определения состава горючих и дымовых газов—газоанализаторы;

г) приборы для определения влажности воздуха и других газов—гигрометры и психрометры;

д) приборы для определения количества топлива и других веществ—весы и расходомеры.

Контрольно-измерительные приборы бывают показывающие, самопишущие и суммирующие.

Показывающие приборы указывают величину какого-либо параметра только в данный момент. При пользовании показывающими приборами приходится периодически записывать показания приборов в журнал наблюдений.

Самопишущие приборы отличаются от показывающих тем, что они при помощи самопишущего механизма автоматически непрерывно записывают измеряемые параметры—температуру, давление и т. д. Самопишущие приборы—более совершенные, так как автоматическая запись показаний дает более полное представление о ходе тепловых процессов во времени и исключает неточности и ошибки в отсчетах.

К суммирующим приборам относятся весы и расходомеры (приборы для измерения количества газа или жидкости), а также счетчики числа оборотов вращающихся частей механизмов.

По способу применения приборы делятся на стационарные и переносные. Современная организация теплового контроля основана в большинстве случаев на передаче показаний приборов на расстояние. Благодаря этому можно сосредоточить в одном месте показания ряда приборов, контролирующих работу нескольких тепловых установок—печей, сушилок, газогенераторов, и иметь представление об изменении различных параметров в их взаимосвязи. Получая полную картину хода тепловых процессов, обслуживающий персонал имеет возможность своевременно устранять отклонения от заданного режима работы.

Так как электричество является наиболее удобным средством передачи показаний на расстояние, то приборы, основанные на использовании электричества, имеют преобладающее значение среди всех остальных типов теплотехнических приборов.

Глава I

ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

При производстве различных строительных материалов приходится измерять температуры до 1800°, для чего применяют приборы разнообразных конструкций, схема классификации которых приведена в табл. 44.

Таблица 44

Схема классификации приборов для измерения температуры[1]

Пироскопы	Термометры	Пирометры	
		электрические	оптические
Керамические	Ртутные	Термоэлектрические	Частичного излучения (фотометрические)
	Манометрические	Сопротивления	Полного излучения (радиационные)

[1] Термометрами называют обычно приборы, применяемые для определения температуры до 500°, а пирометрами—свыше 500°. Однако различие это условное. Например, пирометры сопротивления называют часто термометрами сопротивления.

1. КЕРАМИЧЕСКИЕ ПИРОСКОПЫ

Керамические пироскопы, обозначаемые сокращенно ПК, представляют собой трехгранные пирамидки высотой около 6 *см*, изготовленные из особых силикатных масс. Керамические пироскопы различают по номерам—каждому номеру соответствует определенная температура плавления, зависящая от состава массы, из которой изготовлен пироскоп. Температурой плавления пироскопа считается температура, при которой пироскоп, деформируясь, своей вершиной коснется подставки. Номер пироскопа соответствует температуре его плавления, деленной на 10.

Пироскопы применяют для приближенного определения температуры в печах для обжига керамических изделий. При помощи пироскопов измеряют температуры от 600 до 2000°.

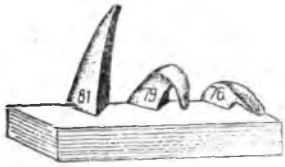


Рис. 176. Керамические пироскопы для измерения температуры.

Способ применения пироскопов: три пироскопа с последовательными номерами, примерно отвечающими предполагаемой температуре, которую необходимо измерить, помещают на подставке из огнеупорной глины в печь.

Судя по деформации пироскопов, приведенных на рис. 176, температура в печи в данном случае отвечает температуре плавления ПК № 79, т. е. 790°. ПК № 81 имеет более высокую, а ПК № 76 более низкую температуру плавления, чем температура в печи.

2. ТЕРМОМЕТРЫ РАСШИРЕНИЯ

Ртутные термометры—простейшие и вместе с тем наиболее распространенные приборы для измерения температур. Принцип их действия, основанный на расширении ртути при нагревании, общеизвестен.

Область температур, измеряемых ртутными термометрами, ограничивается температурой замерзания (—38°) и температурой кипения (+357°) ртути.

Особые конструкции ртутных термометров допускают замер температур до +500°. В этих термометрах температуру кипения ртути повышают, заполняя капилляр над ртутью каким-либо инертным газом под давлением, например, азотом.

Для предохранения от поломки технические ртутные термометры заключают в металлическую оправу разнообразной формы и размеров: изогнутую под углом 90°, с удлиненной хвостовой частью и др.

Манометрические термометры (рис. 177) состоят из термопатрона—стального узкого сосудика для ртути и полой спи-

ральной пружины. Один конец спиральной пружины соединен с механизмом, указывающим температуру на шкале прибора, другой соединен при помощи гибкой капиллярной трубки с термопатроном. Вся система заполнена ртутью или другой расширяющейся при нагревании жидкостью с высокой температурой кипения, например, ксилолом.

Для измерения температуры термопатрон помещают в контролируемую среду. При этом жидкость расширяется и, нажимая на конец спиральной пружины, заставляет ее перемещать стрелку механизма, показывающего или записывающего измеряемую температуру.

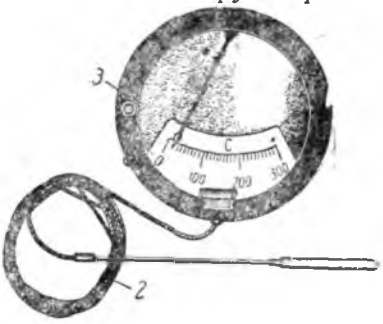


Рис. 177. Манометрический показывающий термометр: *1*—термопатрон; *2*—соединительный капилляр; *3*—показывающий прибор.

Существуют также манометрические термометры, в которых расширяющейся средой является газ или пар какой-либо жидкости с низкой температурой кипения. Наполнителем для газовых термометров служит обычно азот, а для паровых—хлорметил. Манометрические термометры просты, точны, надежны и позволяют производить отсчет температуры на расстоянии до 50 *м* и более от места ее замера. Они применяются для измерения температуры паровоздушного дутья в газогенераторах, воздуха в сушилках, а также в других случаях.

3. ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПИРОМЕТРЫ

К наиболее распространенным приборам для измерения высоких температур относятся термоэлектрические пирометры, состоящие из термопары и гальванометра.

Действие термопар основано на возникновении термоэлектродвижущей силы (сокращенно т. э. д. с.) при нагревании спая двух разнородных металлов в замкнутом контуре (рис. 178).

Величина т. э. д. с. зависит от разности температур между горячим и холодным спаем.

При включении в этот контур гальванометра (рис. 179) стрелка его отойдет от нулевого положения, причем угол отклонения стрелки будет тем больше, чем больше разность температур между горячим $t_г$ и холодным $t_х$ спаями.

Величина т. э. д. с. зависит также от свойств металлов, из которых сделана термопара. К материалам, применяемым для изготовления термопар, предъявляются следующие требования:

1) т. э. д. с., возникающая при нагревании спая этих материалов, должна быть значительной;

2) величина т. э. д. с. должна возрастать в прямой зависимости от температуры;

3) свойства металлов, составляющих термопару, не должны изменяться при высоких температурах;

4) металлы должны быть недорогими и недефицитными.

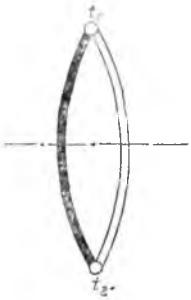


Рис. 178. Принцип действия термопары.

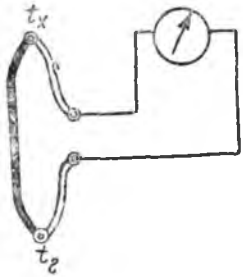


Рис. 179. Схема термоэлектрического пирометра.

Наиболее распространенными термопарами в настоящее время являются: термопары из платины и ее сплава с родием для измерения температур до 1600°; хромель-алюмелевые, в которых одним электродом служит хромель, а другим—алюмель, для измерения температур не выше 1100°; хромель-копелевые, в которых электроды представляют собой сплавы хромель и копель, для измерения температур до 800°, и другие, обладающие достаточной т. э. д. с.

Алюмель—сплав, состоящий в основном из никеля и алюминия; хромель—из никеля и хрома; копель—из никеля и меди. Чистый никель неприменим, так как вследствие перекристаллизации при 700—800° он становится очень хрупким.

При выборе термопар необходимо помнить, что термопары, изготовленные из разных металлов, при одной и той же температуре обладают различной величиной т. э. д. с. Поэтому надо выбирать такие термопары, которые давали бы при данных температурах наибольшую величину т. э. д. с. Это обеспечивает большую точность измерений.

На рис. 180 представлены кривые зависимости т. э. д. с. от температуры, из которых видно, например, что для измерения температуры в пределах 600—800° целесообразно применять хромель-копелевую термопару, обладающую наибольшей т. э. д. с. в этих температурных пределах. Для увеличения т. э. д. с. при измерении невысоких температур (до 100°) часто соединяют

несколько термопар последовательно (рис. 181). При этом общая т. э. д. с. будет равна сумме т. э. д. с., образуемых отдельными термопарами, что увеличит точность замера.

В зависимости от назначения, места замера, среды и других условий, при которых производится измерение температур, тер-

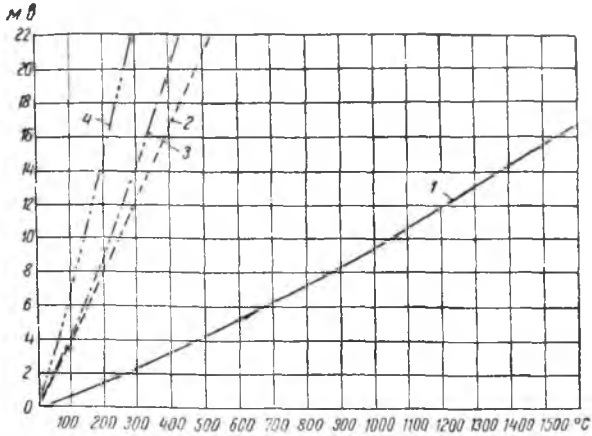


Рис. 180. Изменение величины т. э. д. с. термопар в зависимости от температуры: *1*—платина—платинородий; *2*—хромель—алюмель; *3*—медь — константан; *4*—хромель—копель.

мопары изготовляют различной длины (до 2 *м*) и заключают в ту или иную оболочку. Термопары заключают также в цельные фарфоровые трубки и металлические чехлы, предохраняющие их от поломки.

Для измерения величины т. э. д. с., развиваемой термопарами, к ним присоединяют гальванометры. При подборе гальванометров следует учитывать, что гальванометры с градусной шкалой могут работать только с термопарами из тех металлов, с которыми они градуированы, т. е. гальванометр, градуированный с железо-константановой термопарой, нельзя применять при работе с хромель-алюмелевой и т. д. Если же гальванометр имеет, кроме градусной, также милливольтовую шкалу, то его можно применять при работе и с другими термопарами, пользуясь соответствующими переводными коэффициентами.

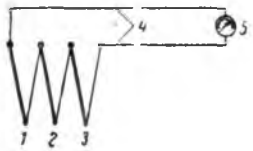


Рис. 181. Схема последовательного соединения термопар: 1, 2, 3 — термопары; *4* — соединительные провода; *5* — гальванометр.

Гальванометры присоединяют к термопарам (рис. 182) при помощи соединительных компенсационных проводов.

4. ТЕРМОМЕТРЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Действие термометров сопротивления основано на изменении сопротивления проводников прохождению электрического тока в зависимости от температуры. При повышении температуры проводника сопротивление увеличивается, и насборот.

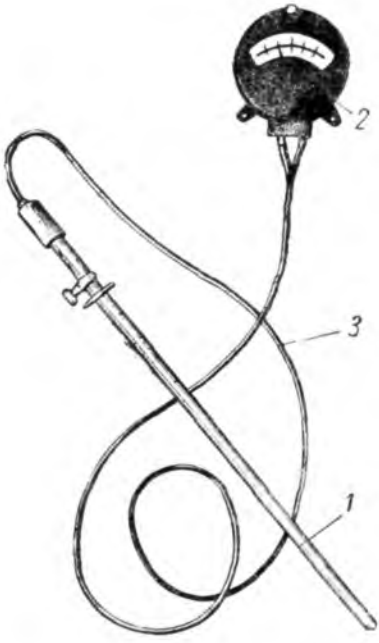


Рис. 182. Термопара с гальванометром: *1*—термопара; *2*—гальванометр; *3*—соединительные провода.

В табл. 45 приведено отношение R/R_0, т. е. отношение сопротивления металлов при различных температурах к сопротивлению при 0°, принятому за единицу.

Материалы для термометров сопротивления должны отвечать следующим условиям:

а) физические и химические свойства проводника должны быть постоянными и неизменными в пределах измеряемых температур;

б) изменение сопротивления проводника в зависимости от температуры должно быть возможно большим;

в) сопротивление проводника должно возрастать пропорционально температуре.

Достоинства термометров сопротивления: точность и возможность передачи показаний на расстояние.

Таблица 45

Изменение R/R_0 с повышением температуры

Материал	Температура в град.				
	+100	+200	+300	+400	+500
Платина . .	1,3920	1,7724	2,1414	2,4884	2,844
Медь . . .	1,4313	1,8657	2,3075	2,7598	3,225
Никель . .	1,5210	2,1777	3,0423	4,0822	4,526
Железо . .	1,6572	2,4726	3,4897	4,6526	6,041

Изменение сопротивления проводника учитывается измерительным устройством, связанным с термометром (или с несколькими термометрами) проводами и питающимся от низковольтного источника электрического тока.

Установка термометра сопротивления, таким образом, состоит из:

1) одного или нескольких термометров сопротивления;

2) измерительного устройства в виде мостика с гальванометром;

3) соединительных проводов;

4) источника электрического тока.

Активной частью термометра сопротивления является слюдяной или фарфоровый стержень, имеющий обмотку из какого-либо проводника электрического тока, выполненную в виде проволоки диаметром 0,2—0,3 *мм*. Схема установки термометра сопротивления приведена на рис. 183.

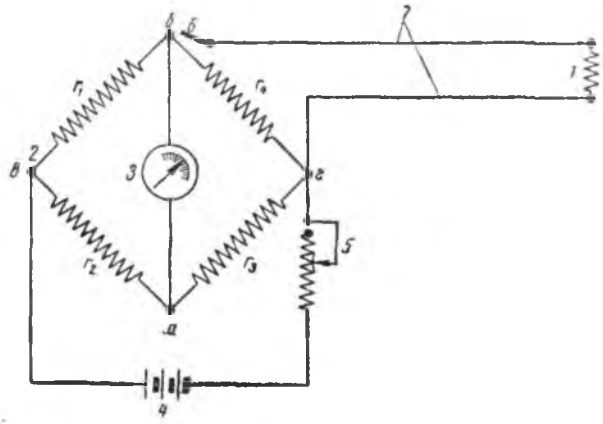


Рис. 183. Схема установки термометра сопротивления: *1*—термометр сопротивления; *2*—неравновесный мостик; *3*—гальванометр; *4*—источник тока; *5*—реостат; *6*—переключатель; *7*—провода.

Термометры сопротивления имеют платиновую или медную обмотку. Платиновая обмотка устойчива при работе в окислительной атмосфере, медная — в восстановительной. Термометры сопротивления с платиновой обмоткой применяют для измерения температуры до 500°, с медной —до 100°.

5. ОПТИЧЕСКИЕ ПИРОМЕТРЫ

Для измерения в печах и топках температур выше 1000° применяют оптические пирометры частичного и полного излучения.

Оптические пирометры частичного излучения называются так потому, что ими измеряют излучение не всех лучей спектра, а только части его. Их называют также фотометрическими, так

как действие их основано на измерении силы света раскаленных тел по окраске.

Из физики известно, что многие материалы при высоких температурах светятся, причем тем ярче, чем выше их температура.

Устройство оптических пирометров частичного излучения основано на возможности сравнивать степень окраски тела, температура которого известна, с окраской тела, температура которого измеряется. Обычно телом с заранее известной температурой является нить, накаливаемая электрическим током. Наблюдая степень окраски нити на фоне тела, температуру которого надо измерить, можно иметь три случая:

а) нить вырисовывается темным контуром на более светлом фоне;

б) нить видна яркой светлой линией на более темном фоне;

в) окраска нити сливается с фоном.

В первом случае имеет место более высокая температура тела по сравнению с известной температурой нити, во втором случае — менее высокая, чем температура нити и, наконец, в последнем случае измеряемая температура и температура нити одинаковы (рис. 184).

Рис. 184. Степень накала нити в оптическом пирометре частичного излучения: слева—температура нити меньше температуры тела; в центре—температура нити больше температуры тела; справа—температура нити и тела одинаковы.

Оптические пирометры применяются для измерения температур, примерно, с 600—700°, т. е. с начала вишнево-красного свечения раскаленных тел, и до 2000°, когда тела имеют ослепительно белый цвет.

Оптический пирометр частичного излучения (рис. 185) состоит из трех частей: телескопа, источника электрического тока и гальванометра. Объектив телескопа наводят на материал, температура которого измеряется, и путем регулирования накала нити в лампочке при помощи реостата, помещенного в ручке

прибора, подгоняют степень окраски нити к окраске раскаленного материала.

Источником тока служат обычно сухие элементы. Отсчет температуры производится по шкале гальванометра. Между окуляром и глазом наблюдателя помещен световой фильтр, чтобы

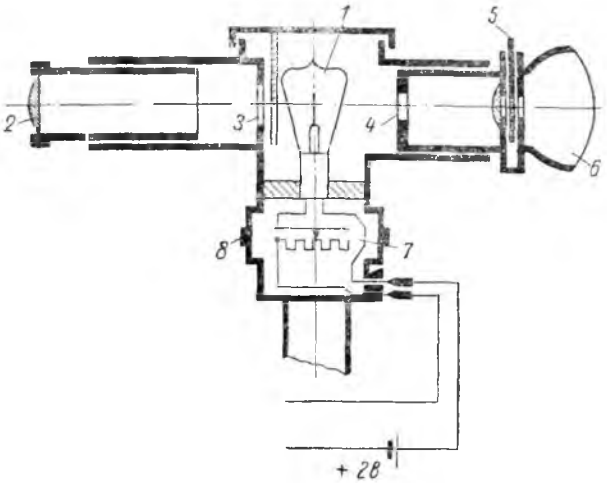


Рис. 185. Схема оптического пирометра частичного излучения: *1* — лампочка накаливания; *2* — объектив; *3* и *4* — диафрагмы; *5*—светофильтр; *6*—окуляр; *7*—реостат; *8*—ручка реостата.

глаз воспринимал световые волны только с одной длиной от обоих светящихся тел (нить и наблюдаемый материал). Поэтому такие пирометры и называются пирометрами частичного излучения.

Применение световых фильтров обеспечивает бо́льшую точность измерения температуры и, кроме того, предохраняет глаз наблюдателя от ослепляющего действия яркого света. В оптических пирометрах предусмотрены два светофильтра: красный, применяемый для измерения температуры до 1400°, и дымчатый—до 2000°.

Такие пирометры служат для периодических замеров температуры в качестве переносных приборов. На рис. 186 приведен внешний вид одной из последних отечественных конструкций оптического пирометра частичного излучения ОППИР. Все части пирометра помещены в одном корпусе, что очень удобно для переноски.

Оптические пирометры полного излучения. На рис.187 приведены схемы оптических пирометров полного излучения. Принцип

устройства пирометров этого типа основан на воздействии излучаемой раскаленным телом тепловой энергии на термопару, помещенную в фокусе оптической системы пирометра. По величине возникающей т. э. д. с. судят о температуре раскаленного тела. По способу собирания лучистой энергии эти пирометры делят на рефракторные и рефлекторные.

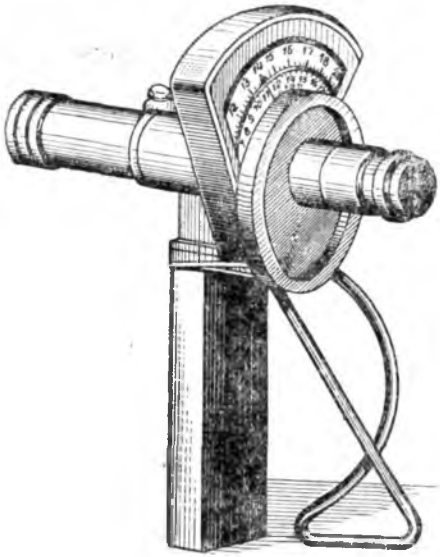


Рис. 186. Внешний вид оптического пирометра ОППИР.

В наиболее распространенных рефракторных приборах (рис. 187,*а*) лучи собираются в фокусе, где помещена термопара, при помощи двояковыпуклой линзы; в рефлекторных приборах (рис. 187,*б*) лучи направляются на горячий спай термопары при помощи вогнутого зеркала.

Оптические пирометры полного излучения называют еще радиационными, так как их действие основано на радиации, т. е. излучении. Они применяются для измерения температуры от 700 до 1800°.

Расстояние между источником излучения и пирометром не должно превышать 1 *м*. Близкое расположение прибора к источнику излучения вызывает нагревание всего прибора, в частности и холодного спая термопары, что отражается на точности показаний. Поэтому пирометр устанавливают в охлаждаемый проточной водой кожух, а измерительный прибор (гальванометр) размещают вдали от пирометра. Их соединяют проводами для передачи т. э. д. с. от термопары, расположенной в фокусе пирометра, к гальванометру. Для усиления т. э. д. с. в фокусе пирометра устанавливают обычно не одну термопару, а несколько последовательно соединенных термопар, так называемый термостолбик.

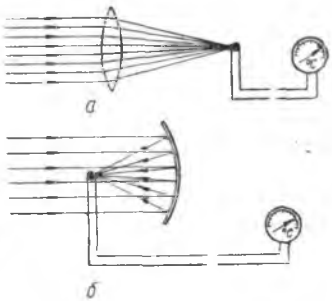


Рис. 187. Оптические схемы пирометров полного излучения: *а*—схема рефракторного пирометра; *б*—схема рефлекторного пирометра.

Стационарные пирометры этого типа—ардометры—применяют для измерения температур в стекловаренных печах, машин-

ных каналах и т. д. Достоинствами их являются: а) отсутствие необходимости в источнике тока; б) непосредственное получение значений температуры; в) возможность передачи показаний на расстояние; г) компактность установки.

Глава II

ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ И РАЗРЕЖЕНИЯ ГАЗОВ

Приборы для измерения давления и разрежения газов называются манометрами. Манометр для измерения давления (напора) газа называют напоромером, для измерения разрежения («тяги») — тягомером[1].

Если манометр применяется для измерения давления или разрежения в одной точке, то он называется простым. Если же манометр служит для измерения разности давлений или разрежений в двух точках, то он называется дифференциальным.

Давление и разрежение газов измеряются в миллиметрах водяного столба (*мм* вод. ст.).

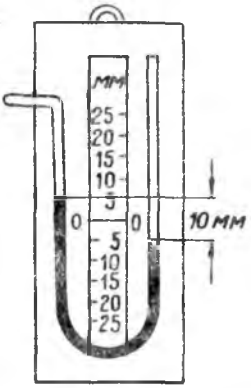


Рис. 188. U-образный манометр.

Простейшим прибором для измерения давления и разрежения является U-образный манометр (рис. 188). Он представляет собой стеклянную трубку, изогнутую в виде латинской буквы U, прикрепленную к планке со шкалой. В качестве жидкости в U-образных манометрах применяют воду, обычно подкрашенную для легкости отсчета делений по шкале, или жидкость с удельным весом меньше воды (например, керосин), благодаря чему манометр приобретает большую чувствительность. Жидкость наливают в трубку манометра так, чтобы уровень ее совпадал с нулевым делением шкалы. Один конец трубки оставляют открытым, а другой—соединяют с точкой замера. Вследствие разности давлений жидкость опустится в одном колене трубки и поднимется в другом. Величина разрежения или давления будет равна разности уровней жидкости в обоих коленах.

При использовании U-образного манометра как дифференциального оба колена трубки соединяют с двумя точками заме-

---

[1] Обычно один и тот же прибор может быть использован для измерения и давления и разрежения газов. Поэтому деление манометров на напоромеры и тягомеры условно.

ров. Полученная разность уровней жидкости в трубке соответствует разности давлений или разрежений в этих двух точках.

Манометр с наклонной трубкой является более точным и чувствительным, чем U-образный. Он применяется в качестве тягомера (рис. 189). Одно колено его заменяется стеклянным сосу-

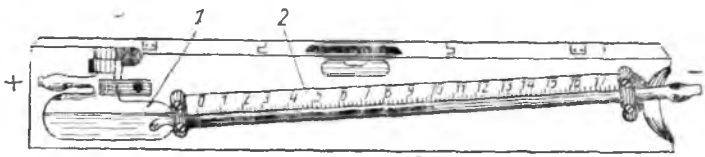


Рис. 189 Манометр с наклонной трубкой.

диком *1*, а другое—наклонно расположенной стеклянной трубкой *2*. Жидкостью обычно служит подкрашенный спирт или керосин. Резиновая трубка, соединяющая тягомер с точкой замера, надевается на конец наклонной стеклянной трубки, вдоль которой расположена шкала.

В то время как в U-образном манометре 1 *мм* давления или разрежения соответствует 1 *мм* шкалы, в тягомере с наклонной трубкой, вследствие наклонного подъема жидкости, 1 *мм* давления или разрежения соответствует на шкале отрезок длиной в несколько раз (8—10) бо́льший. Эти тягомеры применяются для измерения разрежения до 100 *мм* вод. ст.

U-образные манометры и тягомеры с наклонной трубкой служат главным образом для периодического измерения давления и разрежения газов. Для непрерывного измерения давления и разрежения применяются самопишущие напоромеры и тягомеры.

Тягомер колокольного типа (рис. 190) состоит из цилиндра, в котором может перемещаться вверх и вниз колокол, плавающий в жидкости, заполняющей цилиндр. Пространство, в котором измеряется давление или разрежение, сообщается с подколокольным пространством тягомера, вследствие чего колокол изменяет свое положение. Перо, прикрепленное в верхней части колокола, перемещаясь вместе с последним, вычерчивает на вращающемся барабане кривую изменения давления или разрежения. Барабан приводится во вращение при помощи часового механизма.

Кольцевой манометр (рис. 191) состоит из легкого полого кольца, заполненного до середины жидкостью и опирающегося в центре на призму. Кольцо имеет вверху перегородку и по обеим сторонам ее два отростка для прикрепления к ним резиновых трубок, соединяющих прибор с точками замера.

Если давление в одной половине кольца будет больше, чем в другой ($p_1 > p_2$), то жидкость в кольце изменит свое положение, а

кольцо отклонится от положения равновесия на угол тем больший, чем больше разность давлений.

К нижней части кольца прикреплен противовес, возвращающий его в положение равновесия.

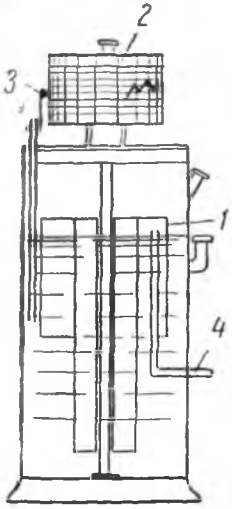


Рис. 190. Тягомер колокольного типа: *1*—колокол; *2*—барабан; *3* — пишущее перо; *4*—трубка для подвода газа.

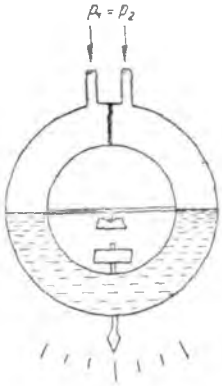


Рис. 191. Кольцевой манометр.

Кольцевые манометры бывают показывающие и самопишущие. Они применяются главным образом как дифференциальные манометры для измерения разности (перепада) давлений при измерении количества газа с помощью диафрагм и в других случаях.

При небольших давлениях газа рабочей жидкостью в кольцевых манометрах служит вода, а при значительных давлениях—ртуть.

Глава III

ПРИБОРЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ И КОЛИЧЕСТВА ГАЗОВ

Определение скорости и количества движущихся газов производится при помощи приборов следующих типов: 1) напорных; 2) скоростных; 3) дроссельных.

1. НАПОРНЫЕ ТРУБКИ

Напорные трубки представляют собой обычно полую металлическую трубку, внутри которой расположены две трубки меньшего диаметра (рис. 192). На конце трубки под прямым углом к ней находится так называемая головка, имеющая два отверстия: одно в самом конце—круглое, соединенное с одной внутренней трубкой, а другое—кольцевое, щелевидное, соединенное с другой внутренней трубкой *б*.

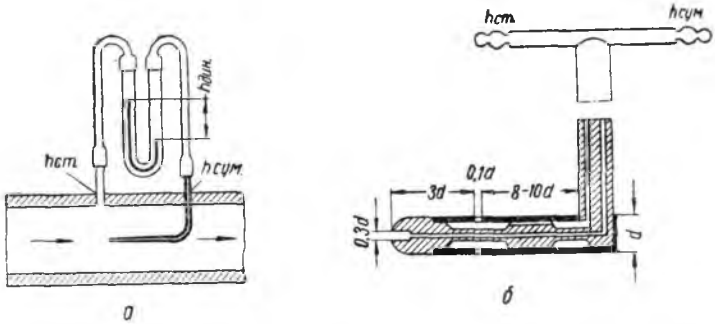


Рис. 192. Напорная трубка: *а*—установка напорной трубки; *б*—устройство напорной трубки.

При измерении скорости газового потока трубка погружается на некоторую глубину в газовый поток так, чтобы головка ее была направлена навстречу движению газа. При этом положении трубки отверстие на конце будет воспринимать суммарный напор газового потока, т. е. статический и динамический, в то время как кольцевое щелевидное отверстие будет воспринимать лишь один статический напор. Зная суммарный и статический напоры, можно по разности их определить величину динамического напора и, следовательно, скорость газового потока (см. раздел третий «Движение газов»).

Скорость газового потока измеряется только в той точке сечения канала, в которой находится головка трубки. Так как для расчетов необходима средняя скорость потока, то для определения ее принимаются показания трубки при нескольких погружениях ее в канал на различную глубину. Для определения величины погружения трубки на ней нанесены через каждые 50 *мм* кольцевые штрихи с цифрами, указывающими расстояния их от оси головки.

Трубки бывают длиной от 500 до 2000 *мм*. Напорные трубки пригодны для измерения напора газа, если температура его не превышает 500° и он не содержит пыли, сажи, смолы и других примесей, забивающих отверстия трубок и искажающих их показания. Применяются они главным образом для периодических контрольных замеров, но не как стационарные приборы.

2. АНЕМОМЕТРЫ

Для непосредственного измерения скорости газа применяют анемометры—крыльчатые и чашечные.

Крыльчатый анемометр (рис. 193) состоит из нескольких крыльев, расположенных звездообразно на одном валу (наподобие крыльев ветряной мельницы). Направленная по оси струя газа, попадая на крылья, вращает их; при незначительной величине трения в приборе создается окружная скорость колеса анемометра, равная скорости струи.

Рис. 193. Анемометр крыльчатый.

В чашечном анемометре вместо крыльев имеются чашечки, через которые скорость струи передается счетному механизму, заключенному в корпусе прибора.

Анемометры применяют для измерения скоростей от 1 до 20 *м/сек*.

Количество газа, протекающего по трубопроводу или каналу, может быть определено при помощи приборов для измерения скоростей—напорной трубки или анемометра. Зная скорость газового потока v и площадь сечения канала F, по которому движется газ, можно получить количество газа Q как произведение этих двух величин:

$$Q = v \cdot F.$$

В ряде случаев этот способ является неприемлемым, как не дающий достаточной точности. Кроме того, напорная трубка и анемометр являются, как уже указывалось выше, приборами нестационарного типа и служат для периодических замеров.

3. ДРОССЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

Наиболее распространенным способом измерения количества газа в печных, сушильных и газогенераторных установках является способ, основанный на применении дроссельных приборов.

Теоретические основы применения дроссельных приборов состоят в следующем. В трубопровод, по которому движется газ, вставляют дроссельный прибор, обычно в виде диафрагмы (шайбы), представляющей диск с круглым отверстием, диаметр которого меньше диаметра трубопровода. При прохождении газового потока через диафрагму получается местное сужение его,

вследствие чего скорость потока увеличивается в обратной зависимости от уменьшения площади сечения.

Увеличение скорости и, следовательно, кинетической энергии в отверстии диафрагмы вызывает, по закону сохранения энергии, уменьшение потенциальной энергии в этом месте, т. е. падение статического давления (рис. 194). Перед диафрагмой образуется некоторый подпор, т. е. повышение давления.

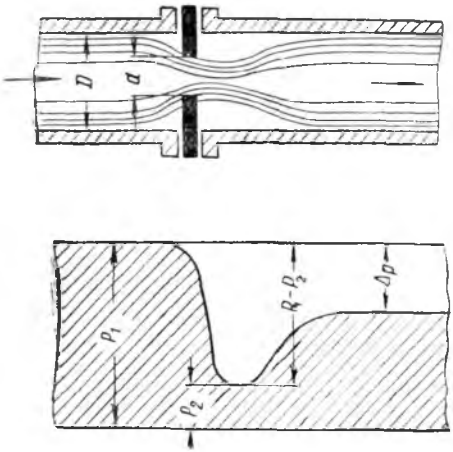


Рис. 194. Схема действия диафрагмы.

Пройдя отверстие диафрагмы, газовый поток вновь уменьшает свою скорость, отчего статическое давление его вновь увеличивается. Но ввиду больших потерь на удар и образования вихрей до и после диафрагмы, давление за ней восстанавливается неполностью и получается невозвратимая потеря давления ΔP.

Разность, или перепад, давлений $(P_1—P_2)$ зависит от количества газа, проходящего через отверстие диафрагмы: чем больше газа протекает по трубопроводу, тем больше будет перепад давления, так как количество газа пропорционально $\sqrt{P_1-P_2}$. Следовательно, определив при помощи дифференциального манометра перепад давления, создаваемый диафрагмой, можно вычислить количество газа, протекающее по трубопроводу, при помощи формулы:

$$v_0 = K\sqrt{\frac{2gh}{\gamma}},$$

где: v_0 — скорость в отверстии диафрагмы в *м/сек*;
K — коэффициент протекания;
g — величина земного ускорения в *м/сек*^{2};
h — перепад давления $(P_1—P_2)$ в *мм* вод. ст.;
γ — объемный вес газа при данных условиях в *кг/м*^{3}.

Коэффициент протекания K является характерной величиной для каждой диафрагмы и определяется по формуле:

$$K = \frac{\mu}{\sqrt{1-m^2\mu^2}},$$

где: μ — коэффициент сжатия струи газа, зависящий от m;
m — отношение площади отверстия диафрагмы к площади поперечного сечения трубопровода:

$\mu = 0,3$	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
$m = 0,653$	0,668	0,689	0,717	0,756	0,808

Пример. В воздухопроводе, по которому подается в газогенератор воздух, установлена диафрагма. Диаметр воздухопровода $D = 350$ *мм*; диаметр отверстия диафрагмы $d = 200$ *мм*; средний перепад давления по записям самопишущего кольцевого манометра $h = P_1 - P_2 = 100$ *мм*; атмосферное давление равно 749 *мм* рт. ст.; температура воздуха $+18°$.

Необходимо определить часовое количество подаваемого в газогенератор воздуха.

Решение. Площадь поперечного сечения воздухопровода:

$$F = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,35^2}{4} = 0,0962 \text{ м}^2.$$

Площадь отверстия диафрагмы:

$$f = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,20^2}{4} = 0,0344 \text{ м}^2.$$

Значение m в данном случае равно 0,326.

Объемный вес воздуха при 0° и 760 *мм* рт. ст. равен 1,293 *кг/м*³.

Объемный вес воздуха при $+18°$ и 749 *мм* рт. ст.:

$$\gamma = 1,293 \frac{749}{760} \cdot \frac{273}{273 + 18} = 1,2 \text{ кг/м}^3.$$

Коэффициент сжатия μ определяется интерполяцией из приведенных выше данных и равняется 0,657.

Коэффициент протекания:

$$K = \frac{\mu}{\sqrt{1 - m^2 \mu^2}} = \frac{0,657}{\sqrt{1 - 0,326^2 \cdot 0,657^2}} = 0,674.$$

Скорость в отверстии диафрагмы:

$$v_0 = K \sqrt{\frac{2gh}{\gamma}} = 0,674 \sqrt{\frac{2 \cdot 9,81 \cdot 100}{1,2}} = 27 \text{ м/сек}.$$

Скорость в воздухопроводе: $v = m v_0 = 0,326 \cdot 27,0 = 8,8$ *м/сек*.

Количество подаваемого воздуха:

$$Q_{сек} = 8,8 \cdot 0,0962 = 0,846 \text{ м}^3/\text{сек}.$$

Количество воздуха, приведенное к нормальным условиям:

$$Q_{час} = 3600 \cdot 0,846 \cdot \frac{749}{760} \cdot \frac{273}{273 + 18} = 2916 \text{ нм}^3/\text{час}.$$

Глава IV

ПРИБОРЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОСТАВА И ВЛАЖНОСТИ ГАЗОВ

Для определения состава горючих и дымовых газов применяют химические и электрические газоанализаторы как ручного периодического, так и непрерывного автоматического действия.

1. ХИМИЧЕСКИЕ ГАЗОАНАЛИЗАТОРЫ

Принцип действия химических газоанализаторов основан на избирательной абсорбции некоторыми химическими реактивами отдельных составных частей горючих и дымовых газов — CO_2, O_2, CO и других.

Наиболее простой и распространенный химический газоанализатор ручного действия, при помощи которого можно определить в газах содержание CO_2, O_2 и CO, приведен на рис. 195.

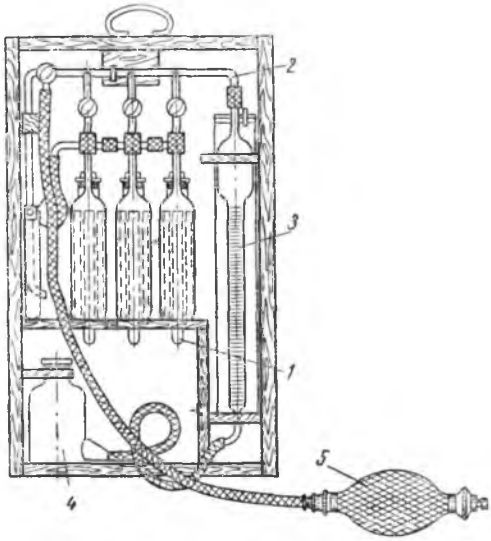


Рис. 195. Химический газоанализатор.

Он состоит из трех одинаковых поглотительных сосудов *1*, соединенных между собой так называемой гребенкой с трехходовым краном *2*, при помощи которой поглотительные сосуды могут соединяться с местом отбора газа и с атмосферой. Справа от поглотительных сосудов укреплена измерительная бюретка *3*, соединенная со склянкой *4*, в которой находится подкрашенная вода, представляющая собой рабочую жидкость газоанализатора.

Назначение измерительной бюретки прибора — точно отмерять забранное количество газа и определять изменение его объема при анализе. Бюретка разделена на 100 равных частей.

Внутри поглотительных сосудов помещены стеклянные трубки для увеличения поверхности соприкосновения поглотительных растворов с газом и ускорения реакций поглощения.

При определении состава газа, находящегося под давлением (например, генераторного газа), засос его в прибор производится путем опускания склянки *4*. Вследствие этого вода выходит из бюретки и в нее засасывается за счет образовавшегося вакуума газ из газопровода. При заборе пробы газа из пространства с разрежением (например, дымовых газов из дымохода), газ приходится засасывать в газоанализатор при помощи резиновой груши *5*.

Для очистки забираемого в прибор газа от пыли, смолы и других примесей газ предварительно пропускается через фильтр в виде широкой U-образной трубки, наполненной стеклянной ватой; фильтр укрепляется с левой стороны внутри деревянного ящика прибора.

Для поглощения CO_2 служит щелочной раствор едкого кали KOH; для поглощения O_2—щелочной раствор пирогаллола $C_6H_3(OH)_3$; для поглощения CO — аммиачный раствор полухлористой меди Cu_2Cl_2.

Для приготовления поглотительных растворов применяют следующие составы: едкое кали—водный раствор KOH в отношении 1 : 2; щелочной раствор пирогаллола, получаемый при растворении 15 *г* пирогаллола в 30 *см*³ воды, смешанных с 80 *см*³ водного раствора KOH указанной выше концентрации; аммиачный раствор Cu_2Cl_2, приготовляемый растворением 250 *г* NH_4Cl в 750 *см*³ воды с добавлением 200 *г* Cu_2Cl_2. Перед употреблением этого раствора на каждые 3 *см*³ раствора добавляют 1 *см*³ аммиака.

Растворы KOH и Cu_2Cl_2 готовят обычно на несколько зарядок прибора. Раствор пирогаллола, ввиду большой активности его по отношению к кислороду, должен приготовляться непосредственно перед каждой зарядкой.

Работоспособность реактивов: KOH — от 24 до 32 анализов, $C_6H_3(OH)_3$ — от 16 до 23, Cu_2Cl_2 — от 5 до 10.

Едкое кали для поглощения CO_2 можно заменять водным раствором едкого натра NaOH в отношении 1 : 4, а пирогаллол для поглощения O_2—гипосульфитом $Na_2S_2O_3$ (20 *г* гипосульфита, 10 *г* KOH и 70 *г* воды). Но поглотительная способность этих реактивов значительно меньше.

Ввиду того, что KOH разъедает кожу, а пирогаллол ядовит, при обращении с ними необходимо соблюдать осторожность.

Анализ начинается с забора газа в аппарат, для чего открывают кран гребенки и поднимают вверх склянку с водой *4*. Вследствие созданного таким образом напора вода из склянки

4 перейдет в бюретку *3*, где уровень ее доводится до отметки 100. Затем закрывают трехходовой кран гребенки *2*, опускают склянку вниз, открывают кран и производят засос газа в бюретку прибора за счет разрежения, создаваемого переливанием воды из бюретки *3* в склянку *4*.

В бюретку забирают несколько больше 100 объемных единиц газа, после чего кран гребенки закрывают и производят сжатие газа для приведения его к атмосферному давлению. Для этого при закрытых кранах прибора поднимают склянку вверх и зажимают резиновую трубку бюретки. Осторожно манипулируя резиновой трубкой, подводят уровень воды в бюретке ровно до отметки 0 и, продолжая держать трубку зажатой, на несколько секунд открывают кран гребенки. Затем, закрыв кран, опускают резиновую трубку и, сопоставив уровни жидкостей в склянке и бюретке, контролируют правильность забора количества газа.

Имея в бюретке ровно 100 *см*^{3} газа, можно приступить к прокачке его через поглотительные сосуды. Для этого склянку *4* поднимают и открывают кран первого поглотительного сосуда, наполненного раствором КОН. Вследствие создавшегося напора газ из бюретки вытесняется водой и по гребенке направляется в первый поглотительный сосуд, кран которого открыт. Одновременно с этим воздух в сосуде вытесняется реактивом и уходит в предназначенный для этого резиновый мешок, находящийся позади поглотительных сосудов. Газ, направленный в сосуд, приходит в соприкосновение со смоченными реактивом стенками сосуда и стеклянными трубочками и отдает реактиву ту составную часть, которую способен поглотить данный реактив, а именно CO_2. Для лучшего поглощения CO_2 необходимо сделать 2—3 прокачки газа.

Уменьшение объема газа в бюретке после поглощения в первом сосуде даст количество поглощенного CO_2, выраженное непосредственно в процентах.

Прокачка через второй поглотительный сосуд с раствором пирогаллола производится точно так же, как и через первый, с той лишь разницей, что число прокачек нужно увеличить до 5—7.

Уменьшение объема газа после прокачки через второй поглотительный сосуд покажет процентное содержание кислорода O_2 в анализируемом газе, но не непосредственно по бюретке, а путем вычитания из последнего показания предыдущего, т. е. CO_2. Таким образом, после прокачки пробы газа через второй сосуд в бюретке имеем уменьшение объема газа, равное сумме CO_2 и O_2.

Прокачка газа через третий поглотительный сосуд ничем не отличается от прокачек через первые два сосуда. Через третий сосуд производят 4—6 прокачек.

Уменьшение объема газа после прокачки через третий сосуд даст сумму объемов уже трех поглощенных газов CO_2+O_2+CO.

Количество CO определяется путем вычитания из этой суммы CO_2 и O_2.

Количества CO_2, O_2 и CO необходимо определять только в указанной последовательности, ни в коем случае не отступая от нее, так как это приведет к неверным результатам ввиду поглощения щелочным раствором пирогаллола не только O_2, но и CO_2.

Существуют и более сложные химические газоанализаторы, при помощи которых можно определить не только содержание в газе CO_2, O_2, CO, но также H_2, CH_4 C_2H_4 и других углеводородов, например, при анализе генераторного газа. Описание их устройства приведено в специальных руководствах по газовому анализу.

2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ГАЗОАНАЛИЗАТОРЫ

Действие электрических газоанализаторов основано на различной теплопроводности отдельных газов. Если теплопроводность воздуха принять за 100, то теплопроводность других газов будет выражаться величинами, представленными в табл. 46.

Таблица 46

Теплопроводность газов

Газы	Теплопроводность	Газы	Теплопроводность
Воздух	100	Метан	126
Азот	99	Водород	700
Кислород	101	Водяной пар	126
Углекислый газ	59	Сернистый газ	34
Окись углерода	96		

Следовательно, теплопроводность какой-либо газовой смеси будет зависеть от ее химического состава.

Когда газообразная смесь представляет собой продукты полного сгорания топлива, теплопроводность ее зависит главным образом от содержания в ней CO_2. Чем больше CO_2 в продуктах горения, тем меньше их теплопроводность, и наоборот. На этом основано действие электрического газоанализатора для определения CO_2 в дымовых газах.

Основной частью прибора является передатчик, в котором имеются две камеры — газовая и воздушная. Через газовую камеру эжектором просасывается исследуемый газ, воздушная камера заполнена сухим воздухом. Каждая камера представляет собой массивную металлическую колодку с просверленными в

ней узкими каналами. В них натянуты металлические (обычно платиновые) проводники, по которым проходит электрический ток, в результате чего они нагреваются, передавая при этом часть своего тепла газу.

Количество тепла, передаваемое проводником газу, зависит от теплопроводности последнего. Чем меньше теплопроводность газа, тем сильнее нагревается проводник и, наоборот, чем больше теплопроводность, тем ниже температура проводника. От температуры проводника зависит сопротивление его прохождению электрического тока. Измеряя сопротивление проводника, косвенным путем определяют содержание CO_2.

Схема электрического газоанализатора для определения CO_2 основана на применении мостика (рис. 196). Плечи мостика *АБ* и *ВГ* представляют собой проводники газовой камеры, плечи *АГ* и *БВ*—проводники воздушной камеры. В диагональ *АВ* включают источник постоянного тока *1*, реостат *2* и миллиамперметр *3*; в диагональ *БГ* включают гальванометр *4* и самопишущий прибор *5*. Реостат служит для установки указателя на 0 при пуске прибора на воздух.

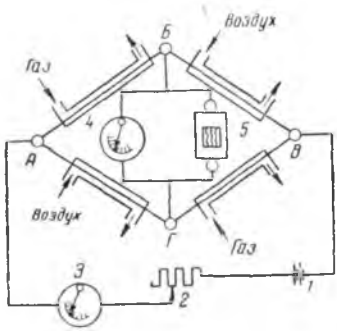


Рис. 196. Схема электрического газоанализатора.

Электрические газоанализаторы служат для определения в составе газов CO_2.

Помимо CO_2, электрические газоанализаторы могут также определять содержание в газах $CO+H_2$ (суммарно), что является достаточным для определения продуктов неполного сгорания в дымовых газах, но недостаточным для анализа генераторного газа, где надо знать содержание CO и H_2 в отдельности. Область применения электрических газоанализаторов поэтому ограничивается главным образом анализом дымовых газов.

Электрические газоанализаторы применяются в тех случаях, когда необходимо вести непрерывный контроль состава газа, автоматически записывая показания прибора и передавая их на расстояние.

3. ПСИХРОМЕТРЫ

При контроле работы сушильных установок большое значение имеет определение влажности воздуха. Обычно приходится определять влажность воздуха, не полностью насыщенного водяными парами. Влагосодержание воздуха определяется косвенным путем. Сначала замеряют относительную влажность воздуха, а затем путем пересчета определяют абсолютную влажность.

Для определения относительной влажности применяют психрометры. Психрометры можно применять в пределах от 5 до 100°, но из-за быстрого испарения воды при температурах, близких к точке кипения, применение их выше 70—80° практически затруднительно.

На рис. 197 изображен психрометр с устройством для прососа воздуха. Шарики термометров заключены в две металлические трубки, через которые небольшим вентилятором, смонтированным в верхней части прибора, просасывается воздух.

Просасывание воздуха увеличивает точность показаний прибора.

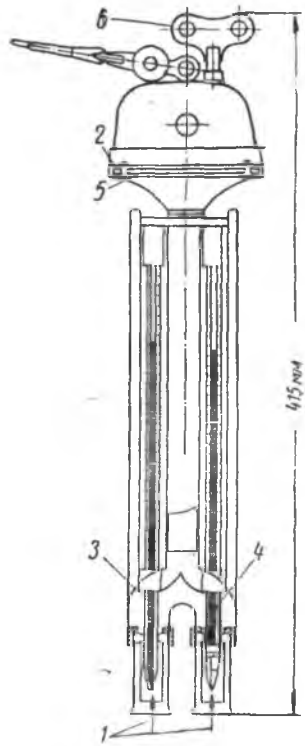


Рис. 197. Психрометр с устройством для прососа воздуха:
1 — подвод воздуха; *2*—отвод воздуха; *3*—сухой термометр; *4*—«мокрый» термометр; *5*—вентилятор; *6* — ручка для пуска вентилятора.

Пример. Определить относительную и абсолютную влажность воздуха при показаниях психрометра $t_в = +20°$ и $t_c = +25°$.

Решение. По приложению V находим относительную влажность воздуха при t_c $+25°$, $\Delta t = 25 - 20 = 5°$, равную 63%.

Из приложения VI следует, что при относительной влажности воздуха 70% и температуре $+25°$ абсолютная влажность воздуха 16,12 *г/м*³, а при относительной влажности 60% и той же температуре —13,82 *г/м*³.

Абсолютная влажность воздуха при относительной влажности 63% и температуре $+25°$ определяется путем интерполяции. В данном случае абсолютная влажность воздуха равна 14,52 *г/м*³.

Глава V

ОРГАНИЗАЦИЯ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

Эффективность применения контрольно-измерительных теплотехнических приборов зависит не только от совершенства конструкции их, но и в большой степени от выбора типа приборов, расположения точек замера, порядка пользования приборами и других условий.

Работа тепловых установок контролируется путем:

1) текущего теплотехнического контроля;

2) периодически проводимых теплотехнических обследований и испытаний.

1. ТЕКУЩИЙ КОНТРОЛЬ РАБОТЫ ТЕПЛОВЫХ УСТАНОВОК

При выборе величин, подлежащих замеру (температура, давление, разрежение, влажность и т. д.), не следует задаваться очень большим количеством их, уделяя внимание главным образом величинам, наиболее показательным для данного теплового процесса.

Точки замера следует выбирать в наиболее характерных для теплового процесса местах.

При выборе типов контрольно-измерительных приборов необходимо принимать во внимание:

а) условия, в которых должен работать прибор (высокая температура, механические загрязнения—зола, пыль и др.), что необходимо для решения вопроса о коррозии приборов, засорении заборных трубок и т. д.;

б) пределы измерения, которые необходимо знать для выбора шкалы прибора;

в) точность замера, учитывая, что излишняя точность усложняет приборы;

г) необходимость передачи показаний прибора на расстояние;

д) характер показаний прибора (показывающий, самопишущий или суммирующий).

При организации теплотехнического контроля необходимо установить порядок пользования приборами для снятия с них показаний. Обычно это излагается в форме производственной инструкции по ведению теплотехнического контроля.

Организация теплотехнического контроля для отдельных видов тепловых установок осуществляется различно.

В качестве примера в табл. 47 (см. ниже) представлена схема организации теплотехнического контроля для шахтной известково-обжигательной печи с полугазовыми топками. Такие же схемы можно составить и для других тепловых установок, принимая во внимание приводимые ниже указания по контролю работы отдельных видов теплового оборудования.

Печи периодического действия. Организация теплотехнического контроля печей периодического действия зависит от обжигаемых в них изделий, способа сжигания топлива, подогрева воздуха, размера печей и т. д. Чем сложнее конструкция печи и крупнее обжигаемые изделия, тем тщательнее должен быть организован контроль режима обжига. Например, в печах для об-

жига черепицы измеряют лишь температуру в рабочей камере и температуру отходящих газов. Температура в рабочей камере печи, обычно не превышающая 1100°, измеряется термопарой, замурованной в свод печи, и керамическими пироскопами, устанавливаемыми в различных местах садки изделий для измерения температуры по высоте камеры. В печах, имеющих рекуператоры, необходимо определять также температуру подогрева воздуха в рекуператорах, обычно не превышающую 600—700°.

Помимо температурного контроля необходимо контролировать разрежение при выходе отходящих газов у шибера дымовой трубы или дымососа. Для измерения разрежения применяют тягомер с наклонной трубкой или какой-либо самопишущий тягомер.

При обжиге в печах периодического действия огнеупорных, кислотоупорных и облицовочных изделий кривая подъема температуры приобретает большее значение.

Необходимо тщательно следить за температурой и при охлаждении печи, особенно в первый период, поскольку слишком быстрое снижение температуры может вызвать трещины и другие виды брака изделий. В этом случае измерение температуры должно производиться при помощи термопар и других пирометров с самопишущими гальванометрами.

Помимо замеров температуры и давления производят также периодические анализы дымовых газов для определения полноты горения топлива.

Кольцевые печи. Теплотехнический контроль работы кольцевых печей при обжиге кирпича состоит обычно в измерении температур: «взвара», воздуха, поступающего для подсушки, крайней камеры, находящейся на дыму, и отходящих газов, а также разрежения в камерах. Температура «взвара», лежащая в пределах 900—1050°, измеряется при помощи пироскопов, термопар и оптических пирометров. Для получения более надежных результатов при измерении этой важнейшей температуры обжига часто применяют одновременно все указанные способы замера.

Температуру воздуха, поступающего из жарового канала в камеры, колеблющуюся в пределах 150—250°, измеряют ртутными термометрами; если необходимо иметь показание температуры на некотором расстоянии от места замера,—манометрическими термометрами.

В крайней камере на дыму перед прожиганием ширмы температура измеряется теми же приборами, что и в предыдущем случае, но со шкалой до 500°.

Температура отходящих газов перед выходом их в дымовую трубу может колебаться в пределах 80—150° и измеряться при помощи ртутных и манометрических термометров.

Разрежение замеряется на шестом рядке перед «взваром» (6—12 *мм*) тягомерами с наклонной трубкой.

Схема теплотехнического контроля шахтной

Элементы замера	Измеряемый параметр	Единица измерения	Пределы измерения	Точность замера	Места замеров
Воздух первичный	Температура Давление	град. *мм*	—35+35 До+150	±1 ±5	У вентилятора дутья первичного воздуха
Воздух вторичный	Температура Давление	град. *мм*	—35+35 До+250	±1 ±5	У вентилятора дутья вторичного воздуха
Полугаз	Температура Давление Состав: CO_2 CO H_2 O_2	град. *мм* %	До+1000 До+100 До 15 До 20 До 10 До 5	±10 ± 5 ±0,1 ±0,1 ±0,1 ±0,1	При выходе полугаза в печь
Зона обжига	Температура Давление	град. *мм*	До 1200 —100+100	±10 ± 5	В зоне обжига
Дымовые газы	Температура Разрежение Состав: CO_2 O_2 CO	град. *мм* %	До 250 До—150 До 40 До 8 До 3	±5 ±5 ±0,1 ±0,1 ±0,1	При выходе из печи (у дымососа)
Топливо	Количество	*кг*	1000*	±10	На складе топлива
	Влажность Летучие Зольность	%	—	±0,1	Отбор пробы производят на загрузочной площадке у весов
Известь	Температура	град.	До+100	±1	При выходе из печи

* При емкости вагонетки 1000 *кг*.

Таблица 47

известково-обжигательной печи

Наименование контрольно-измерительных приборов	Место установки приборов	Количество приборов (комплект на одну печь)	Периодичность наблюдений
Термометр ртутный	У места замера	По числу топок (на каждую топку 1 прибор)	Два раза в смену
U-образный тягомер	То же	1	
Термометр ртутный	У места замера	1	Два раза в смену
U-образный тягомер	То же	1	
Термопара хромель-алюмелевая с регистрирующим гальванометром	На рабочей площадке у печи	По числу топок (на каждую топку 1 прибор)	Непрерывно
Химический ручной газоанализатор	Переносный прибор		Полный газовый анализ (один раз в смену)
U-образный тягомер	У места замера		Два раза в смену анализ на CO_2
Термопара платино-родиевая с регистрирующим гальванометром	На рабочей площадке у печи	1	Непрерывно
U-образный тягомер		1	Два раза в смену
Термометр манометрический, регистрирующий	На рабочей площадке у дымососа	1	Непрерывно
Химический газоанализатор	У места замера	1	Один раз в смену на O_2 и CO и каждый час на CO_2
Вагонеточные весы	На складе топлива	1	По количеству взвешиваний
Лабораторные приборы технико-химического анализа	В лаборатории	1	Один анализ от каждой партии топлива
Термометр ртутный	У места замера		Один раз в смену

В отходящих дымовых газах обычно определяются лишь CO_2 и O_2. Определение CO не производят ввиду того, что кольцевые печи работают с большим избытком воздуха, обеспечивающим полноту сгорания топлива.

Туннельные печи. Контроль теплового режима туннельных печей сводится в основном к измерению температуры и разрежения газов по длине печи в зонах подогрева, обжига и остывания.

Для замера температур в зоне подогрева и остывания применяют термопары, а в зоне обжига—оптические пирометры полного излучения—ардометры. Величина температур, подлежащих измерению, зависит от вида обжигаемого материала, длины и конструкции печи.

Величина тяги в печи контролируется самопишущими тягомерами.

Для контроля полноты горения газа применяют электрические газоанализаторы.

Ввиду того, что туннельные печи отапливаются почти исключительно газообразным топливом, в числе контрольно-измерительной аппаратуры туннельных печей необходимо иметь приборы для определения количества газа—расходомер и для теплотворности газа—газовый калориметр.

Туннельные печи обслуживаются обычно самопишущими контрольно-измерительными приборами.

Шахтные печи. Важнейшими параметрами теплотехнического контроля шахтных печей, как видно из табл. 47, являются температура газов в зоне обжига и температура отходящих газов.

Ванные стекловаренные печи. В ванных стекловаренных печах теплотехническому контролю подлежат: температура и давление газов по длине печи, работа регенераторов и дымовой трубы.

В ванных печах с поперечным пламенем, являющихся наиболее длинными из всех типов стекловаренных печей, измерение температуры должно производиться в четырех-пяти точках: у засыпки шихты в печь, в зоне наивысшей температуры, т. е. между второй и третьей парами горелок, перед экраном, в зоне студки и в перешейке.

В небольших ванных печах с подковообразным пламенем обычно ограничиваются двумя точками контроля: в зоне наиболее высокой температуры и в выработочной части ванны.

Кроме температуры в ванных печах необходимо измерять давление газов над уровнем стекломассы, особенно, если варка производится на сульфатной шихте. При этом в зоне варки должна быть восстановительная атмосфера и небольшое положительное давление, чтобы газы слегка выбивались из печи. В зоне осветления необходимо иметь небольшое разрежение и подсос воздуха в печь.

Температуру в ванных печах непрерывно измеряют при по-

мощи стационарных радиационных пирометров—ардометров, объективы которых должны быть направлены на дно огнеупорных ардометрических трубок.

Установка ардометрических трубок необходима также в ванных печах с подковообразным пламенем, где проносящийся мимо объектива ардометра факел пламени не позволяет измерить среднюю температуру печного пространства.

Ввиду высокой температуры воздуха, непосредственно окружающего ванную печь, стационарные приборы для измеречия давления газов в печи обычно не устанавливают. К отверстию печи у заклинков подносят зажженную лучину и по отклонечию ее пламени судят о давлении газов в ванне.

Теплотехнический контроль работы регенераторов сводится к измерению температуры вверху и внизу регенераторов, разрежения и, периодически (в случае каких-либо нарушений режима),—состава дымовых газов. Температуру вверху регенератора измеряют для определения разницы температур в воздушном и газовом регенераторах (в первом температура должна быть несколько выше, чем во втором), а также для предупреждения возможности перегрева насадки регенераторов. Внизу регенераторов температура контролируется для определения степени использования в регенераторах тепла отходящих газов. Измерение температуры вверху регенераторов производят платино-платинородиевыми термопарами или ардометрами. Внизу регенераторов температуру измеряют хромель-алюмелевыми или другими термопарами. Контроль разрежения вверху и внизу регенераторов позволяет устанавливать величину сопротивления насадки и степень ее засорения уносимой из ванны пылью.

Контроль работы дымовой трубы состоит в определении температуры и разрежения внизу дымовой трубы у шибера. Как правило, температура отходящих дымовых газов должна быть незначительной, а создаваемое трубой разрежение — достаточным для преодоления всех сопротивлений на пути движения газов.

Для измерения температуры дымовых газов служат термопары, для измерения разрежения применяют U-образные и другие тягомеры.

Машинные каналы. Теплотехнический контроль режима работы машинного канала состоит в основном в определении температуры и давления газов и температуры стекломассы в середине канала. Кроме того, температуру газовой среды определяют в каждой подогревательной камере.

Температуру и давление газов измеряют ардометром и каким-либо тягомером, а температуру стекломассы определяют при помощи специальной платино-платинородиевой термопары с водяным охлаждением, погруженной вглубь стекломассы.

В подмашинных камерах переносным оптическим пирометром периодически измеряют температуру «луковицы» стекольной лен-

ты. Отжиг при вертикальном способе вытягивания стекла происходит непосредственно в шахте машины, в процессе его вытягивания. Для контроля режима отжига в шахте машины по высоте ее устанавливают 2—3 термопары, измеряющие падение температуры в шахте.

Для более точного контроля отжига применяют поверхностные термопары, позволяющие измерять температуру стекольной ленты непосредственно при ее движении снизу вверх.

Отжигательные печи. Теплотехнический контроль работы отжигательной печи состоит в определении температуры по длине и ширине ее при помощи термопар с пределом измерения до 800°, устанавливаемых в сводах или боковых стенках.

Вращающиеся печи. Теплотехнический контроль работы вращающихся печей на цементных заводах состоит в измерении: 1) температуры отходящих из печи газов; 2) температуры поступающего в печь воздуха; 3) разрежения в пыльной камере; 4) давления дутья, создаваемого вентилятором и анализе отходящих газов.

Важнейший параметр теплотехнического контроля—температура отходящих газов, которая зависит от длины печи, способа производства и способа отопления. Для печей длиной до 60 *м*, при пылеугольном отоплении и мокром способе производства, температура отходящих газов не должна превышать 450°, при сухом способе—650°. При большей длине печи температура отходящих газов снижается до 150—300°. При установке у печей котлов-утилизаторов температура отходящих газов может доходить до 700—800°. Для измерения температуры отходящих газов применяют хромель-алюмелевые термопары с пределами измерения 800—1000°.

Температура поступающего в печь воздуха измеряется ртутным термометром со шкалой до 300°.

Для измерения давления и разрежения применяют U-образные и кольцевые тягомеры.

Состав отходящих газов контролируется электрическим газоанализатором. Шкала указателя на CO_2 имеет деления от 0 до 35%.

Избыток воздуха определяется по содержанию в отходящих газах O_2, измеряемому автоматическим химическим газоанализатором.

Сушилки. Теплотехнический контроль работы сушилок в основном заключается в определении параметров входящего и выходящего теплоносителя—воздуха или дымовых газов. Главнейшими параметрами, характеризующими режим сушки, являются температура и влагосодержание теплоносителя. Для измерения температуры воздуха до и после сушилки применяются ртутные и манометрические термометры.

В туннельных сушилках температуру измеряют по всей длине туннеля, в камерных сушилках—в каждой камере.

Влагосодержание воздуха определяют по показаниям психрометра. При использовании для сушки тепла дымовых газов, отбираемых из обжигательных печей, необходимо определять температуру (до и после камеры смешения), для чего также служат термометры.

При естественной сушке кирпича-сырца в сушильных сараях контроль режима сушки состоит из замеров температуры и влажности атмосферного воздуха.

Газогенераторы. Наиболее важными для контроля работы газогенератора являются параметры выходящего из газогенератора газа и подаваемого в газогенератор паровоздушного дутья, которое характеризуется давлением и влажностью. От величины давления дутья зависят производительность газогенератора и качество газа.

По величине давления дутья можно судить о сопротивлении слоя топлива в газогенераторе и степени зашлакования колосниковой решетки. Резкое возрастание величины давления—признак шлакования золы топлива.

Для измерения давления дутья, обычно не превышающего 500—550 *мм* вод. ст., применяют U-образные манометры.

Влажность дутья определяется косвенными путем, по его температуре, для чего применяют термометры сопротивления, а также ртутные и манометрические термометры со шкалой до 100°.

Качество выходящего из газогенератора газа характеризуется его температурой, давлением и составом. Для измерения температуры газа, которая при газификации различных видов топлива может колебаться в пределах 100—700°, применяют, в основном, термометры сопротивления и манометрические термометры для измерения температуры, не превышающей 300°, а также термопары для температуры выше 300°.

При выборе термопар необходимо иметь в виду восстановительный характер газа, вследствие наличия в нем H_2, и не применять термопар из платины и ее сплавов. Кроме того, платина при высокой температуре науглероживается.

Давление газа, выходящего из газогенератора, обычно не превышающее 30 *мм*, измеряется U-образным манометром.

Состав газа контролируется путем непрерывного определения CO_2 в газе электрическим газоанализатором и периодического (не реже одного раза в рабочую смену) полного анализа газа химическими газоанализаторами.

2. ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ТЕПЛОВЫХ УСТАНОВОК

Помимо текущего теплотехнического контроля, работа тепловых установок подвергается периодическим, так называемым балансовым испытаниям, целью которых является получение дан-

ных для составления материального и теплового балансов, выявление к. п. д., определение удельного расхода топлива и других показателей.

Методика проведения балансовых испытаний основывается на одновременном замере всех статей прихода и расхода тепла.

Теплотехнические испытания производятся не только для составления тепловых балансов, но и для выявления влияния различных факторов при изменении теплового режима, выяснения причин неполадок в работе тепловых установок и в других случаях.

Как правило, испытания производятся при установившемся тепловом режиме непрерывно в течение продолжительного периода времени—24, 48 или 96 часов. Продолжительность испытания печей периодического действия должна охватывать весь цикл работы печи, т. е. разогрев, период наивысшей температуры и охлаждения. Чем длиннее продолжительность испытания, тем надежней результаты его, тем менее отражается на них влияние возможных ошибок.

До испытания необходимо составить схему размещения приборов, установить подлежащие замеру величины и периодичность замеров.

Чем чаще производится запись показаний приборов, тем точнее картина изменения той или иной величины и тем правильнее результаты.

Одновременно с наблюдением за показаниями приборов производят отбор средней пробы топлива для анализа.

Глава VI

АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫМИ ПРОЦЕССАМИ

Показания теплотехнических контрольно-измерительных приборов дают возможность управлять тепловыми процессами и соблюдать правила техники безопасности, предупреждая о переходе допустимых пределов температуры, давления и т. п.

Эффективность контроля зависит не только от точности приборов, но и от того, насколько внимательно следит обслуживающий персонал за контрольно-измерительными приборами и насколько быстро он реагирует на их показания.

Более совершенным способом управления тепловыми процессами является автоматическое регулирование их при помощи особых механизмов-регуляторов. Применяя регуляторы, можно автоматически поддерживать или изменять в определенных пре-

делах температуру в печах, давление дутья в газогенераторах, влажность воздуха в сушилках и другие важнейшие условия тепловых процессов.

Применение автоматики для управления работой печей, сушилок и других тепловых установок по сравнению с ручным обслуживанием их:

1) увеличивает производительность тепловых установок и повышает качество продукции путем более точного соблюдения режимов тепловой обработки;

2) облегчает труд рабочих, поднимает производительность труда, делает его более квалифицированным, приближая технический уровень рабочих к уровню инженерно-технических работников;

3) сокращает удельные расходы тепла и топлива на тепловую обработку строительных материалов, делает ее более экономичной;

4) уменьшает возможность производственных неполадок и аварий.

В зависимости от характера регулируемых величин в производстве применяют:

а) регуляторы температуры;

б) регуляторы давления и разрежения;

в) регуляторы влажности.

По принципу действия регуляторы делятся на:

а) регуляторы прямого (непосредственного) действия;

б) регуляторы непрямого действия.

Ниже рассматриваются некоторые наиболее распространенные типы регуляторов[1].

1. РЕГУЛЯТОРЫ ПРЯМОГО ДЕЙСТВИЯ

Регуляторы прямого (непосредственного) действия представляют собой наиболее простые типы регуляторов. Регулирующий орган (клапан, вентиль и т. п.) перемещается непосредственно под действием силы, создаваемой в регуляторе при изменении величины регулируемого параметра: давления, температуры и т. д.

Регулятор давления газа прямого действия. В трубопроводе, по которому подается газ или воздух, установлен дроссельный клапан «мотылькового» типа, который дает возможность регулировать количество протекающего по трубопроводу газа. Для поддержания постоянного давления газа в трубопроводе раз-

---

[1] Подробное описание различных регуляторов и систем автоматического регулирования приведено в книге В. Г. Гутопа—Контроль и регулирование тепловых процессов в производстве строительных материалов. Промстройиздат, 1950.

мер отверстия клапана должен быть постоянным. Чем шире открыт клапан, тем больше проходит газа, тем выше давление и наоборот.

Работа клапана регулируется следующим образом. На оси «мотылькового» клапана находится маховик *1*, через который перекинут стальной трос (рис. 198). Один конец троса соединен с колоколом регулятора *2*, а другой уравновешен контргрузом. Колокол может перемещаться вверх и вниз в цилиндре, в котором находится рабочая жидкость *3*—вода, раствор глицерина или масло (если регулятор установлен в неотапливаемом помещении). Подколокольное пространство регулятора сообщается

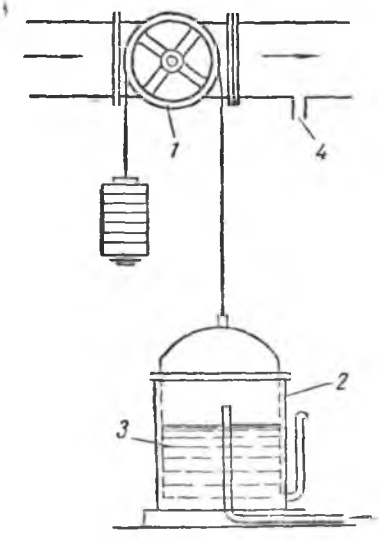


Рис. 198. Схема устройства колокольного регулятора давления газа.

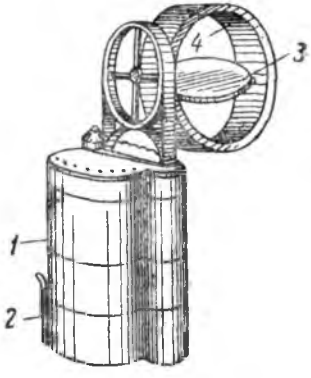


Рис. 199. Внешний вид колокольного регулятора давления: *1* — колокол; *2*—подвод газа; *3*—дроссельный клапан; *4*—газопровод.

с трубопроводом (за клапаном по ходу газа) в точке *4*, в которой необходимо поддерживать постоянное давление газа. Степень открытия клапана регулируется весом контргруза.

Повышение давления газа за клапаном непосредственно передается под колокол регулятора, в силу чего колокол, поднимаясь, прикрывает клапан; давление газа в газопроводе снижается. При падении давления газа колокол регулятора опускается и открывает клапан, вследствие чего давление газа выравнивается.

Регуляторы подобного типа применяют при низких давлениях газа (до 1000 *мм* вод. ст.), например, на газогенераторных станциях. Внешний вид колокольного регулятора давления приведен на рис. 199.

2. РЕГУЛЯТОРЫ НЕПРЯМОГО ДЕЙСТВИЯ

Регуляторы непрямого действия являются более точными и чувствительными, но, вместе с тем, и более сложными аппаратами. В них воздействие регулирующего органа на рабочий производится не непосредственно, а при помощи какого-либо промежуточного вспомогательного устройства, назначение которого состоит в увеличении перестановочной силы регулятора. Вспомогательное устройство, усиливающее действие регулятора, может быть гидравлическим, пневматическим, электрическим или комбинированным, например, электрогидравлическим.

Существует много конструкций регуляторов и систем автоматического управления режимом тепловых установок.

Регуляторы непрямого действия служат для регулирования температуры, давления, разрежения и других параметров. В качестве рабочей жидкости в гидравлических регуляторах применяются вода или масло, подаваемые в регулятор специальным насосом. Принцип, положенный в основу одной из конструкций регулятора этого типа, показан на рис. 200.

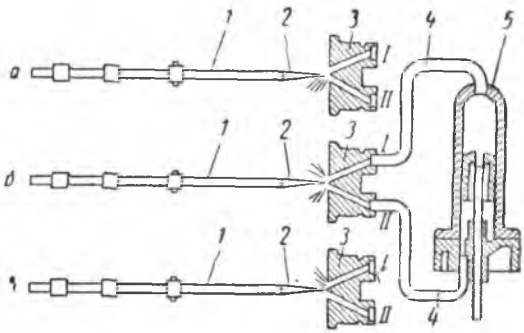


Рис. 200. Принцип работы регулятора непрямого действия.

Масло под давлением около 5 *ати* поступает в так называемую струйную трубку *1* через ее полую, легко поворачивающуюся ось и вытекает со значительной скоростью через сопло *2*. Напротив сопла находится распределительный патрон *3* с двумя отверстиями, соединенными трубками 4 с обеими полостями цилиндра *5*.

Если струйная трубка отклонена от среднего положения и лежит против одного из отверстий распределительного патрона (положение *а* и *в* на рис. 200), то в одной из полостей цилиндра создается давление большее, чем в другой, и поршень соответственно перемещается.

Шток поршня соединен с рабочим органом регулятора, вследствие чего при перемещениях поршня изменяется положение клапана или дросселя.

При среднем положении струйной трубки *1* (положение *б* на рис. 200) давление по обеим сторонам поршня одинаково, и он остается неподвижным.

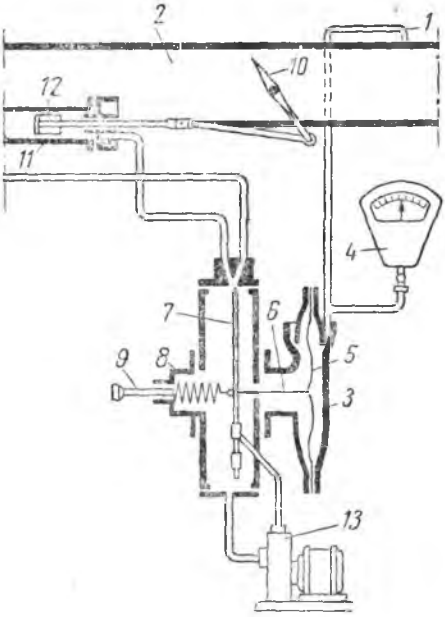


Рис. 201. Схема регулятора давления газа непрямого действия.

Регулятор давления непрямого действия. На рис. 201 представлена схема регулятора этой системы для поддержания определенного давления в газопроводе.

Давление газа, измеряемое в точке *1* газопровода *2*, передается в корпус регулятора *3* и одновременно измеряется контрольно-измерительным прибором *4*. Давление газа воспринимается мембраной *5* и при помощи штифта *6* сообщается струйной или влияющей трубке *7*. При помощи пружины *8* и установочного винта *9* влияющая трубка устанавливается в среднее положение, отвечающее состоянию равновесия регулятора и определенной степени открывания дросселя *10*.

При отклонении давления газа от заданной величины влияющая трубка отклонится от среднего положения и займет положение, соответствующее *а* или *в* на рис. 200. В силу этого давление масла в одной из полостей цилиндра *11* увеличивается, а в другой—уменьшается, что вызывает перемещение поршня *12* и соответствующую перестановку дроссельного клапана, благодаря чему давление газа в газопроводе будет выравнено. Для подачи масла в регулятор служит насос *13*.

На рис. 202 представлена схема установки контрольно-измерительных приборов и регулятора давления у газогенератора.

Чем больше давление дутья, тем больше и количество воздуха, нагнетаемого в газогенератор, тем выше производительность газогенератора (при прочих оптимальных условиях) и больше давление газа при выходе его из газогенератора. Поэтому импульс для приведения в действие регулятора воздушного дутья берется на выходе газа из газогенератора.

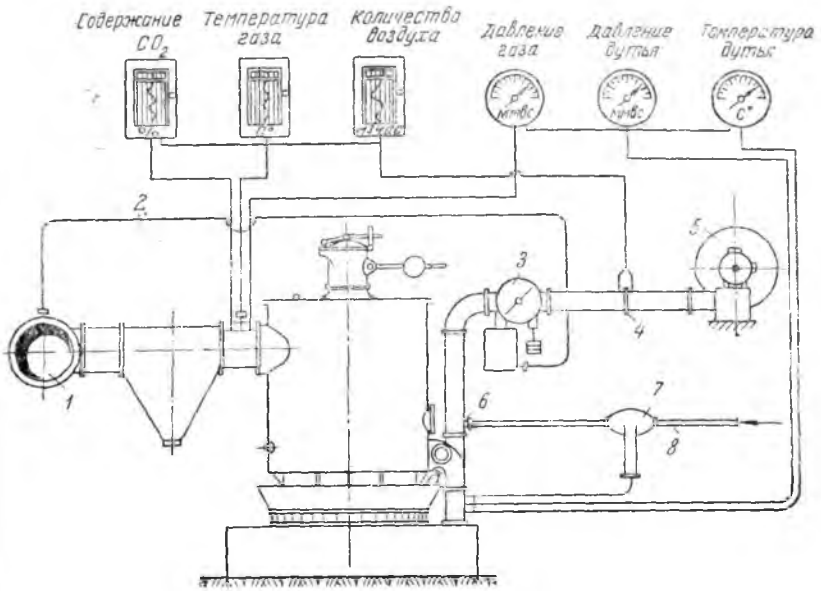


Рис. 202. Схема установки контрольно-измерительных приборов и регулятора давления у газогенератора: *1*—газопровод; *2*—передача импульса к регулятору; *3*—регулятор давления воздуха; *4*—диафрагма для измерения количества воздуха; *5*—вентилятор; *6*—смесительное сопло; *7*—регулятор подачи пара; *8*—паропровод.

Схема комплексного автоматического регулирования режима обжига в туннельной печи представлена на рис. 203. Навстречу выходящему из зоны обжига печи материалу двумя вентиляторами *1* подается охлаждающий воздух. Количество этого воздуха регулируется в зависимости от его температуры в начале зоны охлаждения. Температура воздуха изменяется терморегулятором *2*, который с помощью сервомотора *3* меняет положение дроссельных заслонок *4* на всасывающих патрубках вентиляторов.

Температура в зоне обжига измеряется радиационным или термоэлектрическим пирометром *5*. Импульс от него подается к регулятору *6*, который через блок упругой обратной связи *7* и

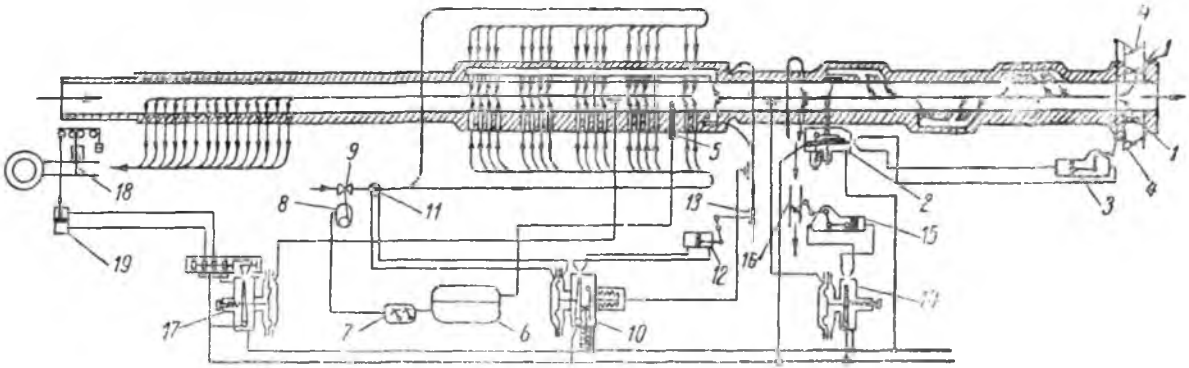


Рис. 203. Схема комплексного автоматического регулирования режима обжига в туннельной печи.

моторный исполнительный механизм *8* управляет подачей газа в печь, переставляя клапан *9*.

Горячий воздух для горения отбирается из зоны охлаждения эжектором и по каналам подводится к горелкам. Количество его определяется давлением эжектирующего холодного воздуха, который подводится к регулятору *10*. К регулятору подводится также перепад давлений, характеризующий расход газа, получаемый на дроссель-шайбе *11*. При изменениях расхода газа регулятор *10* с помощью сервомотора *12* и вентиля *13* изменяет давление эжектирующего воздуха.

Для горения расходуется не весь воздух, проходящий через зону охлаждения. При постоянстве давления эжектирующего воздуха, количество его, подводимое к горелкам, зависит от давления в начале зоны охлаждения. Расход воздуха при горении поддерживается неизменным только при условии постоянства давления в начале зоны охлаждения. Это постоянство осуществляется регулятором *14*, который, измеряя давление с помощью сервомотора *15* и дроссельной заслонки *16*, управляет количеством избыточного горячего воздуха, отсасываемого из печи в начале зоны охлаждения.

Равномерность нагрева материала в зоне обжига в значительной мере зависит от заполнения газами туннеля печи. Постоянство этого параметра, измеряемого по давлению под сводом в зоне обжига, регулируется прибором *17*, управляющим подъемом дымового шибера *18* с помощью сервомотора *19* и меняющим таким образом давление в печи.

Непрерывный рост и совершенствование социалистического производства должны происходить на базе высшей техники. Благодаря успехам отечественного машиностроения и приборостроения в настоящее время в СССР изготовляются весьма совершенные типы автоматических регуляторов. Это создает условия для перехода к комплексной автоматизации режимов работы печей, сушилок и других тепловых установок.

Автоматическое управление тепловыми процессами является мощным средством технического прогресса в промышленности строительных материалов.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОВТОРЕНИЯ К ДВЕНАДЦАТОМУ РАЗДЕЛУ

1. Каковы цели теплотехнического контроля в производстве строительных материалов?
2. Перечислите главнейшие типы приборов для измерения температуры.
3. Изложите принцип действия термоэлектрических пирометров.
4. Какими приборами вы пользовались на производственной практике для определения температур в топках, печах и сушилках? Объясните их устройство.
5. В чем различие между пирометрами частичного и полного излучения?
6. Какие пирометры вы рекомендуете для измерения температуры в ванных стекловаренных печах?

7. Какие приборы применяются для измерения малых величин давлений и разрежений в тепловых установках?

8. На каком законе физики основано применение дроссельных приборов для измерения количества газа (жидкости)?

9. На чем основано действие химических газоанализаторов?

10. Расскажите, как вы работаете с ручным химическим газоанализатором?

11. В чем состоит принцип действия электрических газоанализаторов?

12. Как осуществляется теплотехнический контроль на заводе строительных материалов?

13. Для чего проводятся теплотехнические испытания печей, сушилок, газогенераторов?

14. Опишите схему теплотехнического контроля туннельной (ванной, вращающейся, шахтной) печи.

15. Какие величины характеризуют газогенераторный процесс?

16. В чем преимущества автоматического управления тепловыми процессами?

17. Какие регуляторы называются регуляторами прямого и непрямого действия?

18. Опишите устройство регулятора давления непрямого действия.

19. Изложите схему автоматического регулирования работы туннельной печи.

20. Какие достижения в области автоматического управления тепловыми процессами на заводах строительных материалов вы знаете?

ПРИЛОЖЕНИЯ

СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТОВ ТЕПЛОВЫХ УСТАНОВОК ПРИ КУРСОВОМ И ДИПЛОМНОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ

Характеристика некоторых главнейших видов топлива[1]

Месторождение, бассейн, топливо	Марка	Условно горючая масса топлива							Сухое топливо	Рабочее топливо	
		% $V^г$	% $C^г$	% $H^г$	% $S^г$	% $N^г$	% $O^г$	$Q^г_н$ ккал/кг	$A^с$ %	$W^р$ %	$Q^р_н$ ккал/кг
Ископаемые угли											
Донецкий бассейн	Д	43	75	5,5	5,8	1,6	12,1	7200	22,5	12	4900
То же	Г	39	80,5	5,4	4,3	1,5	8,3	7700	16	8	5900
»	ПЖ	32	83	5,1	4,8	1,5	5,6	8000	20	6	5980
»	Т	12	90	4,2	2,2	1,5	2,1	8260	14	4	6800
»	АП, АК	4	94	1,8	1,9	1,0	1,3	8050	5	5	7240
»	АМ, АС	4	93,5	1,8	1,7	1,0	2,0	8000	13	6	6510
»	АРШ	4	93	1,8	2,2	1,0	2,0	7970	15	6	6326
»	АШ	4	92,5	1,8	2,2	1,0	2,5	7930	18,5	6,5	6000
Анжеро-Судженское, Ленинское, Араличевское — Кузнецкий бассейн	ПС	15	91	4,3	0,7	1,9	2,1	8340	13	6	6790
	Г	39	83	5,8	0,7	2,7	7,8	7910	11	8,5	6390
	Т	10	89	4,1	0,7	2,0	4,2	8150	16	5,5	6440
Карагандинский бассейн	ПЖ/ПС	27	85	5,1	1,0	1,4	7,5	8000	23	8	5620
Подмосковный бассейн	Б	45	67	5,0	5,9	1,3	20,8	6240	35	32,5	2540
Печорский бассейн	ПЖ	30	85	5,3	1,3	2,3	6,1	8070	23	10	5530
Ткварчельское, Тквибульское — Грузинская ССР	ПЖ	35	80,5	5,9	2,1	1,7	9,8	7630	35	6	4630
	Г	40	77,5	5,8	2,4	1,5	12,8	7380	30	12	4470
Кизеловское — Урал	ПЖ	40	78	5,6	8,8	1,3	6,3	7680	33	5	4850
Богословское — Урал	Б	45	70	4,5	0,7	1,3	23,5	6130	20	29	3310
Егоршинское — Урал	А	7	90,5	3,7	0,6	0,6	4,6	8080	24	5,5	5770
Челябинское — Урал	Б	43	73	5,2	1,6	1,7	18,5	6720	30	19	3700

[1] По данным Всесоюзного теплотехнического института имени Ф. Э. Дзержинского.

Месторождение, бассейн	Марка	Условно горючая масса топлива							Сухое топливо	Рабочее топливо	
		% $V^г$	% $C^г$	% $H^г$	% $S^г$	% $N^г$	% $O^г$	$Q^г_н$ ккал/кг	$A^с$ %	$W^р$ %	$Q^р_н$ ккал/кг
Ленгеровское . . } Средняя Азия	Б	40	74,5	5,0	3,6	1,0	15,9	6880	22	27	3750
Кизил-Кийское . } Средняя Азия	Б	38	75	4,3	2,7	0,9	17,1	6800	15	27	4050
Ангренское . . . } Средняя Азия	Б	37	75	3,9	2,7	0,9	17,5	6520	30	32,5	2880
Черемховское (Восточная Сибирь)	Д	45	78	5,7	1,4	1,6	13,3	7400	17	12	5330
Горючие сланцы											
Эстонское	—	81	73,5	9,4	5,1	0,3	11,7	7990	63	10	2600
Гдовское (Ленинградская обл.) .	—	81	73,5	9,5	4,7	0,3	12,1	7990	72	11,5	2040
Кашпирское (Куйбышевская обл.)	—	70	61	7,5	13,5	1,2	16,8	6550	73,5	16	1550
Савельевское (Саратовская обл.) .	—	71	61	7,7	13,2	1,1	17,0	6530	73,5	17	1500
Прочие виды топлива											
Торф кусковой	—	70	57,8	6,0	0,3	2,5	33,4	5240	11	40	2560
» фрезерный	—	70	57,8	6,0	0,3	2,5	33,4	5240	11	50	2030
Дрова	—	85	51,0	6,1	0,0	0,6	42,3	4510	1	35	2700
Мазут малосернистый	40	—	87,5	11,2	0,6	0,7	—	9750	0,15	3	9420
Мазут сернистый	40	—	85,3	11,0	3,2	0,5	—	9610	0,25	3	9280

Приложение II

Средние теплоемкости газов от 0° до 2500° в *ккал/нм³ град* *

t°C	CO_2	N_2	O_2	H_2O	Сухой воздух	H_2	CO	CH_4	C_2H_4	H_2S	SO_2
0	0,3805	0,3088	0,3116	0,3569	0,3093	0,305	0,311	0,374	0,417	0,362	0,414
100	0,4092	0,3096	0,3145	0,3596	0,3106	0,308	0,311	0,395	0,503	0,368	0,433
200	0,4290	0,3106	0,3190	0,3635	0,3132	0,310	0,313	0,422	0,556	0,376	0,451
300	0,4469	0,3122	0,3240	0,3684	0,3147	0,311	0,315	0,452	0,604	0,384	0,468
400	0,4628	0,3146	0,3291	0,3739	0,3175	0,311	0,318	0,483	0,650	0,393	0,482
500	0,4769	0,3173	0,3339	0,3796	0,3207	0,312	0,321	0,512	0,691	0,402	0,495
600	0,4885	0,3203	0,3385	0,3856	0,3241	0,313	0,325	0,542	0,728	0,411	0,505
700	0,5008	0,3235	0,3426	0,3920	0,3275	0,314	0,328	0,569	0,762	0,420	0,514
800	0,5110	0,3266	0,3464	0,3985	0,3307	0,315	0,332	0,596	0,798	0,429	0,522
900	0,5204	0,3297	0,3498	0,4050	0,3338	0,316	0,335	0,620	0,824	0,437	0,529
1000	0,5288	0,3325	0,3529	0,4115	0,3367	0,317	0,338	0,674	0,852	0,445	0,535
1100	0,5363	0,3354	0,3558	0,4180	0,3396	0,319	0,341	—	—	—	—
1200	0,5433	0,3380	0,3584	0,4244	0,3422	0,321	0,344	—	—	—	—
1300	0,5495	0,3406	0,3608	0,4306	0,3448	0,323	0,346	—	—	—	—
1400	0,5553	0,3430	0,3631	0,4367	0,3472	0,325	0,349	—	—	—	—
1500	0,5606	0,3453	0,3653	0,4425	0,3494	0,327	0,350	—	—	—	—
1600	0,5655	0,3473	0,3673	0,4482	0,3515	0,329	0,351	—	—	—	—
1700	0,5701	0,3493	0,3693	0,4537	0,3534	0,331	0,353	—	—	—	—
1800	0,5744	0,3511	0,3712	0,4590	0,3552	0,333	0,355	—	—	—	—
1900	0,5783	0,3529	0,3730	0,4640	0,3570	0,334	0,357	—	—	—	—
2000	0,5820	0,3545	0,3747	0,4689	0,3586	0,336	0,360	—	—	—	—
2100	0,5855	0,3560	0,3764	0,4736	0,3602	0,338	0,361	—	—	—	—
2200	0,5887	0,3574	0,3781	0,4780	0,3616	0,340	0,363	—	—	—	—
2300	0,5919	0,3588	0,3796	0,4822	0,3631	0,342	0,364	—	—	—	—
2400	0,5947	0,3601	0,3810	0,4864	0,3644	0,344	0,365	—	—	—	—
2500	0,5974	0,3613	0,3825	0,4903	0,3657	0,346	0,367	—	—	—	—

* По данным Всесоюзного теплотехнического института имени Ф. Э. Дзержинского.

Удельный γ_y и объемный γ_o веса, коэффициент теплопроводности λ и теплоемкость c различных материалов

Наименование материала	γ_y в *кг/м³*	γ_o в *кг/м³*	t в *град.*	λ в *ккал/м час. град.*	c в *ккал/кг град.*
Асбестовое волокно	—	470	50	0,095	0,20
Асбозурит	—	650	100	0,16	—
Асбошифер	—	1900	—	0,30	0,20
Асфальт	—	2100	20	0,60	0,50
Бетон	—	2000	20	1,10	0,20
Вода	1000	—	20	0,50	1,00
Гипсовые плиты	—	1250	20	0,40	0,95
Гипсовый камень	—	1650	—	0,25	—
Глина	—	1850	—	0,6	0,21
Дерево дуб ⊥ волокнам	—	800	20	0,178	0,42
» » ‖ »	—	800	20	0,312	—
» сосна ⊥ »	—	450	20	0,092	—
» » ‖ »	—	450	20	0,22	—
Динас	—	1700—1900	—	$0,7+0,00065t$	—
Земля сухая	—	1500	—	0,119	—
Земля влажная	—	1700	—	0,565	0,48
Зола	—	450	—	0,10	0,18
Известняк	—	1800	—	0,80	0,22
Каменный уголь	—	1400	20	0,16	0,32
Кирпич глиняный	—	1800	—	0,66	0,21
Кирпич силикатный	—	1900	—	0,70	0,20
Кирпич диатомовый (теплоизоляционный)	—	550—750	50	0,13	
Лед	900	—	50	2,00	0,50
Минеральная вата	—	175—250	20	0,05	—
Магнезит (огнеупор)	—	1700—1900	—	$5,[illegible]—0,0025t$	
Портландцемент	—	1900	90	0,26	0,27
Стекло	2500	—	20	0,64	0,16
Фарфор	2400	—	95	0,89	0,26
Шамот	—	1700—1800	—	$0,6+0,00055t$	
Шлак котельный	—	850	20	0,21	0,18
Металлы					
Алюминий	2670	—	0	174,0	0,21
Латунь	8000	—	0	83,5	0,09
Медь	8800	—	0	334,0	0,09
Сталь	7900	—	20	39,0	0,11
Чугун	7220	—	20	54,0	0,12

Степень черноты ε некоторых материалов

Наименование материала	Состояние поверхности	t°C	ε
Бумага	—	20	0,924
Кирпич динасовый	Шероховатая	1100	0,85
Кирпич шамотный	Шероховатая	1100	0,75
Кирпич глиняный красный	Шероховатая	20	0,91
Краска масляная (разных цветов)	—	100	0,92—96
Лак черный матовый	—	50—100	0,97
Сажа на жидком стекле	—	1100	0,75
Стекло оконное	—	20	0,94
Толь кровельный	Шероховатая	20	0,91
Штукатурка известковая	Шероховатая	20	0,90
Металлы			
Алюминий	Неполированная	26	0,055
Медь	Окисленная	200—600	0,57—0,87
Сталь листовая	—	200—600	0,80
Чугун	Шероховатая	400	0,72

Относительная влажность воздуха в %

Температура сухого термометра в град.	Психрометрическая разница в град.																						
	0,6	1,1	1,7	2,2	2,8	3,3	3,9	4,4	5,0	5,6	6,1	6,7	7,2	7,8	8,3	8,9	9,4	10,0	10,6	11,1	11,7	12,2	12,8
23,9	96	91	87	82	78	74	70	66	63	59	55	51	48	44	41	38	34	31	28	25	22	—	—
24,4	96	91	87	83	78	74	70	67	63	59	55	52	48	45	42	38	35	32	29	26	23	—	—
25,0	96	91	87	83	79	75	71	67	63	60	56	52	49	46	42	39	36	33	30	27	24	—	—
25,6	96	91	87	83	79	75	71	67	64	60	57	53	50	46	43	40	37	34	31	28	25	—	—
26,1	96	91	87	83	79	75	71	68	64	60	57	54	50	47	44	41	37	34	31	29	26	—	—
26,7	96	91	87	83	79	76	72	68	64	61	57	54	51	47	44	41	38	35	32	29	27	24	21
27,8	96	92	88	84	80	76	72	69	65	62	58	55	52	49	46	43	40	37	34	31	28	25	23
28,9	96	92	88	84	80	77	73	70	66	63	59	56	53	50	47	44	41	38	35	32	30	27	25
30,0	96	92	88	85	81	77	74	70	67	63	60	57	54	51	48	45	42	39	37	34	31	29	26
31,1	96	92	88	85	81	78	74	71	67	64	61	58	55	52	49	46	43	41	38	35	33	30	28
32,2	96	92	89	85	81	78	75	71	68	65	62	59	56	53	50	47	44	42	39	37	34	32	29
33,3	96	92	89	85	82	78	75	72	69	65	62	59	57	54	51	48	45	43	40	38	35	33	30
34,4	96	93	89	86	82	79	75	72	69	66	63	60	57	54	52	49	46	44	41	39	36	34	32
35,6	96	93	89	86	82	79	76	73	70	67	64	61	58	55	53	50	47	45	42	40	37	35	33
36,7	96	93	89	86	83	79	76	73	70	67	64	61	59	56	53	51	48	46	43	41	39	36	34
37,8	96	93	90	86	83	80	77	74	71	68	65	62	59	57	54	52	49	47	44	42	40	37	35

Продолжение

Температура сухого термометра в град.	Психрометрическая разница в град.																						
	0,6	1,1	1,7	2,2	2,8	3,3	3,9	4,4	5,0	5,6	6,1	6,7	7,2	7,8	8,3	8,9	9,4	10,0	10,6	11,1	11,7	12,2	12,8
38,9	96	93	90	86	83	80	77	74	71	68	65	63	60	57	55	52	50	47	45	43	41	38	36
40,0	97	93	90	87	84	80	77	74	72	69	66	63	61	58	56	53	51	48	46	44	41	39	37
41,1	97	93	90	87	84	81	78	75	72	69	66	64	61	59	56	54	51	49	47	45	42	40	38
42,2	97	93	90	87	84	81	78	75	72	70	67	64	62	59	57	54	52	50	47	45	43	41	39
43,3	97	94	90	87	84	81	78	76	73	70	67	65	62	60	57	55	53	50	48	46	44	42	40
44,4	97	94	90	87	84	82	79	76	73	70	68	65	63	60	58	56	53	51	49	47	45	43	41
45,6	97	94	91	88	85	82	79	76	74	71	68	66	63	61	59	56	54	52	50	48	45	43	41
46,7	97	94	91	88	85	82	79	77	74	71	69	66	64	61	59	57	55	52	50	48	46	44	42
47,8	97	94	91	88	85	82	79	77	74	72	69	67	64	61	60	57	55	53	51	49	47	45	43
48,9	97	94	91	88	85	82	80	77	74	72	69	67	65	62	60	58	56	54	51	49	47	46	44
50,0	97	94	91	88	85	83	80	77	75	72	70	67	65	63	61	58	56	54	52	50	48	46	44
51,1	97	94	91	88	86	83	80	78	75	73	70	68	65	63	61	59	57	55	53	51	49	47	45
52,2	97	94	91	89	86	83	81	78	75	73	71	68	66	64	62	59	57	55	53	51	49	47	46
53,3	97	94	91	89	86	83	81	78	76	73	71	69	66	64	62	60	58	56	54	52	50	48	46
54,4	97	94	92	89	86	84	81	78	76	74	71	69	67	65	62	60	58	56	54	52	50	49	47
55,6	97	94	92	89	86	84	81	79	76	74	72	69	67	65	63	61	59	57	55	53	51	49	47
56,7	97	94	92	89	86	84	81	79	76	74	72	70	67	65	63	61	59	57	55	53	51	50	48
57,8	97	94	92	89	87	84	82	79	77	74	73	70	68	66	64	61	59	58	56	54	52	50	49
58,9	97	94	92	89	87	84	82	79	77	75	73	70	68	66	64	61	60	58	56	54	52	51	49
60,0	97	94	92	89	87	84	82	79	77	75	73	70	68	66	64	62	60	58	56	54	52	51	49

Абсолютная влажность воздуха в *г/м³* при 745 *мм* рт. ст.

Температура воздуха в град.	Степень насыщения φ в %										
	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	5
−15	1,39	1,25	1,11	0,97	0,83	0,70	0,56	0,42	0,28	0,14	0,07
−10	2,14	1,93	1,71	1,50	1,28	0,07	0,86	0,64	0,43	0,21	0,11
−5	3,24	2,92	2,59	2,27	1,94	1,62	1,30	0,97	0,65	0,32	0,16
0	4,84	4,36	3,87	3,39	2,91	2,42	1,94	1,45	0,97	0,48	0,24
+5	6,80	6,12	5,44	4,73	4,08	3,40	2,72	2,04	1,36	0,68	0,34
10	9,40	8,46	7,52	6,58	5,64	4,70	3,76	2,82	1,88	0,94	0,47
15	12,82	11,54	10,26	8,58	7,69	6,41	5,13	3,85	2,56	1,28	0,64
20	17,29	15,56	13,83	12,37	10,37	8,64	6,92	5,19	3,46	1,73	0,86
25	23,03	20,73	18,43	16,12	13,82	11,52	9,21	6,91	4,30	2,30	1,15
30	30,36	27,32	24,39	21,25	18,21	15,21	12,14	9,11	6,07	3,04	1,52
35	39,59	35,63	31,67	27,71	23,76	19,80	15,84	11,88	7,92	3,96	1,98
40	51,13	46,02	40,90	35,79	30,68	25,56	20,45	15,34	10,23	5,11	2,56
45	65,42	58,88	52,34	45,80	39,25	32,71	26,17	19,63	13,08	6,54	3,27
50	82,94	74,64	66,35	58,06	49,76	41,47	33,17	24,88	16,59	8,29	4,15
55	104,28	93,85	73,00	62,57	52,14	41,71	41,71	31,28	20,86	10,43	5,21
60	130,09	117,08	104,07	91,06	78,05	65,05	52,04	39,03	26,02	13,01	6,50
65	161,05	144,95	128,84	112,74	96,63	80,53	64,42	48,32	32,21	16,11	8,05
70	197,95	178,16	158,36	138,57	118,77	98,98	79,18	59,39	39,59	19,80	9,90
75	241,65	217,49	193,32	169,16	144,99	120,83	96,66	72,50	48,33	24,17	12,08
80	292,99	263,69	234,39	205,09	175,79	146,50	117,20	87,90	58,60	29,30	14,65
85	353,23	317,91	282,58	247,26	211,94	176,62	141,29	105,97	70,65	35,32	17,66
90	423,07	380,76	338,46	296,15	253,84	211,54	169,23	126,92	84,61	42,31	21,15
95	504,11	453,70	403,29	352,88	302,47	252,06	201,64	151,23	100,82	50,41	25,21
100	586,25	527,6	469,0	410,4	351,75	293,10	234,5	175,8	117,25	58,63	29,03

Коэффициенты местных сопротивлений

Места сопротивлений	Эскиз	Величина коэффициента ξ
Ввод в канал		$\xi = 0{,}5$
Внезапное сужение	F_1v_1 F_2v_2	$\xi = 0{,}5\left(1-\frac{F_2}{F_1}\right)^2$ отнесено к v_2
Внезапное расширение	F_1v_1 F_2v_2	$\xi = \left(1-\frac{F_1}{F_2}\right)^2$ отнесено к v_1
Резкий поворот на 90°		$\xi = 1{,}5$
Плавный поворот	d	r/d: 1; 1,5; 2,5; ≥5 ξ: 0,35; 0,15; 0,10; 0
Резкий поворот под углом α	α	α: 30°; 60° ξ: 0,6; 0,96
Шибер	v_1F_1 v_2F_2	F_2/F_1: 0,1; 0,3; 0,6; 0,8 ξ: 230; 17; 2; 0,5 отнесено к v_1
Поворот с изменением сечения	F_1v_1 F_2v_2	F_2/F_1: 0,5; 1,0; 2,0 ξ: 1,28; 1,5; 4,0 отнесено к v_2
Ответвления при равных скоростях		0,2 для каждого ответвления
Выход из канала	v_1	$\xi = 1$

НОРМЫ

технологического проектирования сушильных и печных цехов в промышленности строительных материалов[1]

А. Кирпично-черепичные заводы

1. Технологические показатели по производству полнотелого кирпича, принимаемые для расчетов сушилок и печей:

Показатели	Единица измерения	Способ формовки	
		полусухой	пластический
Влажность сформованного сырца . .	%	12	—
» сырца после сушки . . .	%	5	5
Начальный вес влажного сырца:			
сформованного без вакуумирования	*кг*	4,1	4,6
» с вакуумированием .	»	—	5,0
Вес сырца после сушки:			
сформованного без вакуумирования	»	3,9	3,9
» с вакуумированием .	»	—	4,3
Вес обожженного кирпича:			
сформованного без вакуумирования	»	3,8	3,5
» с вакуумированием .	»	—	3,8

2. Режим работы и продолжительность сушки и обжига. Сроки сушки кирпича и черепицы в искусственных сушилках устанавливаются в зависимости от результатов испытания сырья. Продолжительность сушки изделий в туннельных сушилках примерно в три раза короче, чем в камерных сушилках. Применение паропрогрева сырца сокращает сроки сушки на 30%.

Длительность сезонного производства кирпича, оборачиваемость сушильных стеллажных сараев и съем кирпича с 1 $м^2$ полной площади сушильного бесстеллажного сарая в сезон при сушке кирпича по способу лауреата Сталинской премии И. Г. Картавцева для некоторых районов СССР следующие:

[1] По данным проектных институтов: Гипростройматериалы, Гипроцемент, Гипростекло и Росстромпроект.

Наименование районов	Способ формовки		Число оборотов сушильных стеллажных сараев в сезон	Съем с 1 $м^2$ площади сушильного бесстеллажного сарая в сезон
	начало	конец		
Московская область . .	15/IV	1/X	11	1800
Воронежская » . .	5/IV	1/X	12	2000
Куйбышевская » . .	10/IV	15/X	11	2000
Сталинградская » . .	5/IV	25/X	12	2500
Краснодарский край . .	20/III	5/IX	18	2500
Крымская область . .	15/III	1/XI	24	3400
Свердловская » . . .	3/V	20/IX	8	1500
Новосибирская » . . .	3/V	20/IX	8	1500

3. Продолжительность обжига изделий в туннельных печах в час:

Кирпич		Блоки пустотные
полусухого формования	пластического формования	
48	40	36

Обжиг в туннельных и кольцевых печах производится непрерывно 365 дней в году.

4. Нормы съема кирпича с 1 $м^3$ обжигательного канала кольцевой печи в месяц

Сечение обжигательного канала в $м^2$	Длина обжигательного канала в $м$	Съем с 1 $м^3$ обжигательного канала в месяц (в штуках) не менее
Менее 8	Менее 70	2000
» 8	От 70 до 110	1900
» 8	Более 110	2000
Более 8	Менее 70	1900
» 8	От 70 до 110	1800
» 8	Более 110	1900

Примечания: 1. При обжиге кирпича полусухого прессования съем уменьшается на 15%.

2. Предельные величины неизбежных технологических потерь до 2%.

3. При длине печи более 110 $м$ печь должна работать на два огня.

5. Кольцевые печи с длиной обжигательного канала более 110 *м* работают на два огня.

6. При обжиге кирпича полусухого формования съем принимается на 15% ниже, чем при обжиге кирпича пластического формования.

7. Съем принимается по годной продукции с вычетом неизбежных технологических потерь при обжиге.

8. Предельные величины неизбежных технологических потерь при сушке и обжиге в процентах:

Виды изделий	Типы сушилок			Типы печей		
	туннельные	камерные	сушильные	туннельные	кольцевые	периодического действия
Кирпич полусухого формования	2	—	—	2	3	—
Кирпич пластического формования	3	3	4	2	2	—
Черепица пластического формования	3	3	5	4	5	4

9. Удельный расход топлива на сушку кирпича и черепицы, сжигаемого в подтопках дополнительно к теплу, получаемому из кольцевых печей (в *кг* условного топлива на 1000 шт. кирпича и черепицы):

Способ сушки	Камерные сушилки		Туннельные сушилки		
	пластическое формование		пластическое формование		полусухое формование
	кирпич	черепица	кирпич	черепица	кирпич
Сушка дымовыми газами без использования отходящих газов из печей	140	126	120	110	65
Сушка дымовыми газами с использованием отходящих газов из печей	100	90	90	80	25
Сушка воздухом без использования тепла из зоны охлаждения печей и без подогрева пода сушилки	190	170	170	153	75

Продолжение

Способ сушки	Камерные сушилки		Туннельные сушилки		
	пластическое формование		пластическое формование		полусухое формование
	кирпич	черепица	кирпич	черепица	кирпич
Сушка воздухом с использованием 50% горячего воздуха из зоны охлаждения печей	140	126	125	112	65
Сушка воздухом с использованием 100% горячего воздуха из зоны охлаждения печей и с подогревом пода сушилки дымовыми газами из топок	—	—	115	105	60

Примечание. При использовании отходящих газов из туннельных печей нормы расхода топлива на сушку составляют 90% от вышеприведенных норм

10. Удельный расход топлива на обжиг кирпича и черепицы (в *кг* условного топлива на 1000 шт. кирпича и черепицы):

Тип печей	Кирпич		Черепица фальцевая
	пластического формования	полусухого формования	
Кольцевые печи	140	150	140
Туннельные печи	150	150	150

Примечание. Расход топлива на обжиг в туннельных печах указан без учета к. п. д. газогенераторов; с учетом к. п. д. газогенераторов расход топлива равен 180 *кг*.

11. При расчете количества топлива на сушку и обжиг пустотелых изделий к приведенным в п. 10 величинам удельных расходов топлива следует применять коэффициент K, определяемый по формуле:

$$K = 1 - \frac{П}{200},$$

где $П$ — пустотность изделий в процентах.

Б. Предприятия по производству других изделий строительной керамики

1. Сушильные цехи

Показатели	Единица измерения	Виды керамических изделий			
		облицовочные плитки	плитки для полов	санитарно-технические изделия	канализационные трубы
Влажность изделий до сушки	%	8	8	18	18
Влажность после сушки	%	2	2	2	4
Продолжительность сушки:					
в туннельных сушилках	*час*	48	24	48	32—40
в конвейерных »	»	4	6	—	—
Плотность загрузки 1 $м^3$ внутреннего объема сушилок:					
туннельных	*кг*	336	200	35	60
конвейерных	»	24	50	35	60
Удельный расход электроэнергии на 1 *т* изделий	*квт-ч*	38	29	121	33
Затрата труда производственных рабочих на 1 *т* изделий	чел./час.	1,17	0,89	20	0,75

2. Обжиговые цехи с туннельными печами

Показатели	Единица измерения	Виды керамических изделий			
		облицовочные плитки	плитки для полов	санитарно-технические изделия	канализационные трубы
Продолжительность обжига:					
бескапсельный обжиг	*час*	60	60	32	72
политой обжиг в капселях	»	30	—	—	—
Плотность загрузки 1 $м^3$ внутреннего объема печи:					
бескапсельный обжиг	*кг*	780	450	75	260
политой обжиг в капселях	»	396	—	—	—
Выход годной продукции после отжига	%	94	94	93	92
Удельный расход условного топлива на 1 *т* изделий	*т*	0,58	0,25	1,2	0,3
Удельный расход электроэнергии на 1 *т* изделий	*квт-ч*	35	24,5	151	12,47
Затраты труда производственных рабочих на 1 *т* изделий	чел./час	13,2	8,4	68	5,75

Примечания: 1. Режим работы сушильных и обжиговых цехов принимают непрерывным в три смены 350 рабочих дней в году.

2. Плотность загрузки изделий в туннельных печах исчисляют к полезному объему печного канала, т. е. считая высоту его от пода вагонеток до замка свода. Плотность загрузки изделий в сушилках относят ко всему объему, считая высоту их от пола до перекрытия.

3. Удельные расходы топлива приведены без расхода топлива на обжиг шамота и учета к. п. д. газогенераторов, который следует принимать равным 0,75.

4. Размеры облицовочных рядовых плиток — 150×150×6 *мм*. Вес 1 $м^2$ плиток—12 *кг*. Размеры плиток для полов — 100×100×10 *мм* и 150×150×10 *мм*. Вес 1 $м^2$ плиток — 25 *кг*.

В. Известковые заводы

1. Съем извести с 1 $м^3$ полезного объема шахтных печей при пересыпном и полугазовом сжигании топлива:

при величине кусков известняка 20—40 *мм*—2000 $кг/м^3$ сутки
» » » » 40—80 »—1000 » »
» » » » 80—150 »— 500 » »

Примечание. Определение полезного объема шахтных печей при пересыпном и полугазовом сжигании топлива см. на стр. 322.

2. Удельный расход тепла на обжиг извести:

а) для шахтных печей с пересыпным сжиганием топлива—1200 *ккал/кг*;

б) для печей с полугазовыми топками:

при сжигании кускового торфа и бурых углей с предварительной подсушкой их отходящими газами из печей—1300 *ккал/кг*;

то же, но без предварительной подсушки—1500 *ккал/кг*.

3. Режим работы принимается следующий:

а) для отдельных известково-обжигательных печей — непрерывный в три смены 330 рабочих дней в году;

б) для печных цехов (две и более печей) — непрерывный в три смены 365 рабочих дней в году.

Г. Гипсовые заводы

1. Обжиг строительного гипса:

Показатели	Единица измерения	Обжиг гипса в	
		варочных котлах	шахтных мельницах
Производительность (максимальная) агрегата	*т/час*	5,6	5,6
Съем (выход) гипса с 1 $м^3$ полезного объема варочного котла . .	$т/м^3$ *час*	0,466	—
Продолжительность цикла варки	час.	1,75	—
в том числе:			
продолжительность загрузки . .	»	0,3	—
» » выгрузки . . .	»	0,1	—

Продолжение

Показатели	Единица измерения	Обжиг гипса в	
		варочных котлах	шахтных мельницах
Продолжительность горячего томления гипса после варки	час.	2,0	—
Удельный расход сырья (гипсового камня)	*т/т*	1,25	1,25
Удельный расход условного топлива на обжиг гипса	*кг/т*	55	52
Предельные величины неизбежных потерь сырья:	%	1,5	1,5
при помоле в шахтной мельнице	»	0,7	—
при варке в котле (унос)	»		

2. Сушка гипсовых изделий

Показатели	Единица измерения	Виды изделий	
		гипсовые блоки	гипсовые листы
Размеры изделий:			
длина	*мм*	795	2600—3600
ширина	»	295	1200
толщина	»	70	10
Производительность (максимальная) формовочного агрегата	*м²/час*	117	936
Тип сушилки	—	Туннельная	Роликовая шестиярусная
Продолжительность сушки	час.	21	0,8
Удельный расход пара на сушку 100 *м²* изделий	*т*	5,6(5 *ати*)	0,83(10 *ати*)
Предельная величина брака при сушке	%	2	2

Примечания: 1. Гипсовые заводы работают в три смены на прерывной рабочей неделе 295 дней в году.

2. Коэффициент использования оборудования при расчетах производительности принимается 0,9.

Д. Цементные заводы

1. Цехи размола и сушки угля. Влажность угля: начальная—15—30%; конечная—4%.

Удельный расход условного топлива на сушку угля в сушильных барабанах составляет:

Испарение влаги в %	5	8	10	13	15	20	25
Расход топлива в *кг/т* угля	15,0	20,5	25,0	32,0	37,0	50,0	64,5

Удельный расход условного топлива на сушку угля в процессе размола в мельницах составляет:

Испарение влаги в %	4	6	8	10
Расход топлива в *кг/т* угля . . .	12,0	14,6	16,8	21,4

Примечание. Сушка угля при размоле его в мельницах допускается при влажности не свыше 12%.

2. Цехи сушки гидравлических добавок. Влажность гидравлических добавок: начальная—10—30%; конечная—1—5%.

Расход условного топлива при сушке гидравлических добавок в сушильных барабанах составляет:

Испарение влаги в %	7	10	13	15	20	25
Расход условного топлива в *кг/т* угля	19,0	23,5	28,7	32,5	42,5	54,2

3. Печные цехи. Удельный расход тепла на обжиг клинкера во вращающихся печах в зависимости от влажности и химического состава сырьевой смеси составляет 1380—1540 *ккал/кг* клинкера. Расход воды на охлаждение зоны спекания печей составляет:

Длина печи в *м*	Расход в *м³/час*	
	при нагревании воды на 20—30°	при испарении воды
125	23	3,5
150	30	4,5

Годовой фонд рабочего времени сушильных и печных установок на цементных заводах — 8760 часов.

Е. Стекольные заводы

Показатели	Единица измерения	Виды стекла			
		оконное	листовое техническое	полированное	архитектурное
Выход готовой продукции с 1 $м^2$ общей площади ванной печи при введении в шихту щелочей (соды) в количествах (в %)					
не менее 60	$кг/м^2$ сутки	475	330	—	332
» » 40	»	400			
» » 20	»	380			
Съем стекломассы с 1 $м^2$ варочной части ванной печи	»	650	600	450	655
Удельный расход условного топлива на 1 *т* готовой продукции . . .	*т*	1,125	1,2	1,25—1,37	1,45

Примечания: 1. Удельные расходы топлива указаны с учетом к. п. д. газогенераторов.

2. Число рабочих дней в году: при очищенном генераторном газе—329, при неочищенном — 317.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

Предисловие 3

Введение 4

Раздел первый. **Свойства и виды топлива**

Глава I. **Общие свойства топлива** 9

1. Требования, предъявляемые к топливу 9
2. Энергетическое и технологическое топливо 9
3. Классификация промышленных видов топлива 10
4. Состав твердого и жидкого топлива 10
5. Состав газообразного топлива 13
6. Теплотворность топлива 14
7. Разложение топлива при нагревании 18

Глава II. **Виды топлива** 18

1. Дрова 18
2. Торф 21
3. Ископаемые угли 23
4. Горючие сланцы 27
5. Топочные шлаки 28
6. Жидкое топливо 28
7. Пылевидное топливо 32
8. Топливные брикеты 39
9. Газообразное топливо 39

Глава III. **Хранение топлива** 42

Задачи к первому разделу 43
Вопросы для повторения к первому разделу 44

Раздел второй. **Расчеты процесса горения**

Глава I. **Физико-химические основы процесса горения** 45

Глава II. **Расчет процесса горения** 48

1. Уравнения реакций горения 48
2. Определение расхода воздуха, необходимого для горения топлива 50
3. Определение состава продуктов горения 55
4. Материальный баланс процесса горения 58
5. Приближенный расчет процесса горения 59

Глава III. **Расчет температуры горения** 61

1. Температура горения 61
2. Расчет теоретической температуры горения 62
3. Типовой пример расчета горения 65
Задачи ко второму разделу 68
Вопросы для повторения ко второму разделу 69

Раздел третий. **Движение газов в тепловых установках**

Глава I. **Основные понятия и величины** 71

Глава II. **Причины и виды движения газов** 74

1. Виды давлений 74
2. Превращение напоров 77
3. Потери давления при движении газов 78
4. Силы, вызывающие движение газов 79
5. Виды движения газов 80
6. Пример расчета сопротивлений при движении газов . . . 83

Глава III. **Устройства и установки для перемещения газов** . . . 87

1. Вытяжные устройства для естественной тяги 87
2. Устройства и приспособления для искусственной тяги . . 88
3. Характеристика вентиляторов 91
Задачи к третьему разделу 93
Вопросы для повторения к третьему разделу 94

Раздел четвертый. **Основы теплопередачи**

Глава I. **Передача тепла теплопроводностью** 96

1. Теплопроводность при стационарном потоке тепла 96
2. Теплопроводность при нестационарном потоке тепла . . . 103

Глава II. **Передача тепла конвекцией** 105

1. Закон передачи тепла конвекцией 105
2. Влияние скорости движения на коэффициент теплоотдачи . 106
3. Формулы для определения α 109

Глава III. **Передача тепла излучением** 111

1. Излучение твердых тел 111
2. Излучение газов 116
3. Передача тепла между газами и твердыми телами . . . 118
4. Суммарный коэффициент теплоотдачи 120
5. Излучение пламени 121
6. Передача тепла от одной среды к другой через стенку . . 121
7. Передача тепла в рекуператорах и регенераторах 125
Задачи к четвертому разделу 130
Вопросы для повторения к четвертому разделу 131

Раздел пятый. **Топки печей и сушилок**

Глава I. **Топки для сжигания твердого кускового топлива** . . . 133

1. Общие сведения о топках 133
2. Топки с горизонтальной колосниковой решеткой 134
3. Топки с наклонной колосниковой решеткой 137
4. Шахтные топки 137
5. Полугазовый процесс в топках 138

6. Механизированные топки 140
7. Применение воздушного дутья в топках 143
8. Обслуживание топок для твердого топлива 144

Глава II. **Устройства для сжигания газообразного, жидкого и пылевидного топлива** 145

1. Газовые горелки 146
2. Форсунки для сжигания жидкого топлива 147
3. Горелки для сжигания пылевидного топлива 148

Глава III. **Теплотехнические расчеты топок** 149

1. Определение коэффициента полезного действия топки . . 149
2. Определение размеров топки 150
3. Расчет форсунок низкого давления для мазута 154
4. Расчет газовых горелок 155
Вопросы для повторения к пятому разделу 155

Раздел шестой. **Газификация твердого топлива и газогенераторы**

Глава I. **Общие сведения по газификации твердого топлива** . . . 157

1. Применение генераторного газа в промышленности строительных материалов 157
2. Химические реакции газогенераторного процесса 157
3. Добавка водяного пара к воздушному дутью 160
4. Состав паровоздушного генераторного газа 161

Глава II. **Типы газогенераторов** 161

1. Шахты газогенераторов 161
2. Колосниковые решетки газогенераторов 164
3. Загрузочные и шуровочные устройства газогенераторов . . 167
4. Производительность газогенераторов 167

Глава III. **Газогенераторные станции** 170

1. Схема технологического процесса 172
2. Очистка генераторного газа от пыли, влаги и смолы . . . 174
3. Техника безопасности на газогенераторных станциях . . . 177

Глава IV. **Расчеты газогенераторного процесса** 178

1. Материальный баланс газификации 178
2. Тепловой баланс газификации 179
3. Коэффициент полезного действия газогенератора 181
4. Расчеты отдельных величин процесса газификации . . . 182
5. Выбор топлива для газогенераторов 184
6. Расчет количества генераторного газа и числа газогенераторов по заданному расходу топлива 185
Вопросы для повторения к шестому разделу 186

Раздел седьмой. **Сушка и сушилки**

Глава I. **Теоретические основы сушильного процесса** 187

1. Виды сушки и общая схема сушильной установки 187
2. Свойства влажного воздуха и дымовых газов 189
3. *I—d*-диаграмма для влажного воздуха 195
4. *I—d*-диаграмма для дымовых газов 199
5. Виды влаги в материале 200
6. Основы теории сушки 201

Испарение влаги со свободной поверхности 201
Внутренняя диффузия влаги в материале 202
Кривые сушки 204
Усадка изделий при сушке 206
Определение оптимального режима сушки 206

Глава II. **Расчет сушильного процесса** 208

1. Определение количества удаляемой влаги 208
2. Теоретический процесс в сушилке 210
Аналитический метод 210
Графический метод 212
3. Практический процесс в сушилке 214
4. Графический метод определения расхода тепла и газов при сушке дымовыми газами 217
5. Варианты сушильного процесса 219

Глава III. **Типы сушилок** 221

1. Сараи для естественной сушки 221
2. Искусственные сушилки 222
Сушилки периодического действия 223
Сушилки непрерывного действия 225
3. Сравнение различных сушилок 235
Равномерность сушки 235
Тепловая экономичность сушилок 237
Регулирование режима сушки 237

Глава IV. **Устройства для подачи и отвода теплоносителя в сушилках** 239

1. Вытяжные устройства 239
2. Работа сушилок под положительным и отрицательным давлением 240
3. Источники тепла для сушилок 240

Глава V. **Расчет сушильной установки** 244

1. Определение потребной сушильной площади 244
2. Выбор установки для подачи тепла и воздуха 246
Вопросы для повторения к седьмому разделу 250

Раздел восьмой. **Печи для обжига строительной керамики**

Глава I. **Общие сведения о печах** 251

Глава II. **Печи периодического действия** 253

1. Равномерность обжига в печах периодического действия и меры для ее повышения 254
2. Размеры и конструктивные элементы печей периодического действия 255
3. Теплотехническая характеристика печей периодического действия 256
4. Использование отходящего тепла в печах периодического действия 257

Глава III. **Печи непрерывного действия с подвижной зоной обжига и неподвижным материалом** 258

1. Многокамерные печи 258
2. Кольцевые печи 261

Глава IV. **Печи непрерывного действия с неподвижной зоной обжига и перемещающимся материалом** 278

1. Устройство и работа туннельных печей 279
2. Теплотехническая характеристика туннельных печей . . . 288
3. Пуск и обслуживание туннельных печей 289

Глава V. **Тепловой баланс печей** 291

1. Приходная часть теплового баланса 291
2. Расходная часть теплового баланса 292
3. Коэффициент полезного действия печи 295

Глава VI. **Выбор системы печи** 297

Глава VII. **Примерный расчет печи для обжига керамических изделий** 299

1. Объем и размеры обжигательной камеры и канала . . . 299
2. Режим работы печи 300
3. Сокращенный тепловой расчет туннельной печи для обжига глиняного кирпича 301
4. Горение топлива 302
5. Определение расхода топлива 303
6. Приход тепла 309
   Тепловой баланс зоны охлаждения 310
   Вопросы для повторения к восьмому разделу 312

Раздел девятый. **Печи для обжига вяжущих веществ**

Глава I. **Устройство и работа шахтных печей** 313

Глава II. **Шахтные печи для обжига местных вяжущих веществ** . 314

1. Типы шахтных печей 314
2. Загрузочные и разгрузочные устройства шахтных печей . . 318
3. Производительность шахтных печей 320
4. Теплотехническая характеристика шахтных печей 322

Глава III. **Автоматические шахтные печи для обжига цементного клинкера** 325

1. Конструкции автоматических шахтных печей 326
   Шахта печи 327
   Загрузочные устройства 329
   Разгрузочные устройства 329
2. Горение топлива в автоматических шахтных печах 331
3. Топливо, применяемое в шахтных печах 333
4. Аэродинамические сопротивления в шахтных печах . . . 333
5. Производительность автоматических шахтных печей . . . 334
6. Способы повышения производительности автоматических шахтных печей 335

Глава IV. **Вращающиеся печи** 336

1. Конструкция вращающихся печей 336
   Корпус печи 336
   Опоры и привод печи 338
   Головка и уплотнительные устройства 339
   Теплообменные устройства 340
   Питатели 343
2. Горение топлива во вращающихся печах 343
3. Теплотехническая характеристика вращающихся печей . . . 347

4. Производительность вращающихся печей 349
5. Мероприятия по повышению производительности и тепловой эффективности вращающихся печей 351
6. Водяное охлаждение корпуса печи 353
7. Устройства для использования тепла отходящих газов и клинкера у вращающихся печей 354
Котлы-утилизаторы 354
Шламовые фильтры 356
Испарители и подогреватели 357
Кальцинаторы 360
Холодильники 361

Глава V. **Тепловой расчет шахтных и вращающихся печей** . . . 367

1. Материальный баланс 367
Расход топлива 368
Расход сырья 368
Количество уноса 369
Расход сухого воздуха 369
Поступление влаги с воздухом 370
Количество отходящих газов 370
2. Тепловой баланс 371
3. Определение температуры горения 374
4. Пример теплотехнического расчета вращающейся печи . . 374
Тепловой баланс вращающейся печи на 1 *кг* клинкера . . 380

Глава VI. **Установки для обжига гипса** 381

1. Совмещенный помол и обжиг гипса 381
2. Варочные котлы для обезвоживания гипса 382
Вопросы для повторения к девятому разделу 383

Раздел десятый. **Печи стекольного производства**

Типы печей стекольного производства 384

Глава I. **Ванные стекловаренные печи** 385

1. Общие сведения об устройстве ванных печей 385
2. Ванные печи для варки листового стекла 386
3. Регенераторы ванных печей 390
4. Горелки ванных печей 393
5. Переводные клапаны 394
6. Теплопередача в ванных печах 402
7. Производительность ванных печей 402
8. Теплотехническая характеристика ванных печей 405
9. Пример расчета теплового баланса ванной стекловаренной печи для выработки листового стекла 407

Глава II. **Прочие печи стекольного производства** 411

1. Машинные каналы 411
2. Горшковые стекловаренные печи 412
3. Отжигательные печи 414
Вопросы для повторения к десятому разделу 416

Раздел одиннадцатый. **Установки для пропаривания строительных изделий**

Общие сведения о пропаривании (тепловодяной обработке) строительных изделий 418

Глава I. **Пропарочные камеры** 419

Глава II. **Пропарочные котлы (автоклавы)** 422

1. Устройство пропарочных котлов (автоклавов) 422
2. Теплотехническая характеристика автоклавов 424
3. Техника безопасности при работе автоклавов 426

Вопросы для повторения к одиннадцатому разделу 427

Раздел двенадцатый. **Теплотехнический контроль и автоматическое управление тепловыми процессами**

Общие сведения о типах контрольно-измерительных приборов . . . 428

Глава I. **Приборы для измерения температуры** 429

1. Керамические пироскопы 430
2. Термометры расширения 430
3. Термоэлектрические пирометры 431
4. Термометры сопротивления 434
5. Оптические пирометры 435

Глава II. **Приборы для измерения давления и разрежения газов** . 439

Глава III. **Приборы для определения скорости и количества газов** . 441

1. Напорные трубки 442
2. Анемометры 443
3. Дроссельные приборы 443

Глава IV. **Приборы для определения состава и влажности газов** . 446

1. Химические газоанализаторы 446
2. Электрические газоанализаторы 449
3. Психрометры 450

Глава V. **Организация теплотехнического контроля** 451

1. Текущий контроль работы тепловых установок 452
2. Теплотехнические испытания тепловых установок 459

Глава VI. **Автоматическое управление тепловыми процессами** . . 460

1. Регуляторы прямого действия 461
2. Регуляторы непрямого действия 463

Вопросы для повторения к двенадцатому разделу 467

Приложения. Справочные данные для расчетов тепловых установок при курсовом и дипломном проектировании:

I. Характеристика некоторых главнейших видов топлива . . 471
II. Средние теплоемкости газов от 0 до 2500° в *ккал/нм³ град* . 473
III. Удельный γ_g и объемный γ_0 веса, коэффициент теплопроводности λ и теплоемкость c различных материалов . . . 474
IV. Степень черноты ε некоторых материалов 475
V. Относительная влажность воздуха в % 476
VI. Абсолютная влажность воздуха в *г/м³* при 745 *мм* рт. ст. . 478
VII. Коэффициенты местных сопротивлений 479
VIII. Нормы технологического проектирования сушильных и печных цехов в промышленности строительных материалов 480
А. Кирпично-черепичные заводы 480

Б. Предприятия по производству других изделий строительной керамики 484
В. Известковые заводы 485
Г. Гипсовые заводы 485
Д. Цементные заводы 486
Е. Стекольные заводы 488
IX. *I—d*-диаграмма влажного воздуха при 745 *мм* рт. ст. на 1 *кг* содержащегося в нем сухого воздуха (для температур до 200°)
X. *I—d*-диаграмма влажного воздуха при 745 *мм* рт. ст. на 1 *кг* содержащегося в нем сухого воздуха (для температур до 1050°)

В. А. Китайцев, Р. М. Гурвич, И. В. Корольков

Теплотехника и тепловые установки в промышленности строительных материалов

Научный редактор канд. техн. наук **К. А. Нохратян**
Редактор И. Ф. Сокольский. Техн. редактор Н. И. Людковская.
Корректоры: Е. П. Масинева, А. А. Пузакова.

Сдано в набор I/XI—1954 г. Подп. в печать 17/XII—1954 г.
Бумага 60×92/16 33,63 п. л. (8 вклеек, 1 вкладка) 31,5 изд.л.
Л-148369 Тираж 10000 экз. Цена 12 р. 75 к. Зак. 1058.

Промстройиздат, Москва, ул. Чкалова, 46/48.
Типография Промстройиздата, г. Подольск, Рабочая ул., 17/2.

А