

666
Д 27

624.9
Д 272

В.К.ДЕЙНЕКА

ПЕЧИ и СУШИЛКИ В ПРОИЗВОДСТВЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

ГИЗМЕСТРОМ
1939

ад-11089.

Доц. В. К. ДЕЙНЕКА

Кандидат технических наук

624.91
4272.

Д Е О

ПЕЧИ И СУШИЛКИ

В ПРОИЗВОДСТВЕ
СТРОИТЕЛЬНЫХ
МАТЕРИАЛОВ

Под редакцией доктора техн. наук
проф. Б. С. Швецова

Утверждено УУЗ'ом НКМП РСФСР
в качестве учебного пособия для
ВТУЗ'ов системы НКМП РСФСР

Республиканская
научно-техническая
библиотека

ПОДПИСАНО

ГОСУДАРСТВЕННОЕ
ДАТЕЛЬСТВО МЕСТНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ РСФСР
ЛЕНИНГРАД

Цена 7 р. Пер. 2 р.

151908

В книге излагаются основы теории печей, применительно к употребляемым при производстве строительных материалов и изделий строительной керамики печам и рассматриваются их конструкции.

Книга рассчитана на слушателей Института повышения квалификации ИТР и хозяйственников НКМП РСФСР и курсов по повышению квалификации при Промакадемии им. Л. М. Кагановича, а также может служить в качестве краткого пособия для студентов ВТУЗ'ов и заводских работников силикатной промышленности.

1938

Ответственный редактор *Б. С. Швецов*
Сдана в набор 13/XI 1939 г.
Формат 62×93. Изд. № 443

Ленгорионт № 3167

Технический редактор *Б. Н. Андреев*

Подписана к печати 8/VI 1939 г.

Бум. листов 6,5. Печ. листов 13½+1 вкл.
Тип. зн. в 1 бум. л. 109440.

Тираж 3200. Уч.-авт. л. 18. Заказ № 5592

О П Е Ч А Т К И

Страница	Строка	Напечатано	Должно быть	По чьей вине
25	20 снизу	расплавается	распыливается	автора
50	4 "	I_0	λ_0	автора
50	7 "	λ	ξ	автора
90		Рис. 40 перевернуть		типографии
95	16 сверху	пирометрическим	калориметрическим	автора
169	25 "	делится	умножается	автора
193	16 снизу	$Q_p \zeta + C t$	$Q_p \zeta + C t$	автора

Дейнека. Печи и сушилки в производстве строительных материалов.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	стр.
Предисловие	4
Глава I. Топливо и его сжигание	5
1. Качественные характеристики различных топлив. (6) 2. Сжигание кускового топлива. (6) 3. Газификация кускового топлива. (13) 4. Сжига- ние кускового топлива среди материала. (17) 5. Приготовление и сжига- ние пылевидного топлива. (20) 6. Сжигание мазута. (25) 7. Сжигание газа. (26) 8. Расчет горения топлива. (27) 9. Способы нагревания воздуха и газа. (35) 10. Способы отвода дымовых газов. (37)	
Глава II. Движение газов в печах	39
1. Основные единицы измерения. (39) 2. Основные законы движения газов. (42) 3. Сопротивления движению газов. (48) 4. Газослив. (51)	
Глава III. Теплопередача в печах	55
1. Общие определения. Коэффициент теплопередачи. (55) 2. Теплопере- дача посредством теплопроводности. (57) 3. Теплопередача посред- ством конвекции. (62) 4. Теплопередача посредством лучеиспуска- ния. (65) 5. Суммарный коэффициент теплопередачи в печах. (67)	
Глава IV. Связь между физико-химическими и тепловыми процес- сами при обжиге	69
1. Обжиг вяжущих материалов. (69) 2. Обжиг керамических матери- алов и изделий. (71)	
Глава V. Печи	74
А. Классификация печей 74 Б. Печи для обжига кусковых и сыпучих материалов 76 1. Шахтные печи. (76) 2. Вращающиеся трубно-печи. (95) В. Печи для обжига формованных изделий 114 1. Периодические печи. (114) 2. Камерные печи. (123) 3. Кольцевые печи. 131 4. Туннельные печи. (143)	
Глава VI. Контроль работы печей	164
1. Измерительная аппаратура. (164) 2. Организация теплотехнического контроля. (169) 3. Составление тепловых балансов печей. (175).	
Глава VII. Сушка	186
1. Основы теории сушки. (186) 2. Определение основных параметров сушки. (190) 3. Классификация и конструкции сушилок. (196) 4. Вентиль- ационная система сушилок. (206) 5. Основные расчетные и эксплуата- ционные данные сушильных установок. (208)	

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящее руководство по курсу печей и сушилок, применяемых в промышленности строительных материалов при производстве вяжущих веществ и строительной керамики, составлено в качестве краткого пособия для повышения квалификации работников промышленности стройматериалов.

В этой работе излагаются основы теории печей, применительно к указанным печам и сушилкам, причем автор ставил своей целью предоставить читателям возможность проработки отдельных теплотехнических вопросов, используя в качестве основного одно пособие. Основы технологии вяжущих веществ и строительной керамики в данном руководстве не излагаются, поскольку они составляют предмет специального курса и по ним имеются соответствующие пособия.

Глава I

ТОПЛИВО И ЕГО СЖИГАНИЕ

При производстве стройматериалов используется большинство видов технического топлива: твердого, пылевидного, жидкого и газообразного. При этом всемерно должны использоваться местные виды топлива, применение которых сокращает как потребление высокоценных топлив, так и их перевозку.

Под местным топливом обычно понимают те виды топлива, которые по своей теплоценности и техническим свойствам (повышенному содержанию балласта, т. е. золы и влаги) не оправдывают перевозки на далекие расстояния. К ним относятся подмосковный и ряд добываемых на окраинах Союза углей, торф, горючие сланцы и естественный газ.

Общий расход топлива при производстве стройматериалов весьма значителен, точно так же, как и топливная составляющая в стоимости 1 *т* материалов. Сравнительный расход топлива на обжиг основных видов стройматериалов может быть приближенно охарактеризован данными табл. 1.

Таблица 1

Сравнительный расход топлива при обжиге различных материалов

Наименование материала	Удельный расход тепла на 1 кг обожженных материалов или изделий (в кал)	Расход топлива в проц. от веса обожженных материалов или изделий	
		Условное топливо 7000 ккал/кг	Топливо 3000 ккал/кг
Портланд-цементный клинкер: при обжиге во вращающихся печах	1600—2400 2000	28,5	67,0
при обжиге в шахтных печах	1000—1200 1100	16,0	54,0
Известь	1000—1400 1200	17,0	57,0
Стандартный кирпич	300—400 350	5,0	12,0
Огнеупоры (обжиг изделий и полу- продуктов, как, например, шамота и кварца)	700—1100 800	12,0	27,0

1. Качественные характеристики различных топлив

Специфические особенности протекающих при обжиге в различных печах технологических процессов предъявляют различные требования как к употребляемому для обжига топливу, так и к химическому составу поступающего в печи газового потока. Так, например, при обжиге портланд-цементного клинкера во вращающихся печах при горении топлива должна достигаться температура не ниже 1500° и топливо не должно содержать много золы, во избежание значительной ее присадки к клинкеру и понижения его качеств.

Обжиг облицовочных фарфоровых плиток должен происходить до температуры 1000° в окислительной среде, т. е. в пламенных газах, содержащих свободный кислород, а при более высоких температурах — в восстановительной среде, т. е. в пламенных газах, содержащих окись углерода (СО). Поэтому в зависимости от условий в различных печах принимается тот или иной вид топлива, которое в отличие от общетехнического называется технологическим топливом.

К естественным видам твердого топлива, употребляемого в промышленности стройматериалов, относятся дрова, торф, бурый и каменные угли, антрациты и горючие сланцы. К искусственным видам твердого топлива — кокс и древесный уголь. Пылевидным топливом является твердое топливо, которое дробится, подсушивается и перемалывается в порошок (пыль) с размерами пылинок от 0,02 до 0,2 мм (20—200 м). Жидким топливом является мазут — остаток от перегонки нефти. Газообразным — естественный газ и газы искусственные — генераторный, доменный и коксовальный.

Основные характеристики твердых топлив СССР и мазута приведены в табл. 2. Химический состав различных газов в объемных процентах приведен в табл. 3.

Пересчет с горючей массы топлива, на которую приведен элементарный состав твердых топлив, на рабочую его массу производится по формуле:

$$C^p = C^r \frac{100 - W^p - A^p}{100} \% \text{ и т. д.}$$

где: W^p и A^p — содержание балласта (влаги и золы) в рабочей массе топлива в весовых процентах.

2. Сжигание кускового топлива

В печах для обжига стройматериалов топливо сжигается или внутри печного пространства (газокамерные, гофманские и, частично, шахтные печи), или вне его в специальных топках до полного или неполного сгорания. При полном горении и следовательно окислительном пламени для сжигания топлива применяются различные типы пламенных топок (ручные колосниковые топки, выносные шахтные с наклонными и ступенчатыми колосниками и др.). Для получения неполного горения и восстанови-

Качественные характеристики твердых топлив и мазута
(по данным инж. А. И. Карелина и А. С. Коллегаева, Гос. Энергоиздат, 1932 г.)

Наименование топлива	Состав горючей массы (в проц.)					Q _н (в кал/кг)	Летучие на горючую массу (в проц.)	Состав рабочей массы (в проц.)		
	C	H	S	N	O			Wp	Ap	Sp
Дрова лиственные . . .	50,5	6,1	—	0,6	42,8	2910	85,0	30,0	0,7	—
Дрова хвойные . . .	51,0	6,15	—	0,6	42,26	2980	85,0	30,0	0,7	—
Торф машинный . . .	58,3	5,8	0,3	2,6	33,0	2680	70,0	40,0	5,1	0,2
Торф фрезерный . . .	58,3	5,8	0,3	2,6	33,0	2310	70,0	44,0	6,1	—
Каменные угли										
Артемовский (ДВК)	71,9	5,5	0,4	1,5	20,7	4300	4,80	25,6	8,9	0,4
Донецкий антрацит (средн. состав)	93,8	1,95	2,0	1,2	1,05	6820	3,5	5,5	9,2	1,8
Антрацитовый штыб АШ	93,2	1,85	2,0	1,2	1,75	6040	4,0	7,4	16,0	1,7
Длиннопламенный Д . .	77,3	5,4	3,8	1,6	11,9	5640	44,0	13,0	9,7	3,1
Газовый Г . . .	81,0	5,0	3,2	1,6	8,8	6480	39,0	5,9	10,4	2,7
Паровичный жирный ПЖ	84,6	5,2	2,6	1,6	6,0	6940	30,5	3,2	11,0	2,4
Коксовый К . . .	84,0	4,9	2,1	1,6	4,4	7120	22,0	3,5	10,3	1,9
Паровичный спекающийся ПС	85,5	4,6	2,2	1,5	3,2	7190	17,0	3,5	9,4	2,0
Тошый Т . . .	90,6	4,3	1,6	1,6	1,9	7350	13,0	3,4	8,2	1,4
Кизеловский (Урал)	80,3	5,6	7,9	1,3	4,9	5720	41,0	5,5	21,5	6,0
Подмосковный (средн. состав)	69,7	4,9	5,1	1,4	18,9	2980	45,0	32,0	18,2	2,5
Сучасковский (ДВК)	87,7	4,9	0,3	1,4	6,7	6360	25,5	3,5	17,9	0,4
Тквибульский (Закавказье)	78,5	5,7	1,5	1,5	12,8	5310	41,0	11,0	16,5	1,2
Челябинский (Урал)	75,6	5,2	1,5	1,8	17,9	4350	41,0	19,0	15,6	1,0
Суляктинский (Ср. Азия)	78,5	3,8	0,8	0,8	16,1	4680	28,5	20,3	9,4	0,9
Анжиро - Сулджанский (Кузбасс)	91,2	4,3	0,5	1,8	2,2	7250	15,5	4,0	8,6	0,5
Кемеровский (Кузбасс)	86,4	4,8	0,6	2,0	6,2	6240	29,0	8,1	12,6	0,5
Сланец Каширский . . .	71,1	8,5	14,0	1,6	4,8	2010	79,0	13,0	57,9	4,4
Мазут	86,8	12,8	0,15	—	0,15	9740	—	3,9	—	—

Таблица 9

Средний состав различных технических газов
(в объемных %)

Состав	Искусственный газ				Состав	Естественный газ		
	Доменный	Коксовый	Специальный	Генераторный		Баку	Грозный	Майкоп
CO	23,3—30,1	6,0	10,0	25,0—30,0	CH ₄	82,3—97,7	39,8—75,2	53,6—72,0
H ₂	2,4—7,8	51,0	46,0	10,0—15,0	C ₂ H ₆	0—3,0	6,0—10,8	10,8—14,2
CH ₄		28,0	33,0	0,7—2,5	C ₃ H ₈	0—0,8	8,0—19,4	6,6—11,7
—	—	3,0	5,0	0—0,5	C ₄ H ₁₀	0—1,4	5,7—17,3	1,3—8,2
CO ₂	9,0—12,7	1,0	3,0	2,5—7,0	C _m H _n	0,1—2,2	5,1—15,3	3,0—5,4
N ₂	50,7—57,4	11,0	2,5	47,0—56,5	CO ₂	2,3—13,0	—	—
$\frac{Q^P_R}{\text{кал}} \frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}$	700—1050	4500	4700	1000—1400	H ₂ S	0,1	—	—
					$\frac{Q^P_R}{\text{кал}} \frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}$	8500—9500	до 12000	—

тельного пламени применяются специальные полугазовые топки с наклонными и ступенчатыми колосниками. Как те, так и другие топки должны давать возможность широкой регулировки в зависимости от требований обжига. В полугазовых топках происходит частичная газификация топлива. Полная газификация его производится в специальных газогенераторах, которые устанавливаются или около печей, или группируются на центральной газогенераторной станции.

Для того чтобы перейти к анализу работы различных топок в зависимости от рода сжигаемого в них топлива, а также наметить рациональные конструкции топок применительно к различным печам, процесс горения твердого кускового топлива можно условно подразделить на основные фазы горения и охарактеризовать его протекание графически. Если по оси абсцисс отложить длину пути топлива, а по оси ординат — элементарный состав (в процентах) рабочей массы топлива, откладывая по оси ординат содержание золы (A^P), углерода (C^P), соединений кислорода с азотом ($O_2 + N_2$)^P, водорода (H_2)^P и содержание влаги (W^P), то по мере продвижения топлива по решетке (например на цепных решетках) или пребывания топлива в нагретом пространстве топки вначале происходит сушка топлива и содержание влаги его начинает постепенно уменьшаться.

По мере нагревания топлива из сухой его массы начинают выделяться летучие ($O_2 + N_2$ и H_2), количество которых также неуклонно убывает по приведенной кривой. Вслед за выделением летучих начинается горение кокса, вначале незначительное,

затем весьма энергичное (кривая уменьшения содержания углерода в рабочем топливе резко понижается), которое постепенно растягивается на продолжении всего остального пути горения. Выжигание углерода из минеральной массы топлива (зола и шлака) по мере уменьшения содержания углерода все более затрудняется. Полное выжигание углерода практически не достигается, почему кривая содержания углерода почти никогда не доходит до нуля.

Исходя из приведенного анализа, весь процесс горения кускового топлива можно подразделить на следующие четыре основных фазы: 1) подсушка топлива, 2) возгонка летучих, 3) горение кокса и 4) выжигание шлака.

Графическое изображение выгорания элементов каменного угля среднего состава приведено на рис. 1. Как видно из этого рисунка, основные фазы горения следуют одна за другой по пути выгорания топлива, частично перекрывая друг друга. Если в

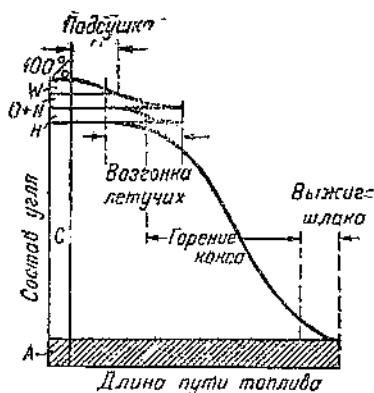


Рис. 1. Выгорание элементов каменного угля

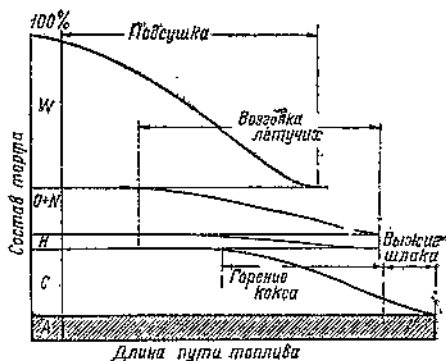


Рис. 2. Выгорание элементов торфа

качестве топлива применяются влажный торф или влажные дрова, график выгорания элементов топлива будет иметь несколько иной характер, представленный на рис. 2.

Первая фаза горения — подсушка топлива — сильно развита, точно так же, как и вторая фаза — возгонка летучих. Следовательно, толпки для сжигания влажных дров и торфа должны иметь достаточно развитую и рационально сконструированную сушильную камеру, в которой происходит подсушка влажного топлива. Так как испарение влаги происходит со значительной затратой тепла, камера подсушки должна иметь теплоотдающие поверхности сводов. Наиболее отвечающими указанным требованиям являются шахтные выносные толпки с наклонными и ступенчатыми колосниками.

При сжигании горючих сланцев, содержащих большое количество золы (рис. 3), которая к тому же весьма легкоплавка, четвертая фаза горения — выжигание углерода из шлака — особенно затрудняется и растягивается, и для того, чтобы облегчить

ее нормальное протекание, в топке следует непрерывно перемешивать (ворошить) горящий слой топлива. Для этой цели наиболее подходящей является топка с наклонными переталкивающими колосниками.

Таким образом, исходя из анализа процесса горения, намечаются рациональные конструкции топок для сжигания различ-

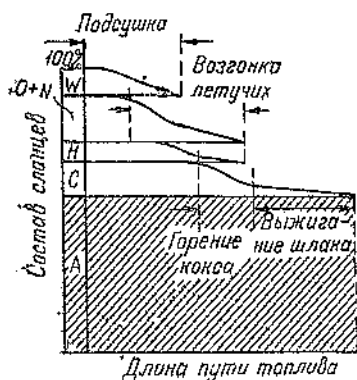


Рис. 3. Выгорание элементов горючих сланцев

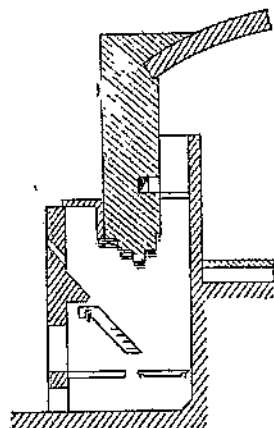


Рис. 4. Схема полугазовой топки периодической печи

ных топлив. При переводе предприятий с одного вида топлива на другой приходится частично или полностью реконструировать топочные устройства, осуществляя наиболее благоприятные для сжигания данного вида топлива условия.

Каждая топка должна иметь хорошо продуманный беспрепятственный подвод необходимого для горения воздуха и свободное удаление продуктов горения. Если разрежение в топке недостаточно, воздух подается при помощи вентилятора. Это особенно относится к топкам, обслуживающим всевозможные печи, так как обычно, исходя из условий обжига, в печах и топках сушильных барабанов осуществляются весьма незначительные разрежения.

Топки, снабженные вентиляторным дутьем, устанавливаются например у периодических и шахтных печей. Если в этих топках работают без дутья, количество топлива, сжигаемого в час на 1 м^2 площади решетки, меньше, чем в котельных топках и составляет от 50 до 80 кг для каменного угля, от 60 до 100 кг для бурого угля и от 80 до 120 кг для дров. При работе с дутьем напряжение 1 м^2 решетки возрастает.

Полугазовый или полугенераторный процесс горения топлива может быть осуществлен в топках полного горения в том случае, если топливо в них сжигается толстым слоем с недостаточным количеством воздуха. Более организованно полугазовое горение происходит в специальных полугазовых топках с наклонными ступенчатыми колосниками (рис. 4).

При полугазовом процессе сжигания топлива в топке производится предварительная газификация топлива, продукты которой в виде полугенераторного газа (полугаза) переносятся в рабочую полость печи (в периодических, камерных, туннельных и шахтных печах), где производится дожигание полугаза со вторичным воздухом и достигаются максимальные температуры горения.

Если в этом случае применить график выгорания элементов кускового топлива, то при полугазовом процессе основное значение приобретает вторая фаза горения — возгонка летучих, которая должна быть организована таким образом чтобы получить максимальное количество продуктов газификации. При этом процесс газификации должен непрерывно поддерживаться за счет теплоты, выделяющейся при сгорании кокса, т. е. за счет третьей и четвертой фаз горения. Так как горение происходит в толстом слое топлива, протекание четвертой фазы — выжигания шлака — обычно затрудняется значительными количествами золы и шлаков, скапливающихся в нижней части шахтной топки.

Химический состав поступающего из топок в печь полугаза может быть определен путем расчета и соответствует смеси газов, промежуточной между продуктами полного горения и генераторным газом. Основными горючими элементами полугаза является окись углерода (CO) и водород (H_2), которые и сгорают в печах.

Химически связанная теплотворная способность и температура выходящего из топок полугаза также являются промежуточными между продуктами полного сгорания топлива и генераторным газом. Температура колеблется в пределах $800\text{--}950^\circ$, теплотворная способность в пределах $400\text{--}800 \text{ кал/м}^3$.

Состав практически получаемого полугаза обычно содержит меньше горючих элементов, чем расчетный состав, так как режим работы полугазовых топок подвержен колебаниям, связанным с периодической загрузкой топлива и чистой топки. Состав полугаза при сжигании различных топлив приведен в табл. 4.

Основным элементом полугазовых топок является наклонный колосник, снабженный в нижней части ступеньками. Угол наклона колосника зависит от угла естественного откоса топлива, который колеблется для углей в пределах от 43 до 45° . Для того чтобы слой топлива несколько утолщался в нижней части топки, наклон колосника к горизонту обычно делается в $45\text{--}50^\circ$. Если угол наклона колосника меньше угла естественного откоса, слой топлива с трудом передвигается по колоснику и утоньшается в нижней части топки, затрудняя работу кочегара и приводя к прорывам воздуха в части горизонтальных колосников. В зависимости от рода и размеров топлива толщина слоя топлива в полугазовых топках составляет от 400 до 1000 мм .

При большой толщине слоя топлива воздух под колосники подается вентилятором под давлением $50\text{--}150 \text{ мм вод. ст.}$ Количество угля, сжигаемого в час на 1 м^2 площади решетки (под площадью решетки здесь принимается активная поверхность участвующего в горении топлива), в полугазовых топках со-

Таблица 4

Состав полугаза из различных топлив

Наименование элементов	Подмосковный уголь		Гловские сланцы	29 проц. Глов- ских сланцев и 71 проц. дров	Состав по- лугаза в топках пе- риодиче- ских печей
	По рас- чету	В топках шахтных печей	В топках шахтных печей		
Состав (в объемных проц.)					
CO	18,25	8,0—10,0	3,86	3,97	4,0—6,0
H ₂	10,20	6,0—8,0	3,86	4,15	3,0—5,0
CH ₄	—	1,0	0,9	0,32	—
C _m H _n	—	—	0,63	0,16	—
O ₂	—	2,0	0,76	1,00	—
CO ₂	9,19	10,0—12,0	10,33	9,39	—
H ₂ O	14,51	—	13,40	27,20	—
N ₂	52,85	67,0—73,0	66,76	53,80	—
Выход с 1 кг топлива (м ³)	2,75	2,5—3,0	2,07	3,06	2,0—3,0
Температура (°C)	900	850—950	670	1000	1000
Теплосодержание (кал/м ³)	320	—	236	355	250—350
Теплотворная способ- ность (кал/м ³)	676	→	370	278	250—400

ставляет для каменных углей 50—80 кг, для бурых углей 80—120 кг, для торфа 150—400 кг и для дров 250—450 кг (при наличии дутья).

В зависимости от рода печей и процесса обжига в них различных материалов и изделий, режим работы как топок полного сгорания, так и полугазовых топок бывает весьма различен. Если топка полного сгорания, например ручная колосниковая решетка, обслуживает периодическую печь, в которой обжигаются канализационные трубы большого диаметра, режим ее работы должен соответствовать режиму обжига труб и будет различен в различные периоды обжига.

В первый период, когда температура в печи не должна превышать 120°, топка на протяжении первых 22—25 часов обжига расходует только около 5 проц. от общего количества топлива (например, около 10—15 кг дров в час). Для того чтобы обеспечить печь газовым потоком такой низкой температуры, топка должна работать с большим избытком воздуха, доходящим в смеси со вторичным воздухом до $\alpha = 10—20$.

Во второй и третий период обжига на протяжении следующих 45—50 часов избыток воздуха в топке должен непрерывно уменьшаться, обеспечивая постепенное возрастание температуры

газового потока до 900° , вместе с возрастанием расхода дров до 60—85 кг в час.

Наконец в четвертый период обжига, продолжающийся 6—7 часов, когда температура в печи должна достигать 1200 — 1250° , топка расходует до 40 проц. от общего количества топлива (средний часовой расход достигает 300—350 кг дров в час), слой топлива предельно увеличивается, возникает необходимость обжига в восстановительной среде, в силу чего та же топка работает, как полугазовая, вернее, в пламенной топке должно происходить неполное горение топлива с недостатком воздуха. Продукты неполного горения топлива — СО и H_2 догорают в рабочей полости печи за счет добавления вторичного воздуха, обеспечивая в процессе горения необходимую для обжига температуру.

Таким образом, исходя из режима обжига, топка полного горения должна иметь широкие пределы регулировки и работать в отдельные моменты как полугазовая топка.

С другой стороны, полугазовая топка должна в первые периоды обжига работать как пламенная, обеспечивая печь полугазом сравнительно короткое время.

Полугазовые топки, обслуживающие шахтные печи для обжига извести, не имеют указанных колебаний в работе и должны непрерывно снабжать печь полугазом, богатым по своему составу. Режим работы этих топок значительно более равномерен, однако гидравлические условия работы менее благоприятны, так как топки целиком вынесены из печного пространства, тогда как в полугазовых топках периодических печей пространство газификации непосредственно связано с рабочей полостью печи. Отсюда вытекает и разница в их конструкции (рис. 5).

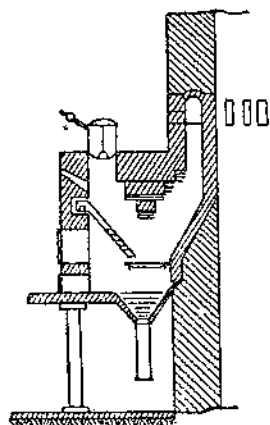


Рис. 5. Схема полугазовой топки шахтной печи для обжига извести

3. Газификация кускового топлива

По мере дальнейшего увеличения слоя топлива на колосниках состав газа получается все более богатым горючими элементами, со все более понижающейся температурой. Этот газ носит название генераторного газа, а шахты, в которых получается газ, называются газогенераторами.

В газогенератор (рис. 6) через загрузочную коробку 1 загружается топливо (каменный уголь, дрова, торф) и равномерно распределяется по шахте 2, в нижней части которой через колосниковую решетку 3 подводится воздух, водяной пар или смесь того и другого. Над решеткой помещается раскаленный слой топлива, с которым и взаимодействует воздух или водяной пар. Зола и шлак периодически удаляются с колосников. Про-

дукты газификации удаляются из генератора через отверстие 4. Соответственно происходящим в газогенераторах процессам, шахты подразделяются на зону подсушки топлива, зону перегонки, в которой выделяются продукты сухой перегонки топлива, реакциюнную зону, где происходит взаимодействие углерода кокса с воздухом и паром, и зону золы и шлака.

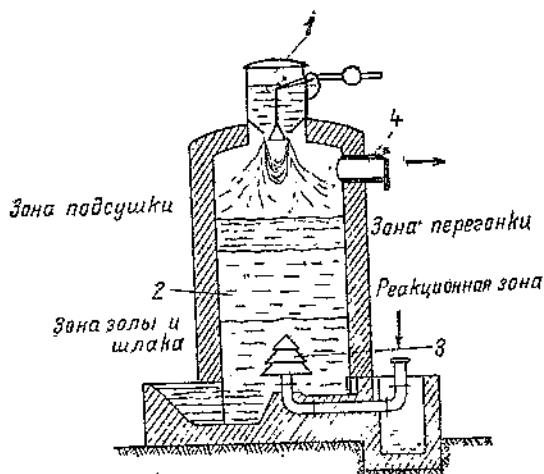
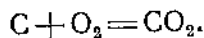


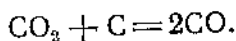
Рис. 6. Схема газогенератора

Если в генератор подается только воздух, то его кислород окисляет углерод кокса в реакциюнную зону в углекислый газ по реакции полного горения:



Проходя через вышележащий раскаленный слой кокса, углекислота, реагируя с

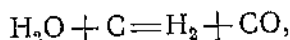
раскаленным углеродом, образует окись углерода по реакции:



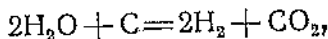
В конечном счете газ, полученный после указанных процессов, носит название *воздушного генераторного газа*.

Так как воздух содержит большое количество азота (N_2), последний переходит в воздушный генераторный газ и, являясь негорючей его частью — балластом, понижает теплотворную способность газа.

Если в генератор вдувается вместо воздуха водяной пар, он реагирует с раскаленным углеродом кокса по реакциям:

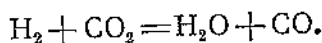


и



образуя водород, окись углерода и углекислый газ.

Водород далее реагирует с углекислым газом по реакции:



При более высоких температурах протекает первая реакция, при менее высоких — вторая. В результате получается *водяной газ*. Процесс получения воздушного газа происходит с выделением тепла, а водяного газа — с затратой его, вызывающей понижение температуры в слое топлива, почему его и прерывают, продувая через слой топлива воздух для повышения температуры слоя, а после разогрева слоя — снова водяной пар.

В том случае, когда в генератор подается смесь воздуха и водяного пара в пропорциях, обеспечивающих непрерывность процесса, получается *смешанный или паро-воздушный газ*. При вдувании водяного пара воздушный газ обогащается водородом и окисью углерода, и температура в нижних слоях топлива несколько понижается, что препятствует размягчению и плавлению золы топлива и облегчает удаление золы и шлаков с решетки генератора.

В верхней части газогенератора, где температура ниже, чем в реакционной зоне, при газификации топлив, содержащих много летучих, совместно с продуктами сухой перегонки образуются смолы и углеводороды, которые используются для дальнейшей переработки.

Современные газогенераторы снабжены приспособлениями для автоматической загрузки топлива и вращающимися решетками для механического удаления золы и шлаков. Шахта футерована изнутри огнеупорным кирпичом и снабжена водяной рубашкой, в которой получается пар.

Состав генераторного газа меняется в зависимости от способа газификации и рода топлива. Средний состав смешанного генераторного газа из различных топлив приведен в табл. 5.

Таблица 5

Средний состав сухого генераторного газа (в объемных проц.) из различных топлив
(по проф. Д. Б. Гинзбург)

Топливо	Выход газа (в м ³ кг)	CO	H ₂	CH ₄	CmHn	O ₂	CO ₂	Na	Q _H (в кал/м ³)	Температура (в °C)
Дрова	1,0—1,7	23,0	13,0	2,5	0,5	8,0 0 0 10	7,0	49,0	1300—1500	80—300
Торф	1,2—1,7	28,0	15,0	2,5	0,5		7,0	47,0	1200—1600	80—300
Бурый уголь	1,4—2,4	26,0	15,0	2,5	0,5		6,0	57,0	1150—1600	70—400
Каменный уголь	2,3—3,8	25,0	13,0	3,0	0,5		4,5	54,0	1200—1400	500—800
Антрацит	3,8—4,4	29,0	14,0	0,7	—		3,0	53,3	1150—1250	350—650
Кокс	3,8—4,4	30,0	10,0	1,0	—		2,5	56,5	1150—1250	350—650

Так как по выходе из генератора газ содержит влагу, пыль, смолы и сероводород, он подвергается специальной осушке и очистке.

К месту потребления газ подается по кирпичным или железным каналам. Для создания запаса газа, смешения различных газов и выравнивания давления служат газохранилища — газгольдеры.

Количество газифицируемого топлива в газогенераторах различно: оно зависит от рода топлива, определяется расходом топлива в кг на 1 м³ решетки газогенератора в час и представлено данными табл. 6.

Таблица 6

Интенсивность газификации различных топлив в газогенераторах различных конструкций

(в кг/м² в час)

Тип газогенератора	Дрова	Торф	Бурый уголь	Каменный уголь	Антрацит
Самодувный с неподвижной решеткой и ручным обслуживанием	100—150	50—75	50—100	35—70	—
С душем и вращающейся решеткой	400—700 ¹	200—600	150—275	80—200	80—200

Высота слоя газифицируемого топлива колеблется в широких пределах и характеризуется данными табл. 7.

Таблица 7

Высота слоя топлива над решеткой газогенератора при газификации различных топлив

Топливо	Высота слоя (в м)
Дрова	4,0—7,0
Торф	4,0—7,0
Бурый уголь	2,0—7,0
Каменный уголь	0,7—1,7
Антрацит	0,7—1,6
Кокс	1,1—2,0

Сравнительные характеристики продуктов полного горения, топлива и генераторного газа сведены в табл. 8.

¹ Щела

Таблица 8

Сравнительные характеристики продуктов полного горения, полугаза и генераторного газа из подмосковного угля

Наименование характеристик	Продукты полного горения при $\alpha = 1,4$	Полугаз, расчетный состав при $\alpha = 0,82$	Генераторный газ (сухой)
Состав газов (в объемных проц.):			
CO ₂	12,1	9,19	6,18
O ₂	5,3	—	0,37
H ₂ O	12,1	14,51	—
CO	—	13,25	24,79
H ₂	—	10,20	13,14
CH ₄	—	—	2,71
C _m H _n	—	—	0,33
H ₂ S	—	—	1,86
N ₂	70,5	52,85	50,62
Количество газов (в м ³ /кг) . . .	—	2,75	0,97
Теплосодержание газов (в кал/м ³) .	420	320	28,3
Теплотворная способность газа (в кал/м ³)	—	676	1505 ¹
Температура газов (в ° Ц)	1150	900	69,3

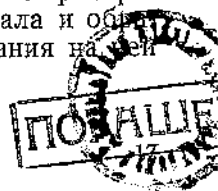
4. Сжигание кускового топлива среди материала

При сжигании твердого кускового топлива среди материала в большинстве случаев преследуется полное сгорание топлива в окислительной среде. Однако, так как подвод воздуха и отвод продуктов горения затруднены и неравномерны по сечению топливного слоя, наряду с процессом полного горения происходит частичная газификация и сухая перегонка топлива.

Если кусковое топливо сжигается среди формованных изделий, как например, в гофманских печах при обжиге кирпича, садка кирпича в топливных колодцах, расположенных под топливными трубочками, должна соответствовать специфическим особенностям горения данного вида топлива, приближаясь к соответствующим конструкциям топок.

Как правило, для мелкого топлива — фрезерный торф, антрацитовая мелочь и семечко (АС, АМ) — необходима более частая садка, чем для крупного кускового топлива. При этом садка должна быть построена таким образом, чтобы топливо распределялось равномерно по высоте обжигательного канала и обжигывал максимальную площадь решетки для сжигания на ней

¹ Теплотворная способность сухого газа (высшая).



возможно большего количества топлива. Наиболее применимой для мелкого топлива является немецкая садка, при которой кирпичи каждого продольного ряда находятся против свободного промежутка выше и ниже лежащего ряда, и топливо при загрузке через топливную трубочку проходит зигзагообразный путь, сгорая как бы на ступенчатых колосниках. Для крупных сортов каменного угля употребляется значительно более редкая садка — стыковая. При сжигании дров топливные колодцы делаются без выступов, уподобляясь вертикальным шахтным топкам, причем дрова сгорают в них стоя.

Загрузка топлива в гофманскую печь производится в тех рядах кирпича, температура нагрева которых достигает температуры воспламенения топлива. Последняя различна для разных топлив и составляет:

для торфа фрезерного и кускового	225°
„ дров	295°
„ бурого угля	370—450°
„ каменного угля	400—500°
„ антрацита и кокса	600—700°

Так как топливо загружается в несколько рядков, расположенных по ходу продуктов горения, целесообразно загружать в наименее нагретый рядок изделий наиболее легко воспламеняющееся топливо, определяя температуру нагрева рядка азотно-ртутным термометром.

Так как с одной стороны воздух в гофманских печах поступает по ходу движения топлива и с другой — топливо загружается в печь периодически, условия горения его различны не только в разных рядках, но даже в одном и том же рядке. В крайних к подводу воздуха рядках всегда имеет место больший избыток воздуха, чем в наиболее нагретых рядках; кроме того, по мере прогара порции топлива избыток воздуха при его сгорании увеличивается. Поэтому наиболее целесообразным является загрузка максимального количества топлива в средние рядки и относительно меньшего — в крайние; при этом кусковое топливо должно загружаться часто, равномерно и небольшими порциями.

При сжигании кускового топлива среди кускового материала, что имеет место главным образом в шахтных печах, применяется или послышная загрузка топлива и материала или загрузка пересыпку.

Шахтные печи представляют собой неподвижную вертикальную трубу, в верхней части которой загружается топливо и материал, а через нижнюю часть подается воздух, который нагревается, охлаждая опускающийся навстречу ему материал. Горение топлива происходит среди материала в верхней трети шахты.

По мере опускания топлива по шахте, основные фазы его горения чередуются в обычной последовательности. В верхнем горизонте шахты сырое топливо подсушивается и водяные пары удаляются вместе с отходящими из печи газами. Далее из на-

гретого от 150° до 500° сухого топлива выделяются летучие вещества и продукты сухой перегонки, которые устремляются в верхнюю часть шахты. При этом летучие сгорать не могут, так как для их горения недостаточно воздуха, который почти целиком расходуется на горение кокса, и газовая среда состоит в основном из N_2 и CO_2 . Кроме того, воспламенение летучих происходит при более высоких температурах, чем те, которые имеют место в горизонтах их выделения. Благодаря этому выделяющиеся в шахтной печи летучие вещества топлива почти полностью уносятся несгоревшими, почему в качестве топлива для шахтных печей могут служить только угли с минимальным содержанием летучих, например антрациты, кокс и древесный уголь.

По достижении температуры воспламенения топливо начинает загораться. При этом вначале горение происходит с недостатком воздуха, в значительной мере израсходованного при сжигании нижних слоев топлива. Пройдя нижний горизонт горения, воздух сильно нагревается и, так как объем его от нагревания увеличивается, он с большой скоростью проходит по узким каналам, образующимся между кусками материала. Вместе с воздухом движутся и сильно нагретые продукты горения нижних слоев топлива. Благодаря большой скорости движения воздуха и продуктов горения возрастает скорость процессов горения, а также теплопередача от газового потока материалу.

Горение кокса происходит в нижних горизонтах горения, где развиваются максимальные температуры и где воздуха для горения вполне достаточно. Выгорание углерода из шлака происходит при большом избытке воздуха среди сильно раскаленного материала; при этом зола топлива целиком остается в печи и присаживается к обжигаемому материалу.

Благодаря тому, что куски материала охватывают горящие кусочки топлива со всех сторон, топливо интенсивно отдает материалу выделяющееся при сгорании тепло; продукты же горения устремляются с большой скоростью по узким промежуткам между кусками материала в верхнюю часть шахты.

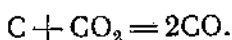
Время полного горения кускового топлива в шахте печи должно соответствовать продолжительности обжига данного материала, так как в противном случае или будет иметь место сокращение зоны обжига, или часть топлива будет выходить из печи несгоревшей.

В данном случае основное значение имеют размеры кусков топлива, которые зависят от скорости его горения, и должны соответствовать времени пребывания топлива в зоне обжига.

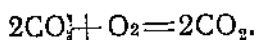
В том случае, когда сырой материал перемалывается и прессуется в брикеты, предварительно раздробленный антрацит или кокс впрессовывается в материал. Для более равномерного распределения топлива среди массы материала антрацит иногда размалывается вместе с сырьем в порошок, перемешивается в процессе размола и затем прессуется в брикеты. Процесс горения в молотого топлива более сложен и затруднен, но обуславливает значительно более равномерный обжиг материала.

При пересыпном способе обжига, горение топлива происходит путем прямого соединения топлива с воздухом, и углерод топлива сгорает в углекислоту (CO_2).

При впрессованном или вмолом топливе, когда каждая его частица со всех сторон окружена плотной массой материала, доступ воздуха внутрь брикета значительно затруднен, и углерод топлива взаимодействует с сырьевой массой, реагируя с углекислотой, выделяющейся в процессе разложения углекислого магния и кальция (MgCO_3 и CaCO_3), входящих в состав большинства вяжущих материалов, по реакции:



Образовавшаяся в брикете окись углерода смешивается на поверхности брикета с кислородом воздуха и сгорает по реакции:



При этом выделяются значительные количества тепла, способствующие обжигу.

Таким образом процесс горения глубоко впрессованных в брикет пылинок топлива в упрощенном виде можно представить по следующей схеме: подсушенные в верхних горизонтах шахтной печи брикеты теряют влагу и, слегка растрескиваясь, нагреваются. В силу повышения температуры начинается разложение углекислого магния (MgCO_3) и кальция (CaCO_3) сопровождающееся выделением углекислого газа (CO_2), который начинает реагировать с нагретыми до 600—900° пылинками глубоко впрессованного топлива, образуя окись углерода (CO). Последняя пронизывает распадающийся брикет, выходит на его поверхность и, встречая на своем пути кислород воздуха, сгорает в углекислоту (CO_2), выделяя большие количества тепла, прогревающие ядро брикета, реакции в котором протекают в той же последовательности. В противоположность глубоко впрессованным пылинкам топлива, пылинки, расположенные около поверхности брикета, с повышением температуры воспламеняются и сразу сгорают в углекислоту (CO_2).

Таким образом, до 50 проц. топлива сгорает непосредственно в CO_2 и около 50 проц. подвергается как бы двухступенчатому сгоранию с образованием сначала CO , а затем — CO_2 . Более полную и точную картину процесса горения вмолого в брикеты топлива представить пока затруднительно, ввиду отсутствия экспериментальных данных, сложности происходящих процессов и трудности их изучения внутри шахты.

5. Приготовление и сжигание пылевидного топлива

Твердое топливо, перемолотое в порошок (пылевидное топливо), при сжигании его в топках котельных или рабочих полостях печей имеет ряд преимуществ перед кусковым топливом. Основные преимущества при сжигании пылевидного топлива заключаются в том, что при этом достигается более высокая

температура горения и возможность легко использовать местные виды топлива, значительно облегчается пуск и остановка топок и возможность изменения режима их работы, упрощается конструкция топочных устройств и их обслуживание. К недостаткам, ограничивающим применение пылевидного топлива, следует отнести высокую стоимость его приготовления и повреждение золой и шлаками поверхности обжигаемых изделий.

В дальнейшем применение пылевидного топлива рассматривается в условиях его сжигания в печах для обжига стройматериалов, главным образом, во вращающихся трубопечах, являющихся основным потребителем пылевидного топлива.

Приготовление пылевидного топлива состоит из предварительного его дробления, подсушки и размола.

Дробление топлива необходимо для обеспечения равномерной его подсушки; при дроблении употребляются щечные, ударные и вальцовые дробилки; размеры дробленых частиц топлива колеблются от 0 до 15—20 мм.

Сушильные барабаны (см. раздел „Сушка“) — для сушки топлива обычно работают по принципу прямого (параллельного) тока; тощий уголь и антрациты, содержащие мало летучих веществ, можно сушить и противотоком. Так как начальная температура сушки различных топлив достаточно высока, барабаны снабжаются индивидуальными топками — ручными колосниковыми решетками с искусственным дутьем, — шахтными или пылевыми толками.

Перемешивающие приспособления сушильных барабанов состоят из корытного железа, полочек или ячеек, расположенных в шахматном порядке вдоль оси барабана, что значительно повышает их производительность по сравнению с барабанами без перемешивающих устройств или снабженных швеллерами, наклепанными с внутренней поверхности кожуха.

Начальные температуры сушки топлива в прямоточных сушильных барабанах составляют (в °C):

для подмосковного угля	400 — 450°
„ длиннопламенного и газового углей	500 — 550°
„ тощего угля и антрацита	600 — 700°
„ фрезерного торфа	400°
„ горючих сланцев	400 — 450°

Конечная температура газов и водяных паров, выходящих из сушильного барабана, колеблется от 100 до 130°; конечный нагрев топлива не должен превышать 100° во избежание потери летучих веществ.

Конечная влажность сухого топлива определяется условиями работы шаровых мельниц и колеблется для каменных углей в пределах от 2,0 до 7,0 проц., а для фрезерного торфа — от 12 до 15 проц., и зависит от содержания летучих в топливе и его способности измельчаться.

Помол высушенного топлива производится в мельницах, работающих как по принципу раздавливания (например мельницы Фуллера, Раймонда и др.), так и по принципу удара

(Резольютор, Атриор и др.). В последнее время большое распространение при помоле твердых углей получили тихоходные шаровые двух- и трехкамерные мельницы, заполненные стальными шарами и обрубками стальных прутьев (цильебсом). Эти мельницы обладают большой производительностью, надежны в эксплуатации, осуществляют достаточно тонкий помол, но расходуют сравнительно много энергии.

Чем тверже уголь, тем больше расход энергии; так например, при помоле антрацитового штыба (АШ) расход электроэнергии на 1 *т* порошка составляет 23,2 *квт-ч*, а при помоле подмосковного угля — только 11,6 *квт-ч*.

Тонкость помола топлива имеет очень большое значение при горении пылевидного топлива и характеризуется остатками на германских ситах, имеющих 900 *отв/см²* (сито № 30) и 4900 *отв/см²* (сито № 70). Характеристики их приведены в табл. 9.

Таблица 9

Характеристика стандартных германских и американских сит для анализа угольной пыли

№ сит	Количество отверстий на 1 <i>см²</i>	Ширина отверстий в <i>μ</i>	Диаметр проволок в <i>μ</i>
Германские сита			
30	900	200	130
50	2500	120	80
70	4900	86	55
80	6400	75	50
100	10000	60	40
Американские сита			
70	810	210	140
80	1125	177	119
100	1580	149	102
120	2240	125	86
140	3150	105,5	74
170	4270	88	63
200	6180	74	53
230	8770	62	46
270	10330	53	41
325	15620	44	36

Тонкость помола увеличивается по мере уменьшения летучих веществ в топливе, и при сжигании пылевидного топлива в топках котельных может быть определена из формулы.

$$R_{70} = 6 + 0,7 V^P \text{ проц.},$$

где: R_{70} — остаток на сите № 70 (в проц.), V^P — содержание летучих на рабочую массу топлива (в проц.).

При сжигании пылевидного топлива во вращающихся печах помол обычно тоньше и может быть определен из формулы:

$$R_{70} = 4 + 0,5 V^P \text{ проц.}$$

При грубом помоле тощего угля или антрацита отдельные пылинки не успевают сгореть и выпадают на слой обжигаемого материала или уносятся из печи несгоревшими, что увеличивает расход топлива.

В последнее время производится одновременно сушка и помол угля в шаровых мельницах. Для этой цели через мельницу с помощью сильного вентилятора продувают подогретый до $150-300^\circ$ воздух, причем воздух и водяные пары или поступают из мельницы в топку, или удаляются в атмосферу через пылеуловители. Совместная сушка с размолом может производиться при начальной влажности рабочего топлива до 15 проц.; при большей влажности перед мельницей устанавливается специальная труба — сушилка, в которой происходит предварительная подсушка топлива во взвешенном состоянии, понижающая влажность на 10—15 проц.

Пылевидное топливо подается в топку струей воздуха, в котором пылинки начинают загораться. Количество воздуха, подаваемого вместе с топливом, так называемого первичного воздуха, также зависит от содержания летучих веществ, повышаясь с их увеличением. Так, например, при сжигании в пылевидном состоянии тощего угля ($V^P = 11,5$ проц.), количество первичного воздуха должно составлять 12—15 проц., от общего количества необходимого для горения воздуха, а при сжигании подмосковного угля ($V^P = 22,4$ проц.) — 30—40 проц.

Время полного сгорания пылевидного топлива значительно меньше, чем кускового топлива, и исчисляется секундами и долями секунды. Если принять пылинку за шар, то время ее сгорания можно приближенно определить из формулы проф. Розина:

$$Z = 40 (d \gamma_m)^{1,3} \text{ секунд,}$$

где: d — диаметр частички в мм,

γ_m — средняя плотность топлива в $г/см^3$.

При сжигании угольной пыли во вращающихся печах время полного горения для угольной пыли с содержанием летучих на горючую массу до 40 проц. может быть приближенно определено по графику, представленному на рис. 7. Здесь по оси абсцисс отложено время полного горения пылинки, а по оси ординат — размеры пылинки, соответствующие тонкости помола. Так, например, при прохождении через сито R_{70} максимальный размер пылинки соответствует около 0,08 мм. При содержании летучих в горючей массе топлива в 30 проц. время полного горения составит 1,3 секунды, а при содержании летучих в 10 проц. и той же тонкости помола — 2,1 секунды.

Так как нормальное время полного горения пылинки в топке вращающейся печи колеблется в пределах от 1,0 до 2,0 секунд, то для того, чтобы угольная пыль успела сгореть, тощие угли следует молоть тоньше, чем длиннопламенные. Производительность мельниц при этом уменьшается и стоимость 1 т угольного порошка значительно возрастает.

Зная время полного горения, можно приблизительно определить длину факела горения по формуле:

$$L = WZ$$

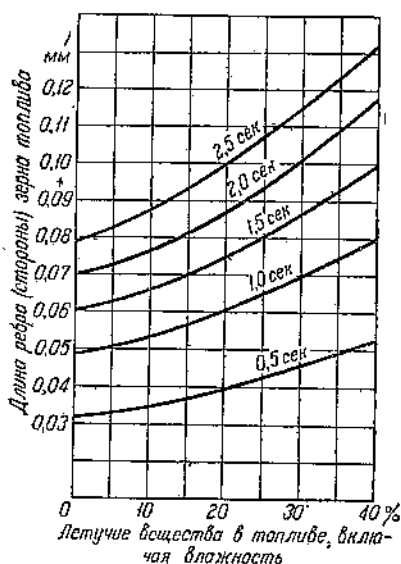
где: L — длина факела горения (в м),

W — средняя скорость газов в пространстве горения вращающейся печи (в м/сек.),

Z — время полного горения (в сек.).

Процесс горения пылевидного топлива или факельный процесс горения распадается на две основных фазы: 1) выделение и горение летучих и 2) горение твердого остатка, т. е. кокса.

Рис. 7. Зависимость времени полного горения пылевидного топлива от тонкости помола и содержания летучих.



Первая фаза горения сопровождается термическим разложением пылевидного топлива, происходящим при высоких температурах. Степень разложения пылевидного топлива достигает при благоприятных условиях от 60 до 90 проц. Выделяющиеся в процессе разложения газы при температуре 1000—1100° состоят преимущественно из окиси углерода, водорода и метана, сгорающих в смеси с воздухом более или менее длинным факелом. Горение твердого остатка (кокса) происходит тем скорее, чем интенсивнее пылевидное топливо перемешивается с воздухом. Поэтому для повышения эффективности горения в топках паровых котлов применяются турбулентные (завихрывающие) или щелевые горелки; кроме того, горелки устанавливают навстречу друг другу или располагают их тангенциально.

Во вращающихся печах подобная установка невозможна, так как пылевая горелка располагается по оси печи, а применение турбулентных форсунок приводит к разрушению футеровки. Поэтому в них употребляются горелки без завихрения, что ухудшает условия горения пылевидного топлива и требует повышенной тонкости помола.

Объем топочного пространства обычно определяют, исходя из теплового напряжения, которое при сжигании каменных углей для топок котельных составляет:

при свободном развитии факела горения .	100 000 — 250 000	кал/м ³ час
„ турбулентных форсунок	100 000 — 350 000	„ „
„ завихрении процесса горения в топках	300 000 — 400 000	„ „

Для вращающихся печей тепловое напряжение пространства горения выше и колеблется в пределах 150 000—500 000 кал/м³ час в зависимости от рода углей и размеров печи.

В обоих случаях первые цифры относятся к антрациту, а вторые — к длиннопламенным и бурым углям.

6. Сжигание мазута

Основным видом жидкого топлива является мазут, который в зависимости от температуры застывания подразделяется на четыре сорта. Для сорта „А“ верхний предел температуры застывания лежит ниже 10° Ц, а для сорта „Г“ — от +24 до +35° Ц. Таким образом мазут сорта „Г“ при транспортировке застывает и для перекачки необходим предварительный его разогрев до 40° Ц. Разогрев производится паром, который или непосредственно разогревает мазут (например в железнодорожных цистернах), или проходит по паропроводам, расположенным в баржах и бассейнах. Перед поступлением на печи мазут дополнительно нагревают до 75—85°, что придает ему большую текучесть.

Перед сжиганием мазут распыливается мельчайшими каплями, которые затем испаряются, причем продукты испарения, сгорая, интенсивно перемешиваются с воздухом. Чем тоньше распылен мазут, чем лучше продукты его испарения перемешаны с горячим воздухом, тем эффективнее процесс горения и выше температура факела.

Распыление мазута производится в форсунках, которые подразделяются на паровые, воздушные и механические. В паровых форсунках мазут распыляется струей пара; в промышленности стройматериалов они применяются сравнительно редко. Наибольшее распространение имеют механические форсунки, в которых струя мазута распыливается под давлением от 0,5 до 22 ат, приобретая вращательное движение благодаря винтовой нарезке в корпусе форсунки, и разбивается в туман при выходе через отверстие форсунки диаметром 0,5—1,75 мм. В воздушных форсунках, мазут распыливается струей воздуха под давлением 0,4—0,6 ат. При этом достигается хорошее насыщение мазутного факела воздухом по всему сечению. В зависимости от типа печей угол вылета мазуто-воздушной смеси из форсунки различен; так, например, при сжигании во вращающихся печах мазут подается в печь длинной узкой струей, обеспечивая растянутый факел горения; в топках туннельных печей угол вылета значительно больше.

На подготовку мазута к горению, т. е. на нагревание мазута, испарение его и нагревание воздуха до температуры 600—700° затрачивается от 10 до 20 проц. от общего количества вносимого мазутом тепла, которое отдается газо-воздушной смеси нагретыми поверхностями кладки или футеровки.

При сжигании мазута легко достижимо как окислительное, так и восстановительное пламя, процесс горения широко регулируется и температура горения при нагревании воздуха достигает 1700° .

Объем топочного пространства при сжигании мазута определяют, исходя из теплового напряжения, которое для топок котельных составляет:

при механическом распыливании	150 000 — 200 000	кал/м ³ час
„ паровом и воздушном распыливании	200 000 — 250 000	„ „
„ распыливании с завихрением	250 000 — 300 000	„ „

Для печей тепловое напряжение выше и при окислительном пламени колеблется от 300 000 до 400 000 кал/м³ час.

7. Сжигание газа

Горение газа зависит от его состава, температуры воспламенения и скорости горения отдельных составляющих газа в смеси с воздухом. Химический состав различных газов приведен в табл. 3. Температура воспламенения различных газов изменяется в сравнительно узких пределах и для струи газа с воздухом по опытным данным составляет:

для водорода H_2	585°
„ метана CH_4	$650—750^{\circ}$
„ окиси углерода CO	651°
„ генераторного и светильного газов	$647—649^{\circ}$

Скорость горения газо-воздушных смесей в вертикальных трубках при температуре $15^{\circ}C$ представлена на рис. 8 (по данным Пассауэра).

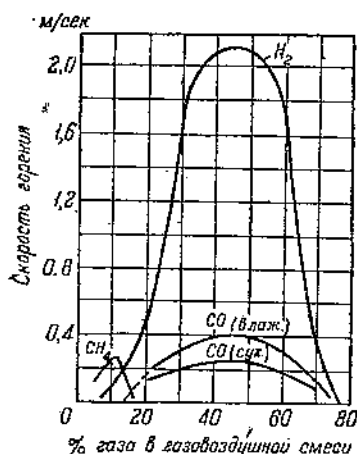


Рис. 8. Скорость распространения пламени различных газов

Наибольшую скорость горения, равную 2,0 м/сек, имеет смесь водорода с воздухом при содержании в газозудной смеси около 47 проц. водорода. Скорость горения метана при оптимальной его смеси с воздухом составляет 0,3 м/сек и окиси углерода — 0,4 м/сек. Таким образом наименьшей является длина факела горения водорода и наибольшей — метана. С повышением температуры скорость горения газо-воздушных смесей возрастает, так, например, при температуре 1000° , близкой к температуре топки, смесь водорода с воздухом горит со скоростью выше 25 м/сек, а окиси углерода — 6,7 м/сек.

Таким образом при условии сжигания в топке газов с большим содержанием метана (например естественный бакинский газ) факел горения значительно длиннее, чем факел газа коксовых печей, содержащего около 50 проц. водорода.

Основными условиями для эффективного сжигания газа являются: возможно лучшее его перемешивание с воздухом и повышение температуры газо-воздушной смеси. Перемешивание газа и воздуха производится или в горелках специальных конструкций или в камерах горения. Нагревание газа и воздуха производится или раздельно до их перемешивания, или после перемешивания в камерах горения за счет теплоотдачи стенок камеры.

При смешении газа и воздуха в горелке весьма важным фактором является скорость истечения газо-воздушной смеси из устья горелки, которая должна быть выше скорости горения. Если скорость истечения меньше скорости горения, пламя может войти в отверстие горелки и вызвать взрыв. При слишком больших скоростях истечения пламя становится неустойчивым и его срывает. Для создания нормальной скорости истечения, давление газа в газопроводе должно быть достаточным. Так например, при давлении 20 мм вод. ст. в газопроводе светильного газа скорость истечения газа составляет около 14,5 м/сек, превышая скорость горения светильного газа, почему взрыв невозможен.

Конструкция газовых горелок должна обеспечивать широкую, удобную и точную регулировку подачи газа и воздуха, интенсивное их перемешивание, полное сгорание газо-воздушной смеси, должна быть безопасна, проста и надежна в работе.

Исходя из давлений газа и воздуха, горелки подразделяются на горелки высокого (6000—1500 мм вод. ст.) и низкого (100—300 мм вод. ст.) давления. По способу действия горелки разделяются на: 1) атмосферные, в которых скорость прохождения газа используется для засасывания части необходимого для горения воздуха, причем другая часть воздуха подается независимо от газа; 2) диффузионные, в которых нагретые струи газа и воздуха параллельно поступают в камеру горения и смешиваются в камере и 3) инжекционные, в которых либо воздух, либо газ подаются под давлением и скорость струи газа используется для засасывания воздуха, или наоборот.

В печах для обжига стройматериалов применяются главным образом первый и третий тип горелок.

Газ находит широкое применение при обжиге различных материалов и изделий, ввиду его удобной транспортировки, отсутствию золы и шлаков, легкой возможности достижения окислительного или восстановительного пламени и возможности регулирования процесса горения в широких пределах.

8. Расчет горения топлива

Расчет горения топлива состоит в определении:

- 1) необходимого для горения количества воздуха;
- 2) количества и состава продуктов горения;
- 3) максимальной теоретической и практической температуры горения.

Определение необходимого для горения количества воздуха при 0/760 может быть произведено по приближенной формуле:

$$V = K\alpha \frac{Q^p_n}{1000} \text{ нм}^3/\text{кг},$$

где: α — избыток воздуха,

коэффициент K равен для: бурых углей — 1,15, каменных углей — 1,1, антрацита — 1,11, мазута — 1,1.

Объем сухих газов на 1 кг топлива при 0/760 приближенно может быть определен по формуле:

$$V_{\text{с.г.}} = K'\alpha \frac{Q^p_n}{1000} \text{ нм}^3/\text{кг},$$

где коэффициент K' равен для: торфа — 1,4, каменных углей — 1,14, бурых углей — 1,27, антрацита — 1,13, мазута — 1,15, сланцев — 1,3.

Количество водяных паров при сгорании 1 кг топлива (без учета водяных паров, вносимых воздухом, количество которых незначительно) при 0/760 определяется по формуле:

$$V_{\text{в.п.}} = 0,112 H^p + 0,0124 W^p \text{ нм}^3/\text{кг},$$

где H^p и W^p — содержание водорода и водяных паров в рабочем топливе в проц.

Более точно расчет полного горения 1 кг или 1 м³ топлива может быть произведен по табл. 10 и 11.

Употребление таблиц понятно из примера: рассчитать при $\alpha=1,0$ и $\alpha=1,4$ горение 1 кг подмосковного угля следующего элементарного состава:

$C^p = 34,8 \%$	или 0,348 кг
$H^p = 2,4 \%$	" 0,024 "
$S^p = 2,5 \%$	" 0,025 "
$N^p = 0,7 \%$	" 0,007 "
$O^p = 9,4 \%$	" 0,094 "

$$W^p = 32,0\% \text{ или } 0,320$$

$$A^p = 18,2\% \text{ " } 0,182 \quad Q^p_n = 2980 \text{ кал/кг.}$$

В объемных единицах:

$$O^p = \frac{0,094}{1,43} = 0,066 \text{ м}^3 \text{ или } O^p = 0,7 \times 0,094 = 0,066 \text{ м}^3$$

$$N^p = \frac{0,007}{1,256} = 0,0056 \text{ м}^3 \text{ или } N^p = 0,8 \times 0,007 = 0,0056 \text{ м}^3$$

$$W^p = \frac{0,320}{0,804} = 0,398 \text{ м}^3 \text{ или } W^p = 1,244 \times 0,032 = 0,398 \text{ м}^3$$

Из табл. 10 следует, что для сжигания 1 кг углерода (C) в углекислоту (CO₂) требуется 1,87 м³ кислорода, причем образуется 1,87 м³ CO₂.

Следовательно, для сжигания 0,348 м³ C в CO₂ требуется $0,348 \times 1,87 = 0,65 \text{ м}^3 \text{ O}_2$ и образуется столько же CO₂.

Расчет полного горения 1 кг твердого и жидкого топлива при $\alpha = 1$

Наименование и количество вещества	Требуется для горения (в м ³),				Образуется от сгорания топлива (в м ³)			
	O ₂	N ₂	воздух		CO ₂ + SO ₂	H ₂ O	N ₂	Сумма сухих газов
Углерод $CP \times 0,01 = C$	1,87 C		8,9 C	1,87 C				
Водород $HP \times 0,01 = H_2$	5,59 H ₂		26,01 H ₂	—		11,10 H ₂	8,77 O ₂	
Сера $SP \times 0,01 = S$	—	2,77 O ₂	3,33 S	0,7 S		—	—	
Азот $NP \times 0,01 = N_2$	—	—	—	—	—	—	+ 0,8 N ₂	
Влага $WP \times 0,01 = W$	—	—	—	—	—	+ 1,244 WP	—	
Кислород $OP \times 0,01 = O_2$	-0,7 O ₂	—	—	—	—	—	—	
Всего на 1 кг топлива	$\Sigma O_2 = 0,7 O_2$	3,77 O ₂	—	1,87 C + 0,7 S	11,19 H ₂ + 1,244 W	8,77 O ₂ + 0,8 N ₂	Σ сухих газов	Σ общая

Расчет полного горения 1 м³ газа при $\alpha=1$

Наименование и количество вещества	Требуется для горения (в м³)			Образуется от сгорания газа (в м³)					
	O ₂	N ₂	Воздуха	CO ₂	H ₂ O	SO ₂	N ₂	Сумма сухих газов	Сумма общая
CO	0,50	1,88	2,38	1,00	—	—	1,88		
H ₂	0,50	1,88	2,38	—	1,00	—	1,88		
CH ₄	2,00	7,52	9,52	1,00	2,00	—	7,52		
C _m H _n	$m + \frac{n}{4}$	$3,77 (m + \frac{n}{4})$	—	—	—	—	—		
H ₂ S	1,5	5,61	7,14	—	—	1,00	5,61		
Всего на 1 м³ газа	ΣO ₂	ΣN ₂	Σ(O ₂ + N ₂)	ΣCO ₂	ΣH ₂ O	SO ₂	ΣN ₂	ΣСухих газов	Σобщая

Результаты определения вносятся в табл. 12. Так же точно определяются элементы при горении H_2 и S.

Содержание кислорода (O_2) в топливе, переведенное в объемные единицы ($0,066 m^3$), вычитается из общего содержания кислорода, а объемное содержание влаги топлива прибавляется к общему содержанию H_2O .

Количество азота (N_2), которое участвует в горении, определяется по количеству кислорода (O_2), умноженному на 3,77; к этому количеству в продуктах горения прибавляется содержание азота в топливе, переведенное в m^3 .

Весь азот переходит в дымовые газы, тогда как весь кислород (при полном горении) соединяется с C, H и S топлива.

При $\alpha = 1,4$ потребность в кислороде (O_2) и азоте (N_2) составит в 1,4 раза больше предыдущей; при этом в дымовые газы перейдет весь азот, а кислорода перейдет только $(1,4 - 1,0) \times 0,735 = 0,294 m^3$, тогда как остальной кислород соединится с C, H и S топлива. При этом расчете содержание влаги в воздухе не учитывается. При учете, ее следует прибавить к H_2O продуктов горения.

Температура горения различных видов топлива различна и колеблется в широких пределах в зависимости от условий сжигания топлива, а также избытка и степени подогрева воздуха.

Максимальная теоретическая температура горения определяется, исходя из теплотворной способности топлива, сжигаемого в пространстве, ограниченном нетеплопроводными стенками, теоретического количества продуктов полного горения топлива и их теплоемкости. Так как все эти условия практически неосуществимы в печах и более или менее достигаются при определении теплотворной способности топлива в калориметрической бомбе, правильно называть максимальную температуру горения топлива — *калориметрической температурой горения*. В отличие от нее *теоретической температурой горения* условным образом называют максимальную температуру горения топлива при тех же условиях, но с учетом диссоциации углекислоты и водяных паров, всегда происходящей при высоких температурах и понижающей температуру горения.

Определение калориметрической температуры горения при различных избытках и степени подогрева воздуха производится по формуле:

$$T_r = \frac{Q_p + V_o \alpha C_v T_v}{V_{c.g.} C_{c.g.} + V_{в.п.} C_{в.п.}} \text{ } ^\circ C,$$

где: Q_p — низшая теплотворная способность рабочего топлива (в кал/кг.),

V_o — теоретическое количество воздуха, необходимого для горения (в m^3/kg),

α — избыток воздуха,

C_v — теплоемкость воздуха (в кал/ m^3),

T_v — температура воздуха ($^\circ C$),

$V_{c.g.}$ — объем сухих газов (в m^3/kg),

Расчет горения 1 кг подмосковного угля при $\alpha = 1$ и $\alpha = 1,4$

Название элементов		Требуется для горения (в м³)					Образуется от сгорания (в м³)				
Коэф-циент	O ₂	N ₂	Воздуха	CO ₂ + SO ₂	H ₂ O	N ₂	O ₂	Сухих газов	Всего газов		
C	0,348 $0,348 \times 1,87 = 0,650$		$0,348 \times 8,9 = 3,100$	$0,348 \times 1,87 = 0,650$	—	—	—	—	—		
H ₂	0,024 $0,024 \times 5,59 = 0,134$	$0,735 \times 3,77 = 2,770$	$0,024 \times 20,51 = 0,492$	—	$0,024 \times 11,19 = 0,268$	$0,735 \times 3,77 = 2,770$	—	—	—		
S	0,025 $0,025 \times 0,7 = 0,017$		$0,025 \times 3,33 = 0,083$	$0,025 \times 0,7 = 0,017$	—	—	—	—	—		
W	0,325		—	—	+0,398	+0,005	—	—	—		
N ₂	0,070	—	—	—	—	—	—	—	—		
O ₂	0,094 - 0,066	—	—	—	—	—	—	—	—		
При $\alpha=1$	0,735	2,770	3,820	0,667	0,666	2,775	—	3,442	4,10		
При $\alpha=1,4$	$0,735 \times 1,4=1,030$	$2,770 \times 1,4=3,880$	$3,820 \times 1,4=5,350$	0,667	0,666	3,880	$0,4 \times 0,735 = 0,294$	4,841	5,507		
То же (в %)	—	—	—	12,1	12,1	70,5	5,3	87,9	100		

$C_{с.г.}$ — теплоемкость сухих газов при калориметрической температуре горения (в $кал/м^3$),
 $V_{в.п.}$ — объем водяных паров в результате сгорания топлива (в $м^3/кг$),
 $C_{в.п.}$ — теплоемкость водяных паров при калориметрической температуре горения (в $кал/м^3$).

В тех случаях, когда неизвестен химический состав топлива, можно определить теплоемкости продуктов горения, исходя из их количества по данным Хейлигенштедта. Средний состав продуктов горения в объемных процентах при $\alpha=1$ принимается следующий (табл. 13).

Т а б л и ц а 13

Род топлива	Средний состав продуктов горения (в проц.)		
	CO ₂	H ₂ O	N ₂
Твердое топливо . . .	17,5	10,6	71,9
Нефть	18,6	12,4	74,0
Генераторный газ . .	17,6	7,8	74,6

При этом составе отходящих газов средние объемные теплоемкости определяются из следующих зависимостей (табл. 14).

Т а б л и ц а 14

Род топлива	Средняя теплоемкость при постоянном давлении $кал/м^3 \text{ } ^\circ C$
Твердое топливо . . .	$C = 0,3241 + 0,0000426t$
Нефть	$C = 0,3188 + 0,0000344t$
Генераторный газ . . .	$C = 0,32 + 0,0000426t$

Если имеется анализ топлива и известен состав продуктов горения, средние значения теплоемкостей могут быть взяты из табл. 15.

Т а б л и ц а 15

Средние теплоемкости газов при постоянном давлении от 0° до t°

Газы	$кал/м^3 \text{ } ^\circ C$	$кал/кг \text{ } ^\circ C$
CO ₂	$0,3922 + 0,0001473t$	$0,2000 + 0,000075t$
H ₂ O	$0,3594 + 0,0000223t$	$0,4475 + 0,0000278t$
N ₂	$0,2985 + 0,0000205t$	$0,23875 + 0,000016t$
O ₂	$0,3074 + 0,0000206t$	$0,2152 + 0,0000141t$
H ₂	$0,2985 + 0,0000206t$	$0,3343 + 0,0000225t$
CO	$0,2985 + 0,0000206t$	$0,23875 + 0,000016t$
SO ₂	$0,3922 + 0,0001473t$	$0,1378 + 0,00005156t$
Воздух	$0,3003 + 0,0000201t$	$0,2323 + 0,0000155t$

Так как, с одной стороны, количество продуктов горения всегда соответствует теплотворной способности топлива

$$\left(\frac{Q^p}{V_{т.г.} + V_{в.п.}} \right), \text{ точно так же как и теоретическое количе-}$$

ство воздуха (V_0), с другой стороны, теплоемкость воздуха (C_a) изменяется в весьма незначительных пределах ($0,3 \text{ кал/м}^3$ при 0° и $0,31 \text{ кал/м}^3$ при 500°), а избыток воздуха α учитывается как в числителе, так и в знаменателе, основное значение при изменениях T_r имеет температура подогрева воздуха (t_a).

Чем выше подогрев воздуха, тем выше калориметрическая температура горения (T_r). В туннельных печах, например, применяется для горения воздух, подогретый до $500-700^\circ$ при $\alpha = 1,2-1,3$; во вращающихся печах нагрев воздуха составляет $250-350^\circ$ при $\alpha = 1,05-1,1$.

Значения калориметрической температуры горения различных топлив приведены в табл. 16.

Таблица 16

Калориметрическая температура горения различных топлив (по Хейлигенштедту)

Топливо	Теплотворная способ- ность (в кал/кг)	Теоретическое теплосодержание 1 м ³ продуктов горения (в кал/м ³)	Калориметрическая температура (°C)
Углерод	8080	910	2280
Окись углерода	3050	1058	2440
Водород	2560	888	2220
Метан	8580	815	2065
Сырой бурый уголь	3000	704	1765
Каменный уголь	6500	870	2170
Генераторный газ	1100	598	1560
(холодный)	1300	660	1825
"	1500	715	1905
Коксовый газ	4000	832	2090
Колошниковый газ	1000	616	1570
Нефть	10250	878	2200

Отношение наивысшей температуры горения сжигаемого в печах топлива к его калориметрической температуре называется *калориметрическим коэффициентом полезного действия печи*. Значения этого коэффициента η_k для ряда печей следующие (по Базену):

туннельные печи закрытой конструкции с медленным встречным движением материала	0,77—0,82
мартеновские печи	0,65—0,72
методические печи	0,70—0,75
печи с периодической загрузкой	0,65—0,70

Соответственно этому определению calorиметрический коэффициент полезного действия для печей, применяемых в промышленности стройматериалов, составляет:

вращающиеся печи (при сжигании топлива в полости печи) 0,88—0,73
шахтные печи (при пересыпном способе сжигания топлива) 0,55—0,65

Определив calorиметрическую температуру горения, можно определить наивысшую температуру газов печи, пользуясь значениями η_k :

$$T_{\text{газ}} = \eta_k T_r \text{ } ^\circ\text{Ц.}$$

9. Способы нагревания воздуха и газа

Нагревание идущего на горение воздуха производится или за счет охлаждения этим воздухом обожженного материала в холодильниках, или путем подогрева воздуха теплом отходящих из печей газов в рекуператорах и регенераторах.

Холодильники составляют одно целое с печью, как например в шахтных печах, в нижнюю часть которых опускается материал навстречу поступающему холодному воздуху; или представляют собой соединенные с печью вращающиеся барабаны, пересыпаясь в которых горячий обожженный материал омывается потоком холодного воздуха.

Рекуператоры (рис. 9) состоят из ряда вертикальных или горизонтальных труб или каналов из чугуна, шамота или специ-

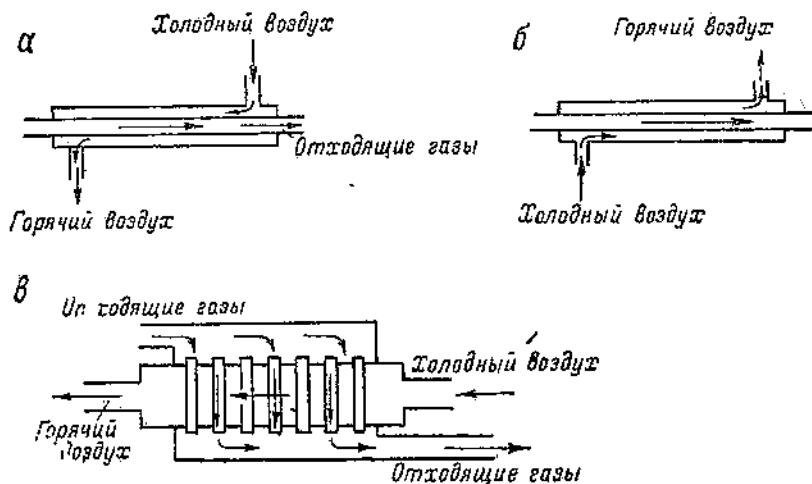


Рис. 9. Схема рекуператоров (а — противоточного, б — прямоточного, в — с перекрестным потоком).

альных высокоогнеупорных масс. Воздух проходит по трубам или каналам, тогда как горячие газы омывают их снаружи. Иногда горизонтальные каналы располагаются перпендикулярно друг другу; в этих случаях воздух и газы поступают по разным каналам навстречу друг другу. В вертикальных каналах холодный

воздух поступает снизу вверх, а горячие газы спускаются сверху вниз.

Теплообмен между воздухом и горячими газами происходит через стенку, которая должна обладать минимальным тепловым сопротивлением и значительной прочностью. Вследствие этого часто употребляются металлические рекуператоры, в которых воздух при скорости 5—8 м/сек нагревается до 350—450° при нагреве труб до 600—700°. При более высокой температуре металл окисляется и разрушается. Керамические рекуператоры при более высоких температурах также разрушаются и образуют неплотности между отдельными элементами, почему, несмотря на сравнительно быстрый разогрев рекуператоров, они применяются при средних температурах газов.

Определения поверхности нагрева рекуператоров можно производить по данным проф. Тиме:

Температура подогрева
воздуха (в°Ц)

150
250—300
300—350
400—500
600

Поверхность нагрева на 1 м³
воздуха в 1 минуту (в м²)

0,6
0,75—1,0
1,0—1,5
3,0—4,0
5,0

Регенераторами (рис. 10) называются большие, попарно установленные камеры, заполненные сложными в клетку огнеупорными кирпичами. При подогреве воздуха устанавливаются две камеры, при подогреве газа и воздуха — четыре.

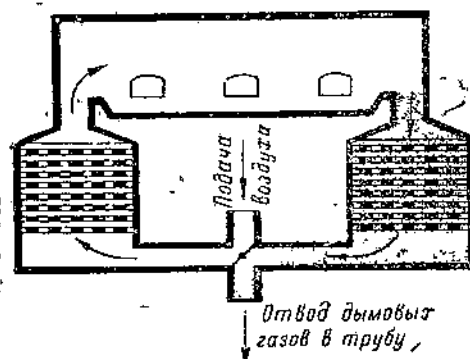


Рис. 10. Схема регенератора

Выходящие из печи горячие газы проходят через одну из парных камер, нагревают уложенный в ней кирпич — насадку и отводятся дымовой трубой. Приблизительно через полчаса, когда насадка достаточно нагрелась, печные газы перепускаются в соседнюю камеру с холодной насадкой,

а через нагретую камеру пропускается газ или воздух, которые в ней нагреваются за счет остывания насадки.

Огнеупорная насадка является важнейшим элементом камеры и должна удовлетворять следующим основным требованиям: быть достаточно прочной и устойчивой, иметь минимальный объем при максимальной поверхности нагрева, обладать возможно большей способностью воспринимать тепло и минимальным сопротивлением проходу газов. Для того чтобы насадка не забивалась пылью, увлекаемой газами, кирпичи обычно устанавливаются на ребро. Указанным требованиям в значительной мере удовлетво-

ряет насадка Сименса, в которой первый слой кирпича кладется на ребро рядами, а следующий слой состоит из рядов, перпендикулярных предыдущему. Кроме приведенного, употребляются и другие методы укладки кирпича.

Расчет регенераторов производится различными методами, основанными на данных теплопередачи от дымовых газов к насадочному кирпичу, и от кирпича—к нагреваемому воздуху или газу. Кроме того, определяется количество проходящих через регенератор дымовых газов и их температура перед регенератором и после него. В некоторых методах расчета (например проф. Павлова) принимается падение температуры насадочной решетки в минуту и другие опытные данные.

Температуры нагрева воздуха и газа зависят главным образом от температуры отходящих из печи продуктов горения и метода садки и могут колебаться в значительных пределах.

10. Способы отвода дымовых газов

Отвод дымовых газов и продуктов горения топлива из топок и печей производится при помощи дымовых труб, устанавливаемых за паровыми котлами и печами. Движение газов осуществляется за счет разрежения (см. гл. II „Движение газов в печах“), зависящего от разности давления столба воздуха и горячих газов и высоты дымовой трубы.

Для упрощенного расчета дымовой трубы применяются различные эмпирические формулы. Так например, согласно Рейхе, высота дымовой трубы составляет от 25 до 30 D (диаметров). При этом диаметр трубы определяется, исходя из температуры отходящих газов 300° и скорости газов в устье трубы — 3,0 м/сек.

Если известны общее сопротивление системы: топка — печь — дымовая труба и температура отходящих газов, высота дымовой трубы при температуре наружного воздуха 0° может быть определена из графика, приведенного на рис. 11, а при температуре наружного воздуха $+30^{\circ}$ Ц — из графика, приведенного на рис. 12.

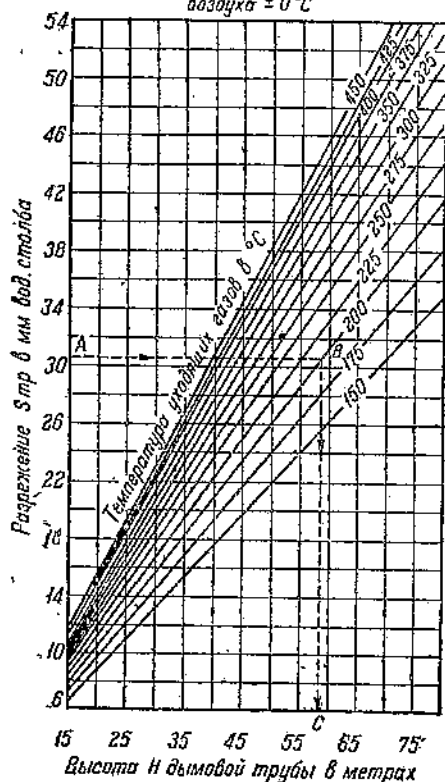
Дымовые трубы делаются железными, железобетонными или кирпичными и достигают высоты 100 м. Минимальная температура входящих в трубу газов составляет 160° Ц. Средняя скорость газов в дымовой трубе составляет от 4,0 до 6,0 м/сек.

При более низкой температуре отходящих газов, а также в том случае, если сумма сопротивлений системы топка — печь — дымовая труба превосходит 35—40 мм вод. ст., применяется искусственный отвод газов при помощи дымососа. Применяются дымососные установки прямого и непрямого действия.

В первом случае дымосос засасывает выходящие из печи горячие газы и затем нагнетает их в дымовую трубу; высота дымовой трубы составляет от 15 до 35 м, и скорость газов в трубе повышается до 15 м/сек.

В дымососной установке непрямого действия в дымовую трубу специальным вентилятором нагнетается через установленное

Диаграмма СН для температуры наружного воздуха $\pm 0^\circ\text{C}$



в трубе сопло холодный воздух, и установка работает по принципу эжектора.

Дымосос отличается от вентилятора тем, что его вал и подшипники снабжены водяным охлаждением. Размеры ды-

Диаграмма СН для температур. наружн. воздуха $+30^\circ\text{C}$

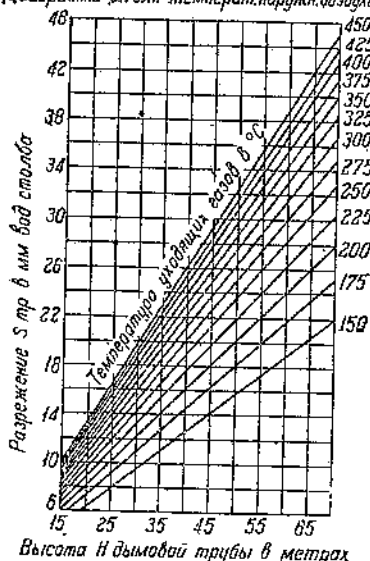


Рис. 11 и 12. Графики для определения высоты дымовой трубы.

мососа определяют, исходя из полного количество отходящих при данной температуре газов с 20—25-проц. запасом, и по общей сумме сопротивлений системы, зная которую, можно подбирать дымосос по каталогу.

Определение мощности мотора дымососа производится по формуле:

$$N = \frac{V_{\text{час}} \Delta p}{3600 \cdot 75 \cdot \eta_g}$$

где N — мощность мотора дымососа (в лс)

Δp — сумма сопротивлений системы, численно равная создаваемому дымососом разрежению (в мм вод. ст.)

η_g — коэффициент полезного действия дымососа, обычно составляющий 0,45—0,55.

При определении мощности в квт найденное значение N умножается на 0,736.

Дымососная установка позволяет работать с весьма низкими температурами отходящих газов, однако, ниже 120° работать не следует во избежание конденсации водяных паров, что приводит к ржавлению железных поверхностей и разъеданию их продуктами горения серы.

Глава II

ДВИЖЕНИЕ ГАЗОВ В ПЕЧАХ

1. Основные единицы измерения

В каждой работающей печи, представляющей собой обычно агрегат, состоящий из топки, печи и дымовой трубы, непрерывно происходит движение воздуха, пламенных газов топки и продуктов горения топлива. От характера движения газового потока в значительной мере зависит как развитие процессов горения топлива, так и теплообмен в топках и печах. Например, поступление воздуха в топку зависит от распределения давлений в печи, с которой топка непосредственно связана, передача тепла конвекцией зависит от скорости газового потока и т. д. Изучение законов движения газов поэтому является вопросом чрезвычайно важным и во многих случаях определяет всю тепловую работу печей.

В настоящее время большим количеством исследований установлено, что при соблюдении определенных условий движение воздуха и пламенных газов вполне упикивается движению воды; например, движение воды и воздуха по трубам подчиняется одним и тем же законам. Таким образом при проектировании, а также при исследовании работы различных печей возможно применять к газам как понятия, так и законы гидравлики, изучающей движение воды.

Однако прежде чем начать рассмотрение законов движения газов, необходимо установить понятие об единицах измерения, а также установить основные положения для неподвижного (находящегося в покое) газа.

Объемным весом жидкости или газа называется вес единицы объема (обычно 1 м³). Если объем жидкости или газа равен V м³, вес этого объема равен P кг, то вес единицы объема будет составлять:

$$\gamma = \frac{P}{V} \text{ кг/м}^3.$$

Объемный вес уменьшается с возрастанием температуры, изменяясь по закону Гей-Люссака, и при данной температуре t будет составлять:

$$\gamma_t = \gamma_0 \frac{273}{273 + t} \text{ кг/м}^3,$$

где: γ_1 — вес единицы объема при температуре t^0 Ц,
 γ_0 — тот же вес при 0^0 Ц.

Плотностью называется отношение массы тела к его объему, выражаемое в $\text{кг} \cdot \text{сек}^2/\text{м}^4$.

$$\text{Плотность } \rho = \frac{M}{V} \text{ кг} \cdot \text{сек}^2/\text{м}^4.$$

Так как вес тела есть произведение из массы тела на ускорение силы тяжести ($P = mg \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{сек}^2}$), масса тела (количество вещества в теле) $m = \frac{P}{g} \text{ кг} \cdot \text{сек}^2/\text{м}$

$$\text{и плотность } \rho = \frac{P}{g} : V = \frac{\text{кг} \cdot \text{сек}^2}{\text{м}^4}.$$

Так как объем газов изменяется с температурой, то и плотность их изменяется с температурой:

$$\rho_t = \rho_0 \frac{273}{273 + t} \text{ кг} \cdot \text{сек}^2/\text{м}^4.$$

Одной из причин гидравлического сопротивления потока газов при движении его вдоль твердых стен газопроводов или газопроводов является *сила вязкости*.

Благодаря свойству вязкости, отдельные частицы жидкости или газа как бы прилипают друг к другу и для их передвижения всегда необходимо прилагать некоторое усилие. Это усилие прямо пропорционально коэффициенту вязкости. Коэффициент вязкости представляет сдвигающее напряжение, которое появляется в единице поверхности движущейся жидкости при уменьшении скорости, и для различных жидкостей и газов различно.

Коэффициент вязкости выражается в $\text{кг} \cdot \text{сек}/\text{м}^2$ и возрастает с температурой.

Гидростатическое давление, представляющее собой давление, которое производится на единицу поверхности газами, имеющими определенный вес, выражается обычно в технических атмосферах, т. е. в $\text{кг}/\text{см}^2$.

В теплотехнике величина создаваемого газами давления обычно измеряется в мм вод. ст. По существу между этими определениями разницы нет.

Погрузим в неподвижную жидкость какую-либо площадку в 1 м^2 . Допустим при этом, что атмосфера не оказывает на верхнюю поверхность жидкости никакого давления. Тогда гидростатическое давление на эту площадку будет зависеть от глубины погружения площадки (рис. 13) и объемного веса жидкости:

$$P = h\gamma \text{ кг}/\text{м}^2,$$

где: h — глубина погружения площадки (в м),

γ — объемный вес жидкости (в $\text{кг}/\text{м}^3$).

Точно так же та же площадка, погруженная в газовую среду, на которую атмосфера не оказывает давления, будет испытывать давление столба газа h , умноженного на объемный вес этого газа γ .

Другими словами, и в том и в другом случае давление на площадку можно выразить глубиной ее погружения.

Это давление называется пьезометрическим давлением или, так как оно выражено через высоту (глубину), — пьезометрической высотой.

Допустим, что в газоход (рис. 14) воздух, вес которого равен $1,29 \text{ кг/м}^3$, давит на какую-либо площадку в 1 м^2 , расположенную на плоскости $X-X$ с силой $P \text{ кг/м}^2$.

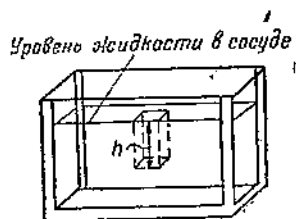


Рис. 13. Статическое давление жидкости

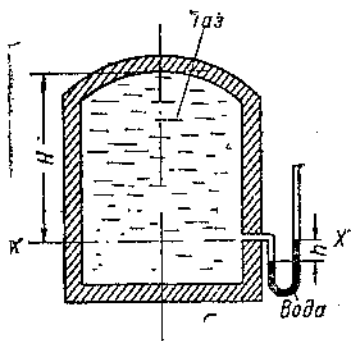


Рис. 14. Определение пьезометрического давления

На основании предыдущего, давление может быть выражено через:

$$P = H\gamma \text{ кг/м}^2,$$

где: H — глубина расположения площадки или, что то же, высота (в м),

γ — объемный вес воздуха (в кг/м^3).

К газоходу присоединен пьезометр, в который налита вода. Благодаря давлению газа столбик воды в трубке пьезометра подымается на некоторую высоту, которая эквивалентна, как только, что было указано, давлению P . Поэтому можно написать:

$$P = h\gamma \text{ кг/м}^2,$$

где: h — пьезометрическая высота (в м),

γ — вес единицы объема воды, т. е. вес 1 м^3 воды, равный 1000 кг/м^3 .

Таким образом численное значение величины давления будет равно:

$$P = H \cdot 1,29 \text{ кг/м}^2$$

или

$$P = h \cdot 1000 \text{ кг/м}^2,$$

где h , как было указано, выражено в м.

Выразив h в мм, будем иметь:

$$P = \frac{1}{1000} h^1 \cdot 1000 = h^1 \text{ мм вод. ст. или кг/м}^2.$$

2. Основные законы движения газов

Камеры печей можно уподобить закрытым сосудам, сообщающимся с наружным воздухом и заполненным горячими газами, причем вес единицы объема горячих газов всегда меньше веса единицы объема воздуха, который при 0°C равен $1,293 \text{ кг/м}^3$.

При выборе произвольной плоскости $X-X$ (рис. 15) в камере печи можно определить давление (напор) столба газа на эту плоскость. Допустим, что плоскость $X-X$ закрыта сверху и находится на высоте H от нижней открытой плоскости печи. Печь заполнена газами, вес единицы объема которых равен $\gamma \text{ кг/м}^3$ и температура $-t^\circ \text{C}$. Снаружи печь омывается холодным воздухом при температуре 0°C ; вес единицы объема воздуха при этой температуре равен $1,293 \text{ кг/м}^3$.

Допустим, что при определенном режиме печи давление воздуха и газов в нижнем открытом сечении камеры печи $Y-Y$ одинаковы и равны давлению атмосферы; обозначим его через $P \text{ кг/м}^2$.

На уровне плоскости $X-X$ внутри полости печи давление газов будет меньше, чем давление их на нижнюю открытую часть камеры на вес столба горячих газов H , т. е. будет равно;

$$P - H\gamma \left(\frac{273}{273 + t} \right) \text{ кг/м}^2.$$

На том же уровне плоскости $X-X$, но снаружи полости печи, давление воздуха тоже будет меньше атмосферного на ту же высоту столба H воздуха, вес единицы объема которого не изменяется при постоянстве температуры, т. е. будет равно:

$$P - H \cdot 1,293 \text{ кг/м}^2.$$

Так как вес единицы объема горячих газов меньше веса холодного воздуха, то разность $P - H\gamma$ больше разности $P - H \cdot 1,293$, т. е. давление газов на плоскость $X-X$ внутри полости печи будет больше, чем давление воздуха на ту же плоскость снаружи.

Разность давления, или что то же, напор газов на плоскость $X-X$ составит:

$$\begin{aligned} \Delta P &= \left(P - H\gamma \frac{273}{273 + t} \right) - (P - H \cdot 1,293) = \\ &= H \left(1,293 - \gamma \frac{273}{273 + t} \right) \text{ кг/м}^2. \end{aligned}$$

Если вместо воздуха взять какой-либо другой газ, тяжелее пламенных газов, вес единицы объема которого γ_1 , а вес еди-

инцы объема газов γ_2 , напор газов на плоскость $X-X$ будет равен:

$$\Delta P = h (\gamma_1 - \gamma_2) \text{ кг/м}^2.$$

Прикрепив на плоскости $X-X$ к камере печи U -образную трубку, заполненную жидкостью, разность давлений ΔP можно измерить высотой столба жидкости h . Если жидкостью является вода, то $\Delta P = h$ мм вод. ст.; если налита другая жидкость, то $\Delta P = h\gamma$ жидкости. Например, удельный вес спирта равен 0,8, ртути — 13,6. При больших давлениях обычно наливают ртуть, чтобы уменьшить h и не делать слишком длинной трубки.

Определим давление под сводом печи, исходя из следующих условий:

высота свода над подом — 2 м,
температура газов в печи — 1300°C,
вес единицы объема газов при 0° — 1,32 кг/м³,
температура окружающего воздуха — 20°C,
вес единицы объема воздуха при 0°C — 1,293 кг/м³.

При этом на поду печи давление равно атмосферному.

Давление под сводом печи будет составлять:

$$\begin{aligned} \Delta P = H (\gamma_1 - \gamma_2) &= 2 \left(1,293 \frac{273}{20+273} - 1,320 \frac{273}{1300+273} \right) = \\ &= 2 (1,204 - 0,229) = 1,950 \text{ кг/м}^2 \text{ или мм вод. ст.} \end{aligned}$$

При высоте свода над подом 3 м давление под сводом увеличится до 2,925 мм вод. ст.

Таким образом, напор газов пропорционален высоте заполненной газами полости печи. На поду печи, где давление равно атмосферному, напор газов будет равен 0, т. е. никакого напора не будет, а ниже пода (например в воздухоподводящем канале) давление будет отрицательным или будет иметь место разрежение.

Если в своде печи пробить отверстие, газы будут под давлением устремляться через это отверстие в атмосферу. С другой стороны, через воздухоподводящий канал, расположенный ниже пода печи, наружный воздух, благодаря разрежению, будет устремляться в полость печи.

Для того чтобы холодный воздух не проникал в печь в зоне обжига и из печи не выбивали газы, на поду печи всегда стремятся создавать атмосферное или нулевое давление.

В зависимости от существующего напора газы стремятся выйти через отверстие, проделанное в своде печи, с различной скоростью, выражаемой для них той же формулой, что и для жидкостей:

$$W^2 = 2gh \text{ м}^2/\text{сек}^2 \text{ или } W = \sqrt{2gh} \text{ м/сек},$$

где: g — ускорение силы тяжести, равное 9,81 м/сек²,
 h — скоростной напор, выраженный в м столба жидкости.

Расход напора на получение скорости W м в секунду составит:

$$h = \frac{W^2}{2g} \text{ м.}$$

Выражение $\frac{W^2}{2g}$ называется *скоростным напором* или *живой силой жидкости*, приведенной к 1 кг текущей жидкости.

Для газов, имеющих объемный вес приблизительно в 1000 раз меньший объемного веса воды, скоростный напор включает еще объемный вес газов γ_0 при их температуре в рассматриваемом сечении. Этот скоростной напор численно совпадает с величиной высоты столба газов, необходимой для его осуществления:

$$h = \frac{W_0^2}{2g} \gamma_0 \frac{273}{273 + t} \text{ мм вод. ст. или кг/м}^2.$$

При этом скорость определяется, исходя из объема газа при данной температуре.

Если скорость газов определяется при 0°C и 760 мм рт. ст., то скоростной напор составляет:

$$h = \frac{W_0^2}{2g} \gamma_0 \frac{273 + t}{273} = \frac{W_0^2 \gamma_0 (273 + t)}{2 \cdot 9,81 \cdot 273} = \frac{W_0^2 \gamma_0 (273 + t)}{5360} \text{ мм вод. ст. или кг/м}^2.$$

Расходом жидкости (или газа) называется объемное их количество, протекающее через рассматриваемое поперечное сечение в единицу времени (секунду).

Если поперечное сечение газохода равно $F \text{ м}^2$, а средняя скорость газа (или жидкости) по поперечному сечению составляет $W \text{ м/сек}$, то расход V газа (или жидкости) в секунду будет равен:

$$V = WF \text{ м}^3/\text{сек},$$

откуда скорость газа:

$$W = \frac{V}{F} \text{ м/сек.}$$

Иногда по ходу расчета необходимо выразить объемный расход газа, выражаемый в $\text{м}^3/\text{сек}$, через весовой его расход, т. е. в кг/сек . В этом случае $V \text{ м}^3/\text{сек}$ умножается на вес единицы объема газа.

Дымовая труба, которой обычно оборудуются все печи и котельные установки, представляет собою открытую в верхней своей части камеру. В верхнем сечении трубы давление всегда равно атмосферному (± 0), а раз так, то у основания дымовой трубы всегда будет иметь место разрежение, которое, как и напор газов в предыдущем примере, зависит от следующих условий: 1) высоты дымовой трубы, 2) температуры окружающего воздуха, 3) объемного веса продуктов горения и 4) температуры продуктов горения.

Разрежение у основания дымовой трубы определяется по формуле, аналогичной предыдущей: $\delta = H(\gamma_1 - \gamma_2)$ мм вод. ст., где: H — высота дымовой трубы (в м)

γ_1 — вес единицы объема воздуха (в кг/м³)

γ_2 — вес единицы объема продуктов горения (в кг/м³).

Отсюда можно определить высоту дымовой трубы:

$$H = \frac{\delta}{\gamma_1 - \gamma_2} \text{ м.}$$

Пусть требуется определить высоту дымовой трубы, обеспечивающей разрежение 40 мм вод. ст.

При этом имеются следующие данные:

температура окружающего трубу воздуха -30° и $+30^\circ$,

температура продуктов горения 300° ,

вес единицы объема продуктов горения $1,32 \text{ кг/м}^3$.

При 30° мороза, вес единицы объема воздуха будет равен:

$$\gamma_1 = 1,293 \frac{273}{273 + (-30)} = 1,45 \text{ кг/м}^3.$$

При 30° тепла:

$$\gamma_1 = 1,293 \frac{273}{273 + 30} = 1,165 \text{ кг/м}^3.$$

При температуре газов в трубе 300° вес единицы объема продуктов горения:

$$\gamma_2 = 1,32 \frac{273}{273 + 300} = 0,63 \text{ кг/м}^3.$$

Откуда высота трубы в первом случае:

$$H = \frac{40}{1,45 - 0,63} = 48,8 \text{ м}$$

и во втором

$$H = \frac{40}{1,165 - 0,63} = 74,8 \text{ м.}$$

Таким образом в жаркие летние дни разрежение, создаваемое дымовой трубой, сильно уменьшается, или что то же, для достижения необходимого разрежения необходима большая высота трубы. Поэтому расчет дымовых труб производится с учетом нагревания воздуха в летние дни.

При установлении зависимостей при *движении* жидкостей и газов, исходят, как и в гидравлике, из движения элементарной струйки жидкости или газа, распространяя выводы на весь поток в целом.

Допустим, что идеальная (несжимаемая и лишенная вязкости) жидкость равномерно движется со скоростью W по вертикаль-

ной трубе, переходя из сечения 1—1 в сечение 2—2 (рис. 16). Расстояние между указанными сечениями обозначим через h .

Применяя к элементарной струйке движущейся жидкости закон живых сил (при установившемся движении), получим теорему Д. Бернулли:

$$\frac{W_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + h_1 = \frac{W_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + h_2$$

или

$$\frac{W^2}{2g} + \frac{P}{\gamma} + h = \text{const},$$

где: W — скорость жидкости или газа в рассматриваемом сечении (в м/сек),

g — ускорение силы тяжести (в м/сек²)

P — давление в рассматриваемом сечении (в кг/м²)

γ — вес единицы объема жидкости или газа (в кг/м³),

h — геометрическая высота, т. е. высота, определяющая положение центра тяжести живого сечения струйки над произвольно выбранной горизонтальной плоскостью (в м).

Величина h является геометрической высотой, величина $\frac{P}{\gamma}$ — пьезометрической высотой или напором, и величина $\frac{W^2}{2g}$ — скоростной высотой или скоростным напором.

Рис. 16. Схема движения жидкости или газов в трубе

Таким образом для идеальной струйки жидкости сумма трех высот или трех напоров — геометрического, пьезометрического и скоростного является для всех сечений трубопровода величиной постоянной.

Для реальной жидкости, т. е. для сжимаемой жидкости, обладающей известной вязкостью, к этому добавляется еще напор, потерянный жидкостью по пути движения между указанными сечениями.

Применяя уравнение Д. Бернулли к печным системам, необходимо отметить, что обычно неизвестной или искомой величиной является разность давлений в потоке и окружающем воздухе на данном уровне, а не абсолютное значение давлений в газовом потоке.

Допустим, что имеется периодическая печь с обратным потоком газов (рис. 17), снабженная топкой A , работающей на кусковом топливе. Продукты горения устремляются из топки в рабочее пространство B печи, опускаются через отверстие в поде и уходят через боров B в дымовую трубу G .

Рассмотрим силы, осуществляющие движение газов через всю систему топка — печь — дымовая труба.

В нижней части печи, под колосниковую решетку топки, да-
вит атмосферный воздух. Если давление атмосферы на плос-
кости горизонта 1—1 дымовой трубы равно P_0 , то на уровне
решетки 2—2 давление составит $P_0 + P_1$, где P_1 — вес столба
воздуха H при данной темпе-
ратуре. Следовательно давле-
ние на плоскость решетки про-
исходит с силой

$$P_0 + P_1 = P_0 + H\gamma_0,$$

где: H — высота столба воз-
духа от уровня зольника топки
до верха дымовой трубы (в m),
 γ_0 — вес единицы объема
воздуха при данной темпе-
ратуре (в kg/m^3),

P_0 — атмосферное давле-
ние на уровне верхнего сече-
ния дымовой трубы (в kg/m^2).

В поперечном сечении ды-
мовой трубы, находящемся в
одной горизонтальной плос-
кости с колосниковой решеткой топки, газы испытывают дав-
ление, равное

$$P_0 + P_2 = P_0 + H\gamma_t \text{ кг/м}^2,$$

где: P_2 — давление столба газов, высотой H при объемном
весе отходящих из печи газов $\gamma_t \text{ кг/м}^3$,

P_0 — атмосферное давление (в kg/m^2).

Вычитая это равенство из предыдущего, будем иметь

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

или после сокращений

$$P_1 - P_2 = H(\gamma_0 - \gamma_t) \text{ кг/м}^2 \text{ или мм вод. ст.}$$

Следовательно, разность давлений соответствует произведе-
нию из столба газов на разность объемных весов воздуха и го-
рячих газов. Эта разность всегда больше нуля, потому что вес
единицы объема холодного воздуха всегда больше веса единицы
объема горячих газов. Поэтому газы никогда не остаются в рав-
новесии и движутся по направлению от топки к дымовой трубе.

Таким образом движение газов в печах осуществляется бла-
годаря влиянию дымовой трубы в силу разности давлений на
концах системы топка — печь — дымовая труба. При этом не
труба *тянет*, как это привыкли считать, а более тяжелый столб
воздуха преодолевает давление столба горячих газов и выдав-
ливает их через трубу.

В данном случае движение газов осуществляется естествен-
ным путем. Однако, если разность давлений недостаточна, дви-
жение газов осуществляется слишком медленно и регулирование

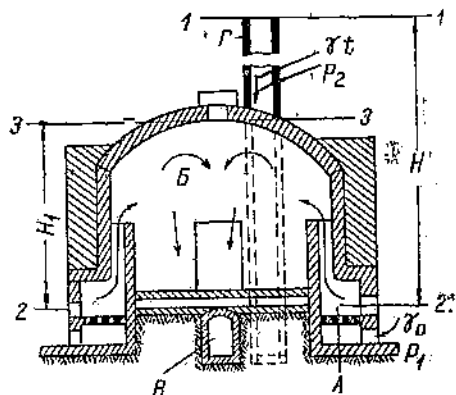


Рис. 17. Схема движения газов в пери-
одической печи

его при помощи дымовой трубы затруднительно. В этом случае устанавливают побудители: дымосос перед дымовой трубой или дутьевой вентилятор, нагнетающий воздух под колосниковую решетку топки, а иногда и дымосос и вентилятор. Интенсивность движения газов при этом резко возрастает и является возможность регулировать его в широких пределах.

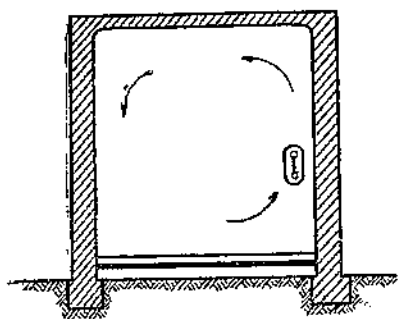


Рис. 18. Схема свободного движения газов

В разобранным примере имеет место вынужденное движение газов, т. е. газы вынуждены проходить строго определенный путь. Это движение является обычным для промышленных установок.

В отличие от него в некоторых случаях может осуществляться свободное движение газов, которое возникает вследствие действия подъемной силы, приобретаемой газом, нагреваемым в холодном воздухе. В качестве примера свободного движения можно привести движение воздуха в закрытой комнате, где установлен горячий радиатор (рис. 18).

3. Сопротивления движению газов

На пути движения газы всегда встречают ряд сопротивлений; при этом различают следующие сопротивления: 1) местные, 2) сопротивления на вертикальных участках пути газов и 3) сопротивления на горизонтальных участках.

К *местным сопротивлениям* относятся все препятствия движению газов, которые возникают в определенном месте вследствие резкого изменения направления или сечения канала. К изменениям направления относятся повороты, которые для уменьшения сопротивления следует выполнять закругленными или устанавливать в каналах соответственно рассчитанные направляющие лопатки.

Величина сопротивления, обусловленного поворотом, определяется по формуле Вейсбаха:

$$h = \frac{\zeta W_0^3}{2g} \gamma_0 \frac{273+t}{273} = \zeta \frac{W_0^3 \gamma_0 (273+t)}{5360} \text{ мм вод. ст. или кг/м}^2,$$

где: ζ — коэффициент сопротивления поворота,

W_0 — средняя скорость газов перед поворотом при 0° Ц и 760 мм рт. ст. (в м/сек),

g — ускорение силы тяжести (в м/сек²),

t — температура газов в месте поворота (в ° Ц),

γ_0 — вес единицы объема газов при 0° Ц и 760 мм рт. ст. (в кг/м³)

Величины коэффициента сопротивления при плавных поворотах зависят от отношения диаметра трубы к среднему радиусу закругления и приведены в табл. 17.

Таблица 17

Трубы \ D/R	0,1	0,4	0,8	1,0	1,4	1,8	2,0
Круглые	0,13	0,14	0,21	0,29	0,66	1,41	1,98
С прямоугольным сечением	0,12	0,15	0,29	0,40	1,01	2,27	3,93

При повороте труб или каналов под углом (рис. 19) коэффициент сопротивления зависит от угла α (табл. 18).

Таблица 18

α	20	40	60	80	90	100	120	140	160	180
κ	0,05	0,14	0,56	1,08	1,44	1,54	2,36	2,91	3,35	3,50

Изменения сечения канала вызывают изменения скорости движения газов. При внезапном расширении канала (рис. 20)

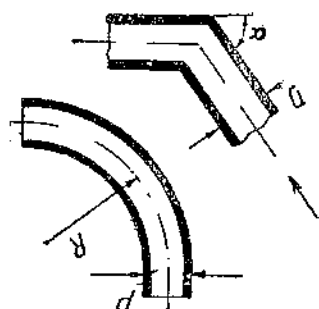


Рис. 19. Изгиб и поворот труб под углом

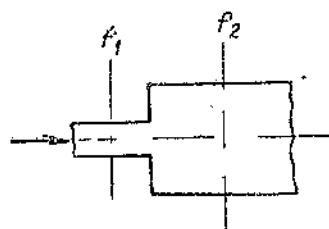


Рис. 20. Внезапное расширение канала

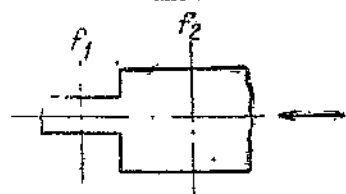


Рис. 21. Внезапное сужение канала

коэффициент сопротивления, отнесенный к скорости в меньшем сечении, равен:

$$\zeta = \left(1 - \frac{f_1}{f_2}\right)^2;$$

при внезапном сужении канала (рис. 21) коэффициент сопротивления равен:

$$\zeta = 0,5 \left[1 - \left(\frac{f_1}{f_2}\right)^2\right].$$

Величина коэффициента сопротивления при внезапном сужении канала приведена в табл. 19.

Таблица 19

$\frac{f_1}{f_2}$	0,001	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8
ζ	0,5	0,5	0,42	0,34	0,25	0,15

Значения коэффициента других видов местных сопротивлений приводятся в различных руководствах и справочниках.

Сопротивления на вертикальных участках пути горячих газов обуславливаются действием подъемной силы, которая направлена или по пути движения газов, или не совпадает с их движением. В первом случае подъемная сила совершает полезную работу, и увеличивает общий напор газов, во втором случае она уменьшает его и является отрицательной.

Определим величину сопротивления подъемной силы газов, в периодической печи (рис. 17) на участке от свода до подовых каналов, т. е. в сечениях 2—2 и 3—3, расстояние между которыми равно H_1 м. Пусть γ_0 — вес единицы объема наружного воздуха и γ_1 — вес единицы объема горячих газов, опускающихся в подподовые каналы. Величина подъемной силы, которую нужно преодолеть в качестве сопротивления опусканию горячих газов, составит:

$$h_{п.с.} = H_1 (\gamma_0 - \gamma_1) \text{ кг/м}^2 \text{ или мм вод. ст.}$$

Если бы периодическая печь была не с обратным, а свходящим газовым потоком, величину, подъемной силы следовало бы причислить к напору газов. Поэтому в шахтных печах, представляющих собой вертикальную трубу, иногда (при малых размерах и небольшой производительности) обходятся без дымовой трубы, так как подъемная сила, приобретаемая в печи газами, преодолевает все сопротивления по пути их движения.

Сопротивлением, действующим на прямых участках пути газов, является трение, которое обуславливается влиянием вязкости и зависит от скорости движения газов, длины пути и степени шероховатости стенок.

На основании экспериментальных данных для определения трения пользуются следующей формулой:

$$\Delta p = \zeta \frac{l}{d} \frac{W_0^2 \gamma_0 (273 + t)}{5360} \text{ мм вод. ст. или кг/м}^2,$$

где: Δp — сопротивление от трения (в кг/м^2 или мм вод. ст.),

ζ — коэффициент трения, найденный из опыта,

l — длина прямого участка (в м),

d — гидравлический диаметр газотока (в м),

γ_0 — вес единицы объема газа (в кг/м^3),

W_0 — средняя скорость движения газа при 0° Ц и 760 мм рт. ст. (в м/сек),

t — температура газа (в °Ц).

При круглых каналах d обозначает их диаметр, при прямоугольных $d = \frac{4f}{\text{периметр канала}}$, где f — площадь канала (в м).

Коэффициент трения зависит от ряда условий и определяется на основании опытов из эмпирических формул.

Приближенно можно принять следующие значения для коэффициента трения (табл. 20).

Т а б л и ц а 20

Наименование газа	Значения коэффициента трения при трении газа		
	о чугуна и стальные доски	о дрова и ровную кирпичную кладку	о кирпич, кокс и древесный уголь
Воздух	0,032	0,05	0,056
Продукты горения каменных углей	0,048	0,072	0,08
Светильный газ	0,024	0,029	0,032

В широких каналах сопротивление от трения незначительно и часто не определяется. В узких каналах и в дымовых трубах сопротивление от трения достигает значительных величин и приблизительно пропорционально квадрату скорости газов (точнее, скорости газов с показателем степени от 1,5 до 2).

Одним из наиболее значительных сопротивлений является сопротивление колосниковой решетки топки, для преодоления которого необходимый для горения воздух часто подается под колосниковые решетки вентилятором (искусственное дутье).

Наименее изученными являются гидравлические сопротивления шахтных печей. На основании работ, проведенных ВИТГЭО (Всесоюзный Институт тепло-гидро-энергооборудования) можно прийти к заключению, что диаметр шахты печи сравнительно слабо сказывается на величине сопротивления, которое зависит от крупности кусков загружаемого материала и равномерности их распределения в шахте.

4. Газослив

При расчете печи обычно определяется расход напора на создание скорости газов (скоростной напор), а также на все сопротивления по пути движению газов. В периодических печах напор, необходимый для преодоления всех сопротивлений до подовой решетки, должен доставлять газовый поток в шахте топки; начиная от подовой решетки, движение газов осуществляется благодаря работе дымовой трубы.

Применение законов гидравлики к пламенным печам было впервые предложено проф. В. Е. Грум-Гржимайло, который высказал положение, что „пламенный поток есть обращенная река“, причем руслом пламенной реки являются своды и стенки печи. Температурное расслоение газового потока обусловли-

вается разностью удельных весов горячего и холодного газов, а границей между холодными и горячими газами, подобно поверхности реки, разделяющей воду и воздух, является свободная поверхность пламенного потока. Для того чтобы холодные газы не застаивались на поду печи, следует определить расстояние от свободного зеркала потока до свода печи, т. е., другими словами, глубину газовой реки. Для равномерного распределения горячих газов по вертикальным каналам пропорционально сечениям последних, их необходимо опускать по каналам сверху вниз, тогда как для правильного распределения холодного воздуха по тем же каналам его следует направлять в них снизу вверх, т. е. так же, как направляется холодная вода.

Основы гидравлики, приложенные проф. И. Г. Есьманом к определению глубины газового потока по предложению Грум-Гржимайло, позволяют определить глубину газослива, аналогично определению глубины потока жидкости.

Если имеется бассейн (рис. 22), из которого выливается по водосливу вода, то уровень h воды над водосливом будет меньше

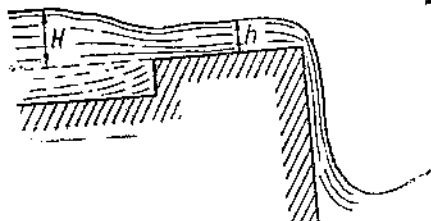


Рис. 22. Схема водослива

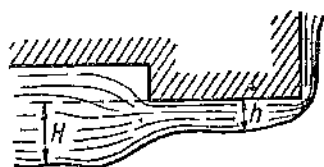


Рис. 23. Схема газослива

уровня H воды в бассейне, и движение воды будет происходить благодаря разности уровней $H - h$.

Если представить себе бассейн опрокинутым (рис. 23) и наполненным горячими газами, то глубина потока над газосливом будет, по аналогии, меньше глубины газового потока в бассейне, и движение газов будет зависеть от разности уровней $H - h$ или, что то же, $h \left(\frac{H}{h} - 1 \right)$. При этом отношение $\frac{H}{h}$ будет зависеть от формы поперечного сечения канала.

Так как полости печей и большинство газовых каналов обычно имеют прямоугольное сечение, проф. И. Г. Есьман выводит для данного случая следующую формулу определения глубины потока h :

$$h = A \sqrt[3]{\frac{V_t^2}{B^3 t}} \mu$$

где: h — глубина потока свободно текущих газов, которая должна соответствовать расстоянию от пода до свода печи во избежание отставания газов от пода (в μ),

V_t — количество газов в печи при данной температуре (в $\text{м}^3 \text{сек.}$)

B — ширина печного пространства (в м).

t — температура газов (в $^{\circ}\text{C}$),

A — коэффициент, зависящий от длины канала, по которому передвигаются газы и от глубины потока.

Значения коэффициента A приведены в табл. 21.

Таблица 21

$H \backslash L$	0,5	1,0	2,0	5,0	∞
0,30	3,20	3,41	3,52	3,62	3,67
0,40	3,07	3,34	3,51	3,61	3,69
0,50	2,95	3,27	3,48	3,59	3,69
0,60	2,75	3,20	3,45	3,58	3,69
0,75	2,71	3,06	3,36	3,56	3,69
1,00	2,43	2,95	3,28	3,52	3,70

Если в пламенной печи протекает недостаточное количество газов, полость печи не будет заполнена газовым потоком и расположенный на поду материал не будет нагреваться, входя в соприкосновение с холодным воздухом. Если количество газов слишком велико, они будут выбиваться из отверстий на поду печи. Следовательно, количество газов должно соответствовать размерам печи.

Так как по мере движения по печи газы охлаждаются и объем их становится меньше, является опасение отставания газового потока от пода в задней части печи. Во избежание этого явления, газовый поток „подпруживают“, уменьшая сечение вылета газов из печи (рис. 24). В этом случае определяют по формуле проф. Есьмана высоту h газового окна. Если высота достаточна и газы заполняют окно, можно быть уверенным в том, что они заполняют и камеру печи, не отставая от пода. В том случае, когда газовый поток поступает из топки в печь через порог a или через перевальную стенку, как например в периодических печах, размеры пламенного окна также определяются по формуле Есьмана.

Из этой же формулы можно определить линейную скорость газов, которая равна:

$$V = \sqrt{\frac{ht}{A^3}} \text{ м/сек.}$$

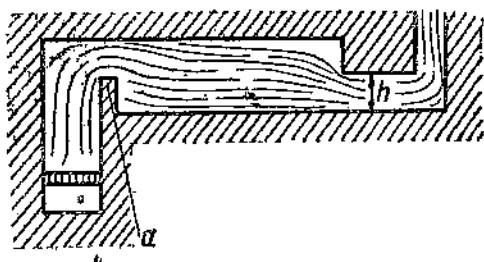


Рис. 24. Схема подпруживания газового потока в печи

Теория газослива Грум-Гржимайло была проверена в ЦКТИ модельной лабораторией проф. М. В. Кирпичева, причем было выявлено, что явления газослива на практике могут быть осуществлены в печах при мало рациональных режимах их работы, например в том случае, когда в печь, имеющую большое расстояние между подом и сводом, поступает незначительное количество газов или газы сильно охлаждены, в силу чего зеркало газового потока отстает от пода и не омывает расположенных на поду печи изделий. В последнее время гидравлическая теория Грум-Гржимайло встречает возражения, которые сводятся к тому, что в ней не учитываются изменения свойства газов при высоких температурах (проф. Доброхотов), точно так же, как и законы теплопередачи, которые отражены лишь косвенно. Кроме того формула проф. Есьмана справедлива только для естественного движения газов и не предусматривает влияния напора газов в случае искусственного дутья.

Глава III

ТЕПЛОПЕРЕДАЧА В ПЕЧАХ

1. Общие определения. Коэффициент теплопередачи

Под теплопередачей понимается совокупность явлений, при которых происходит переход тепла от более нагретого тела к телу, менее нагретому.

Переход тепла может осуществляться тремя способами: 1) теплопроводностью, 2) конвекцией и 3) лучеиспусканием.

Передача тепла *теплопроводностью* происходит в том случае, когда в одном и том же теле возникает некоторая разность температур (например подогреваемый с одного конца холодный железный прут) или когда два тела с различными температурами тесно соприкасаются. При этом различают теплопроводность при стационарном и нестационарном тепловом потоке.

Стационарный тепловой поток имеет место в том случае, когда температура в каждой точке тела все время остается постоянной. Примером стационарного потока является распределение температур в толще стенки непрерывно действующей печи, которая нормально работает и отдает в окружающее пространство все время одно и то же количество тепла.

Нестационарный тепловой поток имеет место в случае непрерывных изменений температуры в каждой точке тела, в силу чего теплосодержание тела непрерывно меняется. Примером подобного случая могут служить стенки периодических печей, которые то нагреваются, то охлаждаются, причем количество отдаваемого ими в окружающее пространство тепла никогда не остается постоянным.

В практике преобладающие случаи при определении теплопередачи теплопроводностью относятся к стационарному тепловому потоку.

Теплопередача посредством *конвекции* происходит в жидкостях и газах и состоит в том, что горячие струи жидкости или газа, омывая поверхность, менее нагретую, непрерывно отдают ей свое тепло. При этом теплопередача происходит тем интенсивнее, чем быстрее происходит движение жидкости или газа. Если газы свободно омывают поверхность (например воздух омывает поверхность радиатора в комнате), конвекция назы-

вается естественной; если движение происходит искусственно (например газы просасываются вентилятором), конвекция называется вынужденной.

Теплопередача *лучеиспусканием* происходит, когда две различно нагретые поверхности расположены на некотором расстоянии друг от друга, причем между ними находится среда, пропускающая лучистую энергию (лучепрозрачная среда). Нагретая поверхность посылает лучистую энергию, которая воспринимается другой поверхностью; при этом часть энергии может отразиться этой поверхностью, часть — пройти через нее и часть — поглотиться поверхностью, превращаясь в тепловую энергию. Чем более лучепрозрачно тело, тем больше лучистой энергии проходит сквозь него, не отражаясь и не поглощаясь телом. Нелучепрозрачными до известной степени являются водяные пары и углекислота.

Лучистой энергией являются электромагнитные колебания, которые движутся в безвоздушном пространстве со скоростью 300 000 км/сек и различаются по длине волн. Поверхность, расположенная по пути распространения лучистой энергии, задерживает часть лучей и трансформирует их в тепловую энергию. Примером распространения лучистой энергии является лучистая энергия солнца, посылающего лучи через мировое пространство, причем часть лучей поглощается нашей одеждой, трансформирующей их в тепловую энергию.

Если поверхность какого-либо тела, температура которого равна t_2 , воспринимает в течение τ часов каким-либо из указанных способов тепло от более нагретого тела, температура которого равна t_1 , то количество воспринятого более холодным телом тепла определяется по формуле:

$$Q = \alpha F (t_1 - t_2) \tau \text{ кал},$$

где: Q — количество тепла воспринятого поверхностью (в кал),

α — коэффициент теплопередачи (в кал/м² °C час),

F — поверхность тела, воспринимающего тепло (в м²)

t_1 — средняя температура тела или среды, отдающих тепло (в °C),

t_2 — средняя температура поверхности, воспринимающей тепло (в °C),

τ — время в часах.

Коэффициент теплопередачи относится к одним из основных понятий теплопередачи и равен количеству тепла, которое воспринимается в течение 1 часа 1 м² поверхности какого-либо тела при условии разности температур между отдающей тепло средой и воспринимающей тепло поверхностью в 1° C. Поэтому и размерность коэффициента теплопередачи — кал/м² °C час.

Коэффициент теплопередачи не является физическим свойством тела. Он зависит от движения жидкостей или газов и от ряда других причин и значения его находятся в каждом отдельном случае из соответствующих формул.

2. Теплопередача посредством теплопроводности

При стационарном потоке тепла, переходящего через 1 м² теплопроводной стенки, количество его определяется по формуле:

$$Q = \frac{\lambda}{\sigma} (t_1 - t_2) \text{ кал,}$$

где $\frac{\lambda}{\sigma}$ — коэффициент теплопроводности стенки.

При этом предполагаются известными температуры внутренней и наружной поверхностей стенки t_1 и t_2 . Сопротивлением переходу тепла в данном случае является только кирпичная стенка печи.

Однако далеко не всегда известны температуры поверхностей стенки; значительно чаще известна температура одной из поверхностей и количество переходящего тепла. Наиболее распространенным случаем является неизвестность температур обеих поверхностей стенки, тогда как известными являются температура газового потока, омывающего внутреннюю поверхность стенки, и температура воздуха, омывающего наружную поверхность. В последнем случае при определении количества переходящего через стенку тепла приходится учитывать сопротивления, возникающие при переходе тепла от газового потока к внутренней поверхности стенки и от наружной ее поверхности — к окружающему стенку воздуху, а также в отдельных случаях определять температуры поверхностей стенки.

Коэффициентом теплопроводности называется количество тепла, проходящее в 1 час через 1 м² нагреваемой поверхности при толщине стенки в 1 м и разности температур на обеих ее поверхностях в 1° Ц.

Ниже приводятся коэффициенты теплопроводности огнеупорных материалов; с повышением температуры коэффициенты теплопроводности возрастают, причем для огнеупорных материалов при приближенных подсчетах можно пользоваться следующими формулами определения теплопроводности:

для шамота $\lambda = 0,8 + 0,0003 t \text{ кал/м } ^\circ\text{Ц час.}$

„ диасна $\lambda = 1,0 + 0,0007 t \text{ „ „}$

„ магнезита $\lambda = 10 - 0,007 t \text{ „ „}$

По данным проф. С. П. Володина для температур холодной поверхности стенки от 100° до 400° и горячей поверхности от 600° до 1200°, коэффициент теплопроводности составляет:

для красного кирпича 1,01 — 1,24 кал/м °Ц час

„ графита 2,12 — 9,00 „ „

„ карборунда 5,22 — 8,32 „ „

„ твердого фарфора 1,55 „ „

Зная коэффициент теплопроводности материала, толщину стенки σ (в м) и разность температур ($t_1 - t_2$) внутренней и наружной поверхности стенки, можно определить количество переходящего тепла.

Пример 1. Определить потерю тепла в час шамотовой стенкой туннельной печи, имеющей размеры $2,5 \times 10$ м, если толщина стенки 1,5 кирпича (0,380 м), температура внутренней ее поверхности $t_1 = 1000^\circ$ и наружной $t_2 = 160^\circ$.

$$t_1 - t_2 = 1000 - 160 = 840^\circ.$$

Теплопроводность шамота определяем по вышеприведенной формуле для средних значений температур, которые составляют $\frac{1000 + 160}{2} = 580^\circ$.

$$\lambda = 0,8 + 0,0003 \cdot 580 = 0,974 \text{ кал/м } ^\circ\text{Ц час.}$$

Поверхность отдающей тепло стенки

$$F = 2,5 \cdot 10 = 25 \text{ м}^2.$$

Отсюда потеря тепла Q составляет:

$$Q = \frac{0,974}{0,38} \cdot 25 (1000 - 160) = 5680 \text{ кал/час.}$$

Пример 2. Определить температуру наружной поверхности шамотового муфеля туннельной печи при температуре внутренней его поверхности 1000° , толщине 65 мм и при передаче изделия с каждого м^2 муфеля 7000 кал в час.

Теплопроводность шамота определяем, приблизительно задаваясь температурой наружной поверхности муфеля в 1800° :

$$\lambda = 0,8 + 0,0003 \cdot 1800 = 1,19 \text{ кал/м } ^\circ\text{Ц час.}$$

Из основного уравнения определяем температуру наружной поверхности муфеля:

$$t_1 = t_2 + \frac{Q_0}{\lambda} ^\circ\text{Ц.}$$

Подставляем найденные значения:

$$t_1 = 1000 + \frac{7000 \cdot 0,065}{1,19} = 1383^\circ.$$

Эта температура для шамота является предельной; следовательно больше 7000 кал с 1 м^2 муфеля передавать тепла не следует.

Если известны только температуры газового потока и воздуха и неизвестны температуры стенок печи, коэффициент теплопередачи можно определить, исходя из следующих рассуждений.

1. Переход определенного количества тепла от горячих газов — к 1 м^2 внутренней поверхности стенки составит:

$$Q = \alpha_1 (T_1 - t_1) \text{ кал/м}^2 \text{ час,}$$

где: α_1 — коэффициент теплопередачи от горячих газов к внутренней поверхности стенки (в $\text{кал/м}^2 \text{ } ^\circ\text{Ц час}$),

T_1 — средняя температура горячих газов (в $^\circ\text{Ц}$),

t_1 — средняя температура внутренней поверхности стенки (в $^\circ\text{Ц}$).

2. Переход того же количества тепла через стенку составит:

$$Q = \frac{\lambda}{\sigma} (t_1 - t_2) \text{ кал/м}^2 \text{ час,}$$

где: λ — коэффициент теплопроводности стенки (в $\text{кал/м } ^\circ\text{Ц час}$),

σ — толщина стенки (в м),

t_1 — средняя температура внутренней поверхности стенки (в $^\circ\text{Ц}$),

t_2 — средняя температура наружной поверхности стенки (в $^\circ\text{Ц}$).

3. Переход того же количества тепла от наружной поверхности стенки к воздуху составит:

$$Q = \alpha_2 (t_2 - T_2) \text{ кал/м}^2 \text{ } ^\circ\text{Ц час,}$$

где: α_2 — коэффициент теплопередачи от наружной поверхности стенки воздуху (в $\text{кал/м}^2 \text{ } ^\circ\text{Ц час}$),

t_2 — средняя температура наружной поверхности стенки (в $^\circ\text{Ц}$),

T_2 — средняя температура омывающего стенку воздуха (в $^\circ\text{Ц}$).

Определяя во всех трех уравнениях разность температур, получаем:

$$T_1 - t_1 = \frac{Q}{\alpha_1} = Q \cdot \frac{1}{\alpha_1}$$

$$t_1 - t_2 = \frac{Q\sigma}{\lambda} = Q \cdot \frac{\sigma}{\lambda}$$

$$t_2 - T_2 = \frac{Q}{\alpha_2} = Q \cdot \frac{1}{\alpha_2}$$

Складывая правые и левые части уравнений, имеем:

$$T_1 - T_2 = Q \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\sigma}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \right);$$

$$\text{откуда } Q = \frac{T_1 - T_2}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\sigma}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \text{ кал/м}^2 \text{ час,}$$

или $Q = K(T_1 - T_2) \text{ кал/м}^2 \text{ час,}$

$$\text{где } K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\sigma}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \text{ кал/м}^2 \text{ } ^\circ\text{Ц час,}$$

т. е. коэффициент теплопередачи численно равен единице, деленной на сумму действительных для данных условий коэффициентов сопротивлений.

Таким образом, по аналогии с гидравликой, расход тепла пропорционален разности температур и обратно пропорционален сумме сопротивлений прохождению тепла, так же, как в электротехническом законе Ома сила тока пропорциональна напряжению и обратно пропорциональна сопротивлению проводника, причем это сопротивление состоит из суммы отдельных сопротивлений.

Величина тепловых сопротивлений для криволинейных поверхностей определяется для различных случаев отдельно и составляет например:

для стенок трубы, внутренний диаметр которой — D_0 и наружный D_1 , на 1 пог. м трубы

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\pi D_0 \alpha_1} + \frac{1,151}{\pi \lambda} \lg \frac{D_1}{D_0} + \frac{1}{\pi D_1 \alpha_2}} \text{ кал/м}^2 \text{ } ^\circ\text{Ц час;}$$

для цилиндрического свода с центральным углом 60° при внутреннем радиусе свода $-R_0$ и наружном $-R_1$, считая на 1 пог. м свода

$$K = \frac{1}{\frac{R_1}{1,047 R_0 \alpha_1} + \frac{\lg R_0}{0,455 \lambda} + \frac{1}{1,047 R_1 \alpha_2}} \text{ кал/м}^2 \text{ } ^\circ\text{Ц час.}$$

Коэффициент теплопередачи 1 м² многослойной стенки определяется из формулы:

$$Q = \frac{T_1 - T_2}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\sigma_1}{\lambda_1} + \frac{\sigma_2}{\lambda_2} + \frac{\sigma_3}{\lambda_3} + \dots + \frac{\sigma_n}{\lambda_n} + \frac{1}{\alpha_2}} \text{ кал/м}^2 \text{ } ^\circ\text{Ц час,}$$

где: $\sigma_1; \sigma_2; \sigma_3 \dots \sigma_n$ — толщина различных слоев стенки (в м), $\lambda_1; \lambda_2; \lambda_3 \dots \lambda_n$ — коэффициенты теплопроводности различных слоев (в кал/м $^\circ\text{Ц час}$);

остальные обозначения те же, что и в предыдущей формуле.

Пример 3. Определить количество тепла, передаваемое через 1 м² стенки шамотового рекуператора при условии, что температура газов в печи 800° , температура окружающего печь воздуха 20° , коэффициент теплопередачи от газов к стенке рекуператора 30 кал/м² $^\circ\text{Ц час}$, толщина стенки рекуператора 40 мм и коэффициент теплопередачи от стенки рекуператора воздуху 12 кал/м² $^\circ\text{Ц час}$.

Определяем коэффициент теплопередачи K шамотового рекуператора:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{30} + \frac{0,040}{1,04} + \frac{1}{12}} = 6,45 \text{ кал/м}^2 \text{ } ^\circ\text{Ц час,}$$

Тогда количество передаваемого тепла 1 м² рекуператора будет составлять:

$$Q = 6,45 (800 - 20) = 5040 \text{ кал/м}^2 \text{ час.}$$

Если увеличить скорость прохождения воздуха через рекуператор и тем самым повысить коэффициент теплопередачи воздуху до 18 кал/м² $^\circ\text{Ц час}$, общий коэффициент теплопередачи K будет равен:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{30} + \frac{0,040}{1,04} + \frac{1}{18}} = 7,9 \text{ кал/м}^2 \text{ } ^\circ\text{Ц час}$$

и количество передаваемого тепла составит

$$Q = 7,9 (800 - 20) = 6150 \text{ кал/м}^2 \text{ час.}$$

Таким образом, увеличение α_2 на 50 проц. дает увеличение Q на 22 проц. Наибольшее термическое сопротивление в обоих случаях находится на воздушной стороне.

Не всегда однако наибольшее термическое сопротивление находится на воздушной или газовой стороне; так, например, при определении коэффициента теплопередачи через составную стенку вращающейся трубо-печи, наибольшим тепловым сопротивлением обладает футеровка печи, коэффициент теплопроводности которой может быть принят (при клинкеро-бетонной фу-

теровке) близким к 1. Количество проходящего через кожу печи тепла может быть определено в этом случае по формуле:

$$Q = \frac{l\pi(T_1 - T_2)}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{\alpha_2 d_2} + \frac{1}{2\lambda_2} \ln \frac{d_{\text{ср}}}{d_2} + \frac{1}{2\lambda_1} \ln \frac{d_1}{d_{\text{ср}}}} \text{ кал/час,}$$

где: l — длина печи (в м),

T_1 — средняя температура газов (в °Ц),

T_2 — средняя температура воздуха (в °Ц),

d_1 — наружный диаметр трубы (в м),

d_2 — внутренний диаметр трубы (в м),

$d_{\text{ср}}$ — диаметр поверхности, разделяющей слои футеровки (в м),

α_1 — коэффициент теплопередачи от газов к внутренней поверхности футеровки (в кал/м² °Ц час),

α_2 — коэффициент теплопередачи от кожура печи окружающему воздуху (кал/м² °Ц час),

λ_1 и λ_2 — коэффициенты теплопроводности обоих слоев футеровки (в кал/м °Ц час).

При нестационарном потоке тепла применение общего уравнения теплопроводности значительно затрудняется и решается обычно приближенными методами.

Одним из распространенных методов является графический метод расчета (метод Шмитта), который заключается в том,

что при определении теплопередачи стен (например, стен периодической печи) толщина стены делится на равное количество слоев и весь период процесса нагревания стены делится на определенные отрезки времени. Далее строится кривая температур в печи в зависимости от времени обжига, и кривая распределения температур в стене печи по отдельным периодам обжига, исходя из которой определяется переход тепла через отдельные слои стены.

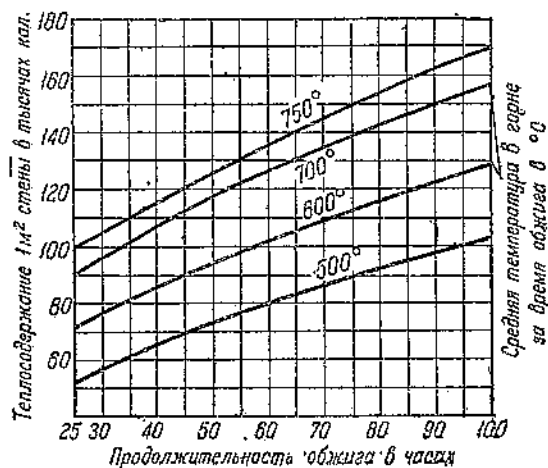


Рис. 25. График зависимости количества тепла, аккумулируемого стенками периодической печи, от средней температуры обжига

При определении количества тепла, поглощаемого стенами периодических печей (аккумуляции тепла стенами), можно воспользоваться графиком (рис. 25), построенным на основании испытаний периодических печей (горнов) Боровичских заводов.

3. Теплопередача посредством конвекции

Количество тепла, передаваемое конвекцией, также определяется из основной формулы теплопередачи:

$$Q = \alpha F (t_1 - t_2) \tau \text{ кал},$$

причем коэффициент теплопередачи α зависит от большого числа факторов, к которым относятся физические свойства жидкости или газов, скорость их движения, характер и размеры поверхности стенки, положение стенки в пространстве и абсолютные значения температур стенок и жидкости или газов.

При технических расчетах этот коэффициент обычно определяется по упрощенным, но технически достаточно точным формулам, выведенным различными авторами на основании специальных опытов и исследований. При этом различают свободную и вынужденную конвекцию.

Явления теплопередачи при свободной конвекции встречаются сравнительно редко и имеют место, например, при омывании воздухом стальных радиаторов или при охлаждении стен печей, расположенных в зданиях и окруженных спокойным воздухом.

Значительно чаще происходит передача тепла вынужденной конвекцией, к которой относятся все случаи, когда скорость перемещения частиц воздуха или газа, происходящего в результате изменения плотности их, незначительна по сравнению со скоростью, вызванной внешними причинами, т. е. в большинстве случаев, имеющих место при движении газов в промышленных печах.

Наиболее употребительными упрощенными формулами для определения коэффициента теплопередачи конвекцией (α_k) являются следующие:

Коэффициент Нуссельта, определяющий коэффициент теплопередачи при свободной конвекции для обращенной вверх горизонтальной плиты:

$$\alpha_k = 2,3 \sqrt[4]{t_1 - t_2} \text{ кал/м}^2 \text{ } ^\circ\text{Ц час.}$$

и для вертикальной плиты

$$\alpha_k = 2,2 \sqrt[4]{t_1 - t_2} \text{ кал/м}^2 \text{ } ^\circ\text{Ц час.}$$

где t_1 — температура поверхности плиты (в $^\circ\text{Ц}$),
 t_2 — температура воздуха (в $^\circ\text{Ц}$).

При вынужденной конвекции коэффициент теплопередачи для плоских поверхностей зависит от скорости газов, движущихся в направлении, параллельном поверхности нагрева, и численной при 20°Ц .

При скорости меньше 5 м/сек : для гладкой поверхности $\alpha_k = 4,8 + 3,4 W$; для шероховатой поверхности $\alpha_k = 5,3 + 3,6 W \text{ кал/м}^2 \text{ } ^\circ\text{Ц час.}$

При скорости больше 5 м/сек: для гладкой поверхности $\alpha_k = 6,12 W^{0,78}$; для шероховатой $\alpha_k = 6,47 W^{0,78}$ кал/м²·°Ц час.

При больших температурах следует приводить скорость к температуре 20°; так, например, если скорость при 100° составляет 6 м/сек, то при 20° скорость будет: $6 \frac{273 + 20}{273 + 100} = 4,7$ м/сек.

Теплоотдача от газового потока к трубам может быть найдена по данным Рейнера.

Для поперечного потока воздуха или газа, идущего перпендикулярно одной трубе при сравнительно слабом его завихрении

$$\alpha_k = 4 \frac{W_0^{0,55}}{d^{0,44}} \text{ кал/м}^2 \cdot \text{°Ц час.}$$

Для поперечного потока воздуха или газа, проходящего через трубы, расположенные параллельным пучком (коридорное расположение) или в шахматном порядке, значения коэффициента α_k в зависимости от скорости газов и диаметра трубы сведены в табл. 22.

Таблица 22

Коридорное расположение	Число рядов труб	Шахматное расположение
$\alpha_k = 4,2 \frac{W_0^{0,654}}{d^{0,346}}$	2	$\alpha_k = 5,3 \frac{W_0^{0,69}}{d^{0,31}}$
$\alpha_k = 4,4 \frac{W_0^{0,654}}{d^{0,346}}$	3	$\alpha_k = 6,1 \frac{W_0^{0,69}}{d^{0,31}}$
$\alpha_k = 4,5 \frac{W_0^{0,654}}{d^{0,346}}$	4	$\alpha_k = 6,8 \frac{W_0^{0,69}}{d^{0,31}}$
$\alpha_k = 4,55 \frac{W_0^{0,654}}{d^{0,346}}$	5	$\alpha_k = 7,0 \frac{W_0^{0,69}}{d^{0,31}}$
$\alpha_k = 4,55 \frac{W_0^{0,654}}{d^{0,346}}$	Больше 5	$\alpha_k = 7,6 \frac{W_0^{0,69}}{d^{0,31}}$

Во всех этих формулах W_0 — скорость газов в м/сек при 0° Ц и 760 мм рт. ст. и d — диаметр трубы в м.

Для турбулентного (взвихренного) потока газа или воздуха при движении внутри гладких труб коэффициент теплопередачи α_k составляет:

$$\alpha_k = \frac{3 W_0^{0,8}}{d^{0,25}} \text{ кал/м}^2 \cdot \text{°Ц час.}$$

где обозначения те же, что и в предыдущей формуле.

При движении по трубам воды, теплопередача внутри труб составляет по формуле Шака:

$$\alpha_k = 2900 W^{0,85} (1 + 0,014t) \text{ кал/м}^2 \cdot \text{°Ц час,}$$

где W — истинная скорость движения воды (в м/сек),
 t — температура воды (в °Ц).

Все приведенные выше рассуждения относятся к тому случаю, когда разность температур $t_1 - t_2$ остается постоянной вдоль всей поверхности нагрева. Однако на практике это явление имеет место сравнительно редко; обычно температура горячей и холодной среды непрерывно изменяется, причем движение газов или жидкости может происходить в одном направлении по обе стороны разделяющей их стенки, или в противоположных направлениях.

В этих случаях следует брать среднюю разность температуры, которая определяется по формуле:

$$\Delta t_{\text{средн.}} = \frac{\Delta t_{\text{max}} - \Delta t_{\text{min}}}{\ln \frac{\Delta t_{\text{max}}}{\Delta t_{\text{min}}}} = \frac{\Delta t_{\text{max}} - \Delta t_{\text{min}}}{2,303 \lg \frac{\Delta t_{\text{max}}}{\Delta t_{\text{min}}}}$$

где: $\Delta t_{\text{средн.}}$ — средняя разность температур горячей и холодной среды (в °Ц),

Δt_{max} — максимальная разность их температур (в °Ц),

Δt_{min} — минимальная разность их температур (в °Ц).

В первом случае в знаменателе применяются натуральные логарифмы $[\ln]$, во втором — десятичные $[\lg]$.

Пример 4 Определить среднюю разность температур в воздухоподогревателе, работающем противотоком, между горячими газами и воздухом, если горячие газы поступают в подогреватель при температуре 600° и покидают его при 300°, а воздух поступает при 20° и нагревается до 200°.

При противотоке — наивысшей температуре газов с одной стороны стенки соответствует наивысшая же температура воздуха с другой стороны стенки. Следовательно, максимальная разность температур газов и воздуха будет составлять:

$$\Delta t_{\text{max}} = 600 - 200 = 400^\circ.$$

Минимальная разность температур газов и воздуха

$$\Delta t_{\text{min}} = 300 - 20 = 280^\circ.$$

Средняя разность их температур

$$\Delta t_{\text{средн.}} = \frac{400 - 280}{\ln \frac{400}{280}} = \frac{120}{\ln 1,43} = 335^\circ.$$

В том же воздухоподогревателе, работающем прямотоком, наивысшей температуре газов соответствует самая низшая температура воздуха по другую сторону разделяющей газ и воздух стенки. В этом случае разность температур будет составлять:

$$\Delta t_{\text{max}} = 600 - 20 = 580^\circ.$$

$$\Delta t_{\text{min}} = 300 - 200 = 100^\circ.$$

$$\Delta t_{\text{средн.}} = \frac{580 - 100}{\ln \frac{580}{100}} = \frac{480}{\ln 5,8} = 274^\circ.$$

Таким образом, при противоточном принципе работы воздухоподогревателей, разность температур выше; следовательно, поверхность нагрева воздухоподогревателя в этом случае меньше, чем при прямотоке.

4. Теплопередача посредством лучеиспускания

Процесс передачи тепла от продуктов горения топлива обжигаемому материалу или изделиям занимает в печах большое место и в некоторых типах печей, например в муфельных печах, является единственным способом передачи тепла.

Нагретое тело с зачерненной поверхностью излучает энергию, количество которой пропорционально четвертой степени абсолютной температуры тела и выражается формулой:

$$E_s = c \left(\frac{T}{100} \right)^4 \text{ кал/м}^2 \text{ час},$$

где E_s — количество тепла, излучаемого телом (в кал/м² час),

c — коэффициент лучеиспускания,

T — абсолютная температура тела (в ° Ц).

Коэффициент лучеиспускания для абсолютно-черного тела, находящегося в полном пространстве, равен 4,95. Для остальных тел он различен, причем значения его меньше 4,95 и сведены в табл. 23.

Таблица 23

Коэффициенты излучения для различных тел

Наименование тела	Род поверхности	Коэффициент излучения c (в кал/м ² ° Ц час)
Абсолютно черное тело	Полное пространство	4,95
Ламповая сажа	Гладкая	4,80
Железо	Матовая окисленная	4,32
Чугун	Шероховатая окисленная	4,39
Шамотовый кирпич	После практического употребления	3,70
Силикатный кирпич	Шероховатая	4,00-4,20
Различный огнеупорный кирпич	В практическом применении	3,50-3,80
Красный кирпич	Шероховатая	4,60
Фарфор	Глазурованная	4,58
Известковый раствор	Белая, шероховатая	4,60
Гипс	Толщина 0,5 мм	4,48
Стекло	Гладкая	4,65

Количество воспринятого тепла телом, менее нагретым, от более нагретого определяется по формуле Стефана и Больцмана, и для общего случая составляет:

$$Q_a = cF \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \text{ кал.}$$

где: c — коэффициент лучеиспускания, значения которого выбираются по табл. 23,

F — поверхность лучеиспускающего тела (в m^2),
 T_1 — абсолютная температура лучеиспускающего тела (в $^{\circ}C$),
 T_2 — абсолютная температура лучепоглощающего тела (в $^{\circ}C$),
 τ — время (в часах).

Для двух взаимно лучеиспускающих параллельных плоскостей коэффициент лучеиспускания равен

$$c = \frac{1}{\frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2} - \frac{1}{4,95}},$$

где: c_1 — коэффициент лучеиспускания лучеиспускающей поверхности,

c_2 — то же лучепоглощающей поверхности.

Потеря тепла лучеиспусканием через открытую дверцу печи определяется по формуле Шака:

$$Q_d = 4,5 F \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 \text{ кал/час},$$

где: F — площадь дверцы (в m^2),

T_1 — абсолютная температура газового потока (в $^{\circ}C$).

Весьма важное значение имеет лучеиспускание газов. Из газов, входящих в состав продуктов полного горения топлива, лучеиспускают главным образом углекислота (CO_2) и водяные пары (H_2O). При этом количество тепла, излучаемое 1 m^2

поверхности газового потока, возрастает с повышением температуры газов и понижением температуры поверхности нагрева, а также с увеличением толщины слоя газов, его парциального давления и коэффициента излучения поверхности нагрева.

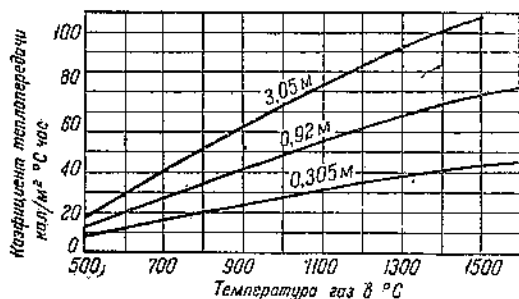


Рис. 26. Излучение газовых слоев толщиной 3,05; 0,92 и 0,35 и содержащих 12% CO_2 и 6% H_2O на кирпичную или железную поверхность при разности температур между газом и поверхностью в $100^{\circ}C$

Для получения количества тепла, переданного лучеиспусканием газов, определяют парциальные давления CO_2 и H_2O в

общей смеси газов и затем по таблицам или графикам находят количество тепла, излучаемого каждым газом в отдельности.

Определение коэффициента теплопередачи при излучении газового потока различных толщин слоев, содержащего 12 проц. CO_2 и 6 проц. H_2O , на кирпичную и железную поверхность может быть произведено по данным Шака, приведенным на рис. 26.

При неполном горении топлива выделяется сажи́стый углерод, который нагревается до температуры газов, причем раскаленные его частицы начинают лучеиспускать. Интенсивность излучения такого пламени, называемого светящимся пламенем, значительно выше, чем несветящегося пламени, получаемого в результате полного горения топлива. По мере сгорания сажи́стых частичек углерода лучеиспускание пламени уменьшается. Определение теплопередачи светящегося пламени расчетным путем может быть произведено лишь грубо приближенно.

Пример 5. Определить количество тепла, переданного лучеиспусканием в топку вращающейся печи на 1 м^2 поверхности футеровки при температуре газового потока 1500°Ц , температуре внутренней поверхности футеровки 1400° и диаметре печи $3,0 \text{ м}$.

Для определения воспользуемся графиком (рис. 26). Коэффициент теплопередачи в данном случае составляет $110 \text{ кал/м}^2 \text{ } ^\circ \text{Ц час}$.

$$Q_d = 110 (1500 - 1400) = 11\,000 \text{ кал/м}^2 \text{ час.}$$

Пример 6. Определить потерю тепла лучеиспусканием через открытую топливную трубочку гофманской печи, если диаметр трубочки 100 мм и температура в печи 1000° .

Площадь сечения трубочки составляет

$$F = 0,786 \cdot 0,19^2 = 0,028 \text{ м}^2.$$

Количество тепла, теряемое через трубочку, составит:

$$Q_d = 4,5 \cdot 0,028 \left(\frac{1000 + 273}{100} \right)^4 = 4,5 \cdot 0,028 \cdot 12,73^4 = 3300 \text{ кал/час.}$$

5. Суммарный коэффициент теплопередачи в печах

В большинстве печей теплопередача происходит одновременно как посредством конвекции, так и посредством лучеиспускания. При расчетах коэффициенты теплопередачи определяются отдельно для каждого из этих видов и затем суммируются.

Так, например, при определении потерь тепла через печную кладку всегда имеют место оба вида теплопередачи как внутри печи, так и снаружи ее.

Значения суммарного коэффициента теплопередачи в окружающее печь пространство для керамических печей и вращающихся трубо-печей, приведенные В. Штегером и Шаком, в зависимости от температуры внешней поверхности стенки даны в табл. 24.

Значение суммарного коэффициента теплопередачи в пламенных печах в зависимости от разности температуры газового потока и наивысшей температуры материала приближенно может быть определено как сумма коэффициентов теплопередачи лучеиспусканием и конвекцией, причем первый определяется из графика (рис. 26), а второй — по формулам (стр. 62 и 63).

Пример 7. Определить по данным примера 5 помимо тепла, передаваемого материалу лучеиспусканием, также количество тепла, передаваемого конвекцией при средней скорости газов $6,8 \text{ м/сек}$.

Таблица 24

Температура внешней поверхности стенки (в °Ц)	Суммарный коэффициент теплопередачи для вертикальных и горизонтальных стенок керамических печей	Коэффициент теплопередачи для цилиндрических стенок вращающихся печей
	(в кал/м² °Ц час	
10	7,4	8,4
25	8,6	8,9
40	9,6	9,2
60	10,9	10,0
80	11,6	10,6
100	12,4	11,4
130	13,8	13,0
160	15,9	14,3
200	17,4	16,7
240	19,3	19,0
280	21,4	21,5
320	24,1	24,3
350	26,1	—
400	29,8	—

Коэффициент теплопередачи конвекцией определяем из формулы:

$$\alpha_k = 6,47 W^{0,78} = 6,47 \cdot 6,80^{0,78} = 28,9 \text{ кал/м}^2 \text{ °Ц час.}$$

Количество тепла, передаваемого на 1 м² конвекцией составляет:

$$Q_k = 28,9 (1500 - 1400) = 2890 \text{ кал/м}^2 \text{ час.}$$

Суммарный коэффициент теплопередачи

$$\alpha_k + \alpha_k = 110 + 28,9 = 138,9 \text{ кал/м}^2 \text{ °Ц час.}$$

Суммарное количество передаваемого на 1 м² тепла

$$Q_k + Q_k = 11000 + 2890 = 13890 \text{ кал/м}^2 \text{ час.}$$

Глава IV

СВЯЗЬ МЕЖДУ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИМИ И ТЕПЛОВЫМИ ПРОЦЕССАМИ ПРИ ОБЖИГЕ

При обжиге строительных материалов и изделий происходят различные физико-химические явления, в результате которых материалы и изделия меняют свою структуру и приобретают новые свойства. Эти явления всегда связаны с тепловыми явлениями; они протекают при определенных температурах и сопровождаются или затратой тепла или его выделением.

При осуществлении обжига материалов в печах всегда необходимо обеспечить наиболее благоприятные условия для протекания физических и химических процессов, расходуя при этом минимальное количество тепла при наивысшей производительности печных установок.

1. Обжиг вяжущих материалов

При обжиге вяжущих материалов: гипса, извести и цемента, всегда содержащих кристаллизационную (химически связанную) влагу, процессу обжига предшествует предварительная сушка материалов. В зависимости от содержания влаги, процесс сушки занимает большее или меньшее место в общем процессе обжига. Так, например, при обжиге гипса, являющегося соединением сернокислой извести (CaSO_4) с двумя молекулами кристаллизационной воды ($2\text{H}_2\text{O}$), процесс обжига сводится к удалению большего или меньшего количества этой воды и по существу является не обжигом, а обезвоживанием гипса. Сохранение влаги в известняке сравнительно незначительно, в силу чего и процесс сушки при обжиге извести занимает относительно мало места. При обжиге сырьевой цементной смеси, последняя искусственно увлажняется; количество влаги при сухом способе производства составляет 10—14 проц. от веса сухой массы сырья, достигая при мокром способе производства 50 проц. Естественно, что в этом случае процесс сушки, предшествующий процессу обжига, требует значительной затраты времени и большего расхода топлива.

Удаление механически связанной влаги происходит при температурах до 200° . При удалении этой влаги тепло затрачивается: на нагревание материала до 200° , на нагревание влаги

до 100° (100 кал на 1 кг влаги) и на испарение этой влаги (540 кал на 1 кг влаги), т. е. затрачивается значительное количество тепла. При удалении кристаллизационной влаги, происходящем при температуре до 900°, расход тепла еще более увеличивается, так как помимо дополнительного нагревания материала тепло расходуется на перегрев водяных паров.

Следующим по времени процессом для большинства вяжущих материалов является процесс разложения углекислого магния ($MgCO_3$) и углекислого кальция ($CaCO_3$), которые почти всегда являются составной частью сырых материалов.

Процесс разложения $MgCO_3$ при обжиге в печах происходит при 600—700° и связан с затратой тепла, составляющей около 344 кал на 1 кг $MgCO_3$. Разложение $CaCO_3$ при обжиге в печах происходит при температуре от 900° до 1200° и связано с затратой около 425 кал тепла на 1 кг $CaCO_3$. Таким образом, газовый поток должен нагреть материал до 600—1200° и сообщить ему сверх этого еще значительное количество тепла на разложение, что резко понижает его температуру. Процессом разложения $MgCO_3$ и $CaCO_3$ заканчивается обжиг извести.

Обжиг портланд-цементного клинкера связан с дальнейшим повышением температуры до 1400—1430°, при которой завершаются процессы клинкерообразования и происходят явления спекания. В процессе клинкерообразования материал сначала отдает до 100—110 кал тепла на каждый кг клинкера, а затем вновь поглощает некоторое количество тепла.

Таким образом процесс обжига портланд-цементного клинкера связан, с одной стороны, с большим расходом тепла, а с другой стороны, с некоторым возвратом тепла материалом. Во всех случаях тепло нагретого в процессе обжига материала в дальнейшем используется для нагревания идущего на горение воздуха, благодаря чему за процессом обжига непосредственно следует охлаждение материала.

Обычно все указанные процессы: сушка, подогрев, обжиг и охлаждение протекают в печах последовательно друг за другом, не разграничиваясь определенными интервалами, и называются общим термином „обжиг“. Только в самое последнее время при обжиге портланд-цементного клинкера процесс сушки и подогрева сырьевой смеси начали выделять из общего процесса обжига и производить на специальных решетках (печь „Леполь“).

Установление рационального режима обжига того или иного материала характеризуется протеканием описанных выше процессов и может быть изображено графически в виде кривой обжига, нанесенной по длине или высоте печи, в которой производится обжиг.

Кривая обжига вяжущих материалов обычно состоит из двух кривых: одной, характеризующей спадание температуры газового потока, и другой, характеризующей нарастание температуры материала по длине или высоте печи.

Процесс обжига извести и портланд-цементного клинкера во вращающейся печи характеризуется кривыми, представленными на рис. 46 и 47.

Так как наиболее низкие температуры газов соответствуют сушке, а наиболее высокие — обжигу материалов, почти все печи, обжигающие вяжущие материалы, работают противотоком, т. е. материал движется навстречу газовому потоку. При этом обжиг производится почти всегда окислительным пламенем.

2. Обжиг керамических материалов и изделий

Обжиг керамических строительных материалов, как и обжиг огнеупорных изделий, можно в зависимости от физико-химических явлений подразделить на три основных температурных периода.

В первом периоде происходит удаление воды затворения и гигроскопической влаги изделий, обычно заканчивающееся в интервале температур 120 — 200°.

Второй период характеризуется удалением химически связанной влаги и началом химических реакций, протекающих при температурах от 200° до 900°.

На протяжении третьего периода происходит спекание черепка изделий и в материале развиваются физико-химические процессы, протекающие при высоких температурах — в интервале 900 — 1700°.

В зависимости от структуры изделий, каждый период характеризуется определенной продолжительностью и постепенным нарастанием как температуры газового потока, так и изделий. Эти периоды значительно длиннее соответствующих периодов при обжиге вяжущих материалов, и подъем температуры изделия происходит значительно медленнее, чем вяжущих материалов, так как при сушке и обжиге всегда обязательно сохранение формы изделий.

Сушка изделий и в этом случае связана со значительным расходом тепла и во избежание явлений запаривания (раскисания) производится в первый период на протяжении от 10 до 60 часов, в зависимости от массивности, размеров изделий и их начальной влажности.

Во второй период расход тепла на сушку еще более возрастает, так как содержание химически связанной влаги обычно превышает гигроскопическую влажность, вызывая необходимость в дополнительном расходе топлива в периодических печах или резко понижая температуру газов в печах непрерывного действия. Вследствие значительного охлаждения газов нарушаются условия, обеспечивающие завершение процессов горения топлива, и углерод в виде сажи, а также смолы, могут осаждаться на поверхности и проникать в поры изделий, выгорая при возрастании температуры. Испарение химически связанной влаги производится весьма осторожно, так же как и дальнейшее нагревание изделий, которое сопровождается потерей изделиями пластичности и изменением их объема.

На протяжении третьего периода, характеризующегося наиболее высокими температурами, происходит максимальное развитие физико-химических процессов, — явления спекания и образование жидких стеклообразных сплавов. При этом в большин-

стве случаев обжиг необходимо производить в восстановительном пламени, которое, кроме более равномерной передачи тепла, участвует в химических процессах, способствуя, например, переводу солей окиси железа в соли закиси железа при обжиге фарфора. Физико-химические процессы третьего периода обжига протекают сравнительно медленно, и поэтому для их завершения необходима выдержка изделий при максимальной температуре, которая в зависимости от рода изделий и типа печи продолжается от 2 до 48 часов.

После выдержки изделий в печах при максимальной температуре обжига, в тех же печах производится и охлаждение изделий при помощи воздуха, который при этом нагревается и поступает на горение или для целей сушки. Так как в процессе охлаждения в изделиях протекает ряд физико-химических процессов, охлаждение их происходит значительно медленнее охлаждения вяжущих материалов, причем скорость охлаждения в определенных температурных интервалах меняется. Исходя из технологических требований, организуется и процесс охлаждения, причем воздух или непосредственно омывает изделия, или нагревается в рекуператорах, стенки которых находятся под воздействием тепла продвигающихся мимо них изделий. В последнем случае охлаждение протекает значительно медленнее.

Количество воздуха, охлаждающего изделия, обычно превышает необходимое для сжигания топлива, и избыточный горячий воздух используется для сушки и отопления.

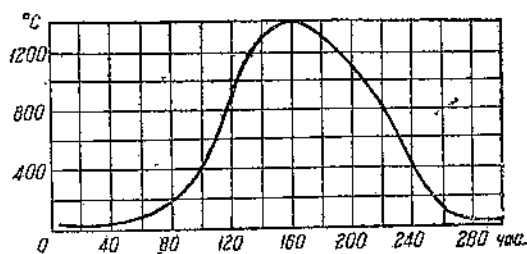


Рис. 27. Кривая обжига фасонного шамотного кирпича в периодической печи

Для обжига керамических и огнеупорных материалов с технической точки зрения является более сложным процессом и требует для нормального протекания большей тщательности температурного режима, чем обжиг вяжущих материалов.

Поэтому для рационального ведения обжига различных изделий в каждом отдельном случае задаются определенным температурным режимом, чем обжиг вяжущих материалов.

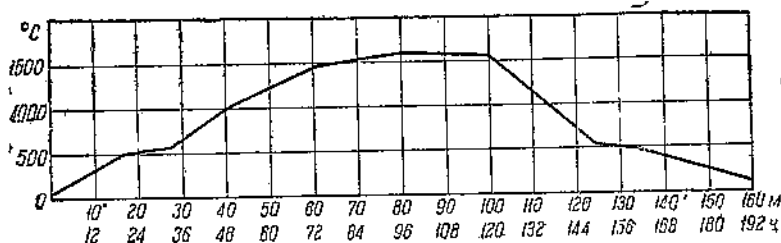


Рис. 28. Кривая обжига динаса в туннельной печи

режимом, который характеризуется соответствующей кривой обжига. Так, например, кривая обжига фасонных шамотных изделий весом до 65 кг в периодической печи производительностью 100 т характеризуется кривой обжига, представленной на рис. 27. Заданная кривая обжига динаса в туннельной печи представлена на рис. 28.

Из сказанного становится очевидным, что расход тепла на обжиг материалов и изделий в печах складывается из затраты тепла на сушку, на удаление химически связанной влаги, на нагрев материала до необходимых температур и на осуществление связанных с расходом тепла физико-химических процессов, после чего, в период охлаждения материала или изделий, часть тепла возвращается с воздухом обратно в печь, повышая температуру горения и улучшая процесс сжигания топлива.

Глава V

ПЕЧИ

А. КЛАССИФИКАЦИЯ ПЕЧЕЙ

Печи для обжига стройматериалов могут быть подразделены:

- 1) по роду обжигаемого материала,
- 2) по принципу работы и
- 3) по принципу обжига.

По роду обжигаемого материала печи разделяются на печи для обжига кусковых и сыпучих материалов и печи для обжига формованных материалов и изделий.

К первым относятся шахтные печи, в которых обжигается гипс, известь, доломит, портланд-цементный клинкер, шамот и др. кусковые материалы, и вращающиеся трубо-печи, в которых обжигаются те же материалы, но продукт получается в более измельченном виде. При этом сырой материал поступает в печь в виде кусков, брикетов, муки или в жидком состоянии, как например, смесь известняка и глины с водой при обжиге во вращающихся печах портланд-цементного клинкера.

Формованные материалы или изделия (кирпич, черепица, изразцы, метлахские плитки, всевозможные шамотовые и динасовые изделия) обжигаются в периодических, камерных, кольцевых и туннельных печах.

Иногда обжиг кусковых материалов, например гипса и извести, производится в камерных или кольцевых печах; однако вследствие больших затруднений при загрузке и выгрузке этот способ обжига начинает применяться все более редко.

По принципу работы печи разделяются на печи периодического и непрерывного действия. К первым относятся периодические горны, а ко вторым — все остальные печи, в которых осуществляется определенный, непрерывно поддерживаемый режим обжига и непрерывный выход продукции. Таковы шахтные, вращающиеся, камерные, кольцевые и туннельные печи.

Наконец, по принципу обжига печи разделяются на печи непосредственного обжига и муфельные печи. В первых газовый поток непосредственно соприкасается с обжигаемым материа-

лом или изделиями, а во вторых изделия получают тепло от раскаленных стенок муфеля, который непосредственно обогревается горячими газами. В этом случае изделия не соприкасаются с газовым потоком. Муфельный обжиг возможен в туннельных и вращающихся печах, внутри которых на всем протяжении печи устраивается огнеупорный муфель, по которому продвигаются материал или изделия.

В том случае, когда муфельный обжиг не может быть осуществлен, изделия помещаются в огнеупорные капсулы, которые затем загружаются в ту или иную печь.

Периодические печи в зависимости от направления движения продуктов горения подразделяются на:

а) печи с прямым (восходящим) газовым потоком (рис. 29) и

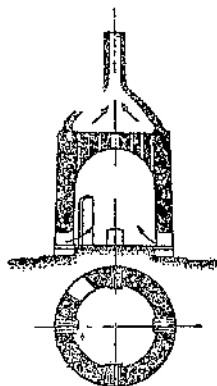


Рис. 29. Схема периодической печи с восходящим газовым потоком

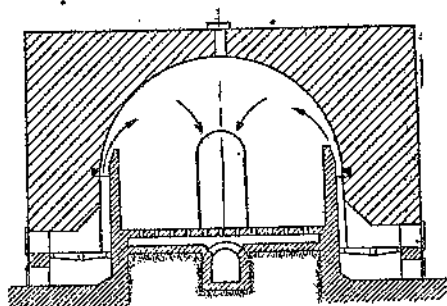


Рис. 30. Схема периодической печи с обращенным газовым потоком

б) печи с обращенным (нисходящим) газовым потоком, именуемые также печами с горячим подом (рис. 30).

В первых поступающий в печь газовый поток выходит из печи через отверстие в своде, а во вторых, газы, дойдя до свода, поворачивают вниз и уходят через отверстия, расположенные в поду печи, удаляясь затем в дымовую трубу.

В свою очередь непрерывно действующие печи подразделяются на:

а) печи с неподвижным источником тепла, в которых передвигаются обжигаемый материал или изделия; к ним относятся шахтные, вращающиеся и туннельные печи;

б) печи с подвижным источником тепла, в которых обжигаемые изделия остаются неподвижными; к ним относятся камерные и кольцевые печи.

В дальнейшем изложении печи рассматриваются по роду обжигаемых материалов, причем вначале помещены печи для обжига кусковых и сыпучих материалов, т. е. шахтные и вращающиеся, а затем печи для обжига формованных изделий, т. е. периодические, камерные, кольцевые и туннельные.

Б. ПЕЧИ ДЛЯ ОБЖИГА КУСКОВЫХ И СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

1. Шахтные печи

Основные принципы обжига в шахтных печах

Шахтные печи служат для обжига кусковых материалов и представляют собой неподвижную кирпичную шахту, выложенную в зоне огня огнеупорной футеровкой. В верхнюю часть шахты загружается обжигаемый материал, который под влиянием собственного веса постепенно осаживается и выгружается в нижней части шахты. Если выгрузка производится периодически, причем выгружается все содержимое шахты, печи называются *периодическими* и каждый период работы называется оборотом печи. При непрерывной выгрузке движение материала по шахте происходит непрерывно и печи называются *непрерывно действующими*. В этом случае загрузка сырья и топлива производится постепенно и непрерывно, в зависимости от скорости выгрузки. Производительность и качество продукции непрерывно действующих шахтных печей значительно выше производительности печей периодических, которые в настоящее время имеют незначительное применение.

Шахтные печи распространены повсеместно и в них производится обжиг самых разнообразных кусковых материалов. В зависимости от температуры обжига материала шахтные печи можно подразделить на печи низко- и высокотемпературного обжига.

К первым следует отнести печи, в которых температура обжига материала не превосходит 1000° , например печи для обжига гипса и каустического магнезита; ко вторым — все шахтные печи, обжигающие материал при температурах, превышающих 1000° , например печи для обжига извести, шамота, портланд-цемента и т. д.

В зависимости от физико-химических свойств обжигаемых материалов и температуры обжига, изменяется конструкция шахты и предъявляются различные требования к топливу.

Так как при загрузке в печь топлива вместе с обжигаемым материалом развиваются температуры выше 1000° , при необходимости обжига материалов ниже этой температуры топливо сжигается вне печи в специальных выносных топках, расположенных около печи и соединенных с шахтой печи каналами. В остальных случаях топливо загружается в печь вместе с материалом и температура регулируется как количеством топлива, так и подачей большего или меньшего количества воздуха (избытком воздуха). Максимальные температуры развиваются при обжиге портландцементного клинкера и металлургического магнезита; в этом случае топливо сжигается с минимальным избытком воздуха (α близко к 1), причем воздух сильно подогревается за счет охлаждения обожженного материала.

Низкотемпературный обжиг материалов производится в шахтных печах, снабженных выносными пламенными топками, ручными колосниковыми решетками или шахтными топками.

При сжигании топлива в выносных топках на колосниковых решетках (рис. 31) продукты горения, переваливая через порог топки, поступают в горловину, соединяющую топку с шахтой печи, и устремляются вверх по шахте, обжигая заполняющий ее материал. Так как средняя температура пламенной топки колеблется около 1100° , температура газового потока обычно ниже и может быть еще понижена подачей воздуха через выгрузочные или боковые отверстия шахты. Шахтные печи с пламенными выносными топками имеют диаметр не свыше 1,8 м; при большем диаметре затрудняется обжиг центральной части столба материала.

При высокотемпературном обжиге материалов, т. е. обжиге при температурах, превышающих температуру продуктов полного горения пламенных топок, процесс горения частично или полностью переносится в шахту печи. В этих случаях, как например при обжиге извести, шахтные печи снабжаются полугазовыми топками (рис. 32). Полу-газ поступает через горловину топки или прямо в печь или в кольцевой канал — коллектор, расположенный вокруг шахты печи и соединенный с шахтой окнами для вылета газа.

В зависимости от размеров печи устанавливается от 2 до 8 полугазовых топок, причем они располагаются симметрично по бокам и с торцов печи. При помощи коллектора полу-газ распределяется более или менее равномерно по сечению шахты и химический состав его выравнивается, так как топки, особенно в периоды чистки, работают далеко не одинаково. В шахте печи происходит догорание горючих элементов полу-газа (CO и H_2) и при этом развивается температура до 1300° . Необходимый для сгорания полу-газа воздух (вторичный воздух) поступает через выгрузочные отверстия печи, нагреваясь до $400-500^{\circ}$ за счет охлаждения материала. При полу-газовом способе обжига возможно применение местных видов топлива. Состав и теплотворная способность получаемого полу-газа приведены в табл. 4.

При полу-газовом способе обжига около 20—30 проц. от

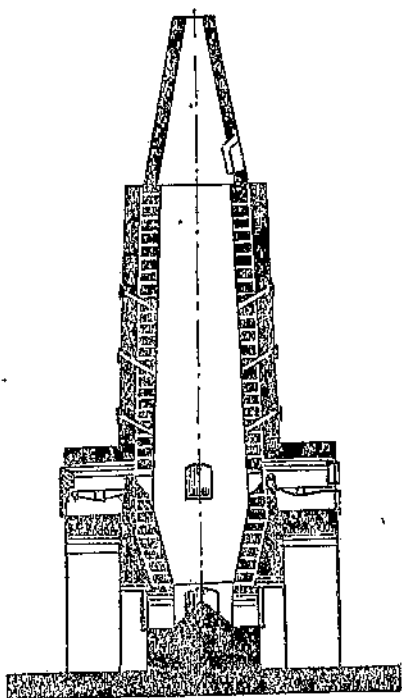


Рис. 31. Шахтная печь с пламенными топками для обжига извести.

общего количества тепла топлива расходуется и теряется в топке, почему общий расход топлива на обжиг довольно значителен. К недостаткам указанного способа относится неравномерный обжиг материала по сечению шахты, причем центральная часть столба материала обжигается слабее, чем материал,

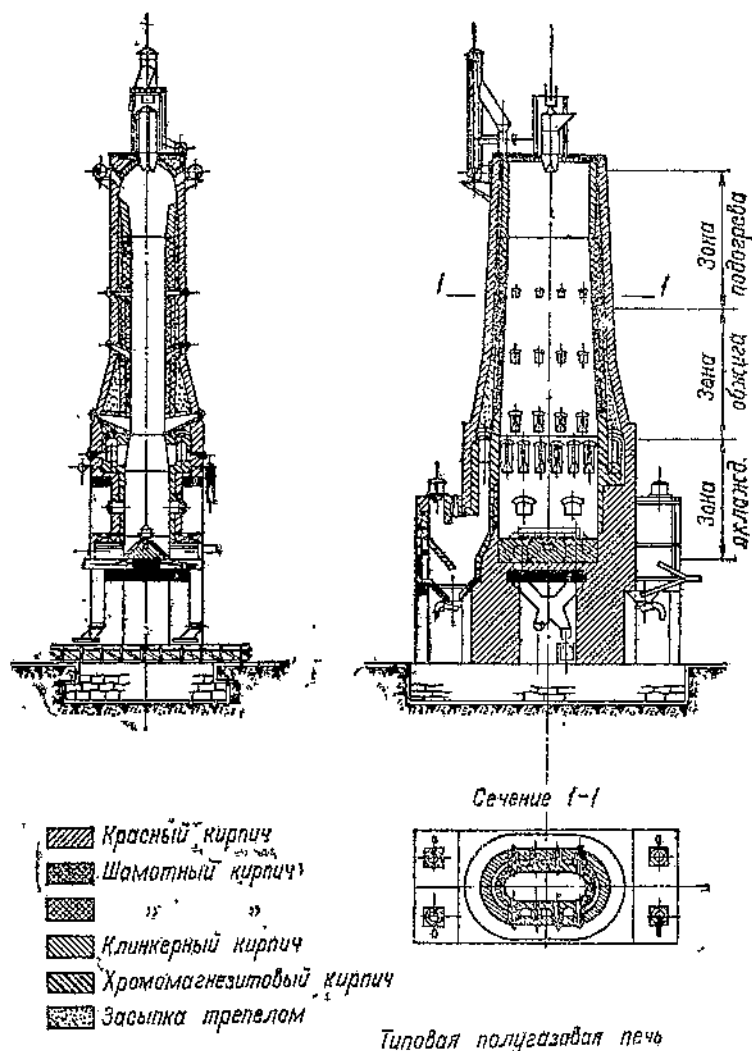


Рис. 32. Шахтная печь с полугазовыми топками для обжига извести

расположенный у краев шахты, в силу чего [ширину шахты делают не больше 2,0 м.

Кроме полугазовых топок, шахтные печи снабжаются газогенераторами; в этом случае обжиг материала также происходит за счет горения CO и H_2 , входящих в состав генераторного газа, поступающего в шахту печи из коллектора газогенераторов

или газопровода. Теплотворная способность генераторного газа несколько выше, чем полугаза; состав его приведен в табл. 5. Однако, так как в газогенераторах тоже теряется от 25 до 35 проц. от общего тепла топлива, расход топлива на обжиг примерно такой же, как и при полугазе.

Установка газогенератора к шахтным печам значительно дороже установки топок и оправдывается при наличии центральной газогенераторной станции, вырабатывающей дешевый газ. В шахтных печах применяются и другие технические газы.

При пересыпном способе обжига загрузка топлива и материала производится или послойно, или вперемешку. При этом в целях более равномерного обжига стремятся к тому, чтобы куски обжигаемого материала были равномерно раздроблены и не превосходили по своим размерам 150—200 мм, точно так же, как и куски топлива, которые имеют размеры 10—60 мм. Для этой цели топливо дробится в дробилках или разбивается кувалдами и отсеивается. Чем равномернее куски материала и топлива, тем лучше протекает обжиг.

Если обжигается сырьевая смесь, состоящая из различных компонентов (например известняк и глина при обжиге портландцементного клинкера), сырой материал предварительно подсушивается, измалывается, слегка увлажняется и формуется особыми прессами в брикеты или валушки. При этом дробленое и отсеянное топливо перемешивается с брикетами, впрессовывается в них или совместно перемалывается. При впрессовывании употребляется более мелкое топливо, чем при пересыпке; при совместном помоле размеры пылинок топлива не превышают 0,02—0,2 мм и равномерно распределяются среди материала. Этот способ сжигания топлива повышает производительность шахтных печей и улучшает качество продукции.

Горение пересыпного топлива, как было указано в главе „Топливо и его сжигание“, происходит за счет непосредственного его окисления воздухом, тогда как при горении в молотого топлива непосредственное окисление происходит лишь частично, и около 50 проц. углерода топлива реагирует сначала с углекислотой, выделяющейся при разложении $MgCO_3$ и $CaCO_3$ материала, с образованием окиси углерода, которая затем сгорает с кислородом воздуха в углекислоту. Так как часть окиси углерода не успевает сгореть, а углекислота частично может вновь восстановиться, встречая на пути своего движения раскаленный углерод, расход топлива на обжиг при этом способе сжигания несколько выше, чем при пересыпном способе. Кроме того, помол топлива связан с дополнительным расходом электроэнергии.

При пересыпном способе обжига, наиболее простом в эксплуатации и экономичном, в качестве топлива применяются антрациты, кокс и каменный уголь с минимальным содержанием летучих, что ограничивает распространение этого способа обжига. Поэтому в тех случаях, когда применяются местные виды топлива или длиннопламенные угли, обжиг в шахтных печах производится на продуктах полного горения, полу-газе или генераторном газе.

Наконец, следует указать на попытки применения в шахтных печах пылеугольного топлива. Угольная пыль подается с разных сторон шахты в специальные топки, примкнутые к шахте печи. Топки разжигаются мазутом, после чего переходят на отопление угольной пылью, которая частично сгорает до CO_2 , частично же до CO , догорающей со вторичным воздухом среди материала. Пылеугольное отопление шахтных печей вызывает необходимость в устройстве пылеприготовительной установки и может быть экономично при наличии центральной пылеприготовительной станции, обслуживающей нескольких потребителей пылевидного топлива, или при одновременной сушке и размоле угля. До настоящего времени пылевидное отопление шахтных печей широкого распространения не получило.

Механизация работы шахтных печей

Первоначально шахтные печи представляли собой весьма несовершенные агрегаты сравнительно небольшой производительности, требующие для своего обслуживания большого количества рабочих рук, так как разгрузка топлива и сырья и выгрузка обожженного продукта производились вручную.

В настоящее время трудоемкие процессы загрузки и выгрузки в шахтных печах полностью механизированы, причем организована также непрерывная подача воздуха и удаление газов из печи.

Автоматические шахтные печи снабжены искусственной подачей воздуха и отсосом газов, автоматической подачей сырого материала и топлива и выгрузкой обожженного продукта, а также уплотняющими приспособлениями при загрузке и выгрузке.

Так как столб материала, находящийся в шахте и медленно передвигающийся по ней, создает большое сопротивление для прохода воздуха, последний подается в нижнюю часть шахты под давлением и, равномерно распределяясь по сечению шахты, охлаждает обожженный материал. Давление, под которым подается воздух, в современных шахтных печах весьма значительно, составляя в среднем 300—600 мм вод. ст. и доходя до 1000 мм. Благодаря давлению воздух проходит между материалом с большой скоростью, интенсивно его охлаждает и, нагреваясь, повышает скорость и температуру горения топлива, в результате чего производительность печей возрастает почти вдвое. При этом иногда небольшая часть воздуха подводится непосредственно в зону обжига (позонное дутье). По достижении зоны обжига напор вентилятора расходуется почти целиком, поэтому для повышения скорости выхода из печи продуктов горения и разложения материала устанавливается дымосос (экстаустер), который отсасывает газы и направляет их в дымовую трубу. При этом газы собираются в верхнем горизонте печи с помощью кольцевого канала, который соединяется с дымовой трубой или непосредственно, или через дымосос. Дымовые трубы шахтных печей устанавливаются небольшой высоты (6—15 м), и создаваемое ими разрежение незначительно.

При установке нескольких шахтных печей в одном блоке они нередко снабжаются одним дутьевым вентилятором или одним дымососом. Более правильным, однако, является снабжение каждой печи индивидуальным вентилятором дутья и дымососом. Дымососы шахтных печей работают в более трудных условиях, чем вентиляторы: температура отходящих из печи газов составляет от 250 до 500°, объем отходящих из печи газов значительно больше объема поступающего в печь воздуха и, кроме того, при искусственной тяге и мелком материале возможен значительный унос пыли. Поэтому шахтные печи чаще снабжаются искусственным дутьем; установка дымососа применяется на печах большой производительности, а также на печах, снабженных полугазовыми топками или газогенераторами.

Правильная загрузка материала и топлива по сечению шахты имеет весьма важное значение, обуславливая нормальный режим обжига. Так как в шахтных печах пламя всегда стремится пробиться вдоль стен шахты, к стенам засыпается более мелкий материал, в то время как крупные его куски загружаются ближе к центру. Топливо загружается в виде кольца на расстоянии 200—300 мм от краев шахты, причем наимыгоднейшая ширина кольца — 200—500 мм; более мелкое топливо загружается в центральную часть шахты. Автоматические и полуавтоматические загрузочные устройства всевозможных систем должны быть сконструированы с учетом указанного правила, причем загрузка кусков различных размеров должна регулироваться.

В известеобжигательных печах загрузка известняка обычно производится при помощи загрузочной воронки и распределение материала по сечению шахты производится установленным под воронкой рассекателем.

В цементеобжигательных печах при брикетировании сырьевой массы загрузочный механизм представляет собой вращающуюся тарелку, на которую брикеты поступают непосредственно из пресса и вращаются вместе с тарелкой. Специальный нож, вращающийся несколько медленнее тарелки, сбрасывает брикеты с тарелки в печь. Так как брикеты падают с различных точек тарелки, последняя распределяет их равномерно по сечению шахты. Для того чтобы дымосос не засасывал воздух через верхнюю открытую часть печи, верхняя часть шахты плотно закрывается железным кожухом.

Одновременно с непрерывной загрузкой печи должна осуществляться также непрерывная выгрузка обожженного материала из шахты. Конструкция автоматического выгрузочного механизма зависит от структуры обожженного материала. Если материал выходит из печи в виде комьев и большого количества мелочи, выгрузка осуществляется с помощью передвигающейся взад и вперед каретки. Такова, например, выгрузка системы Автонова для известеобжигательных шахтных печей (рис. 33). Передвигаясь вперед, каретка сталкивает комья обожженной извести в разгрузочный люк. Выгрузка системы Иссерлиса (рис. 34) для комовой извести представляет собой стальные четырехлопастные звездчатки (турникеты), насаженные на вал, вращающийся со

скоростью 1 оборота в 30—100 минут. Турникеты, вращаясь, сбрасывают комья и мелочь в разгрузочный бункер печи.

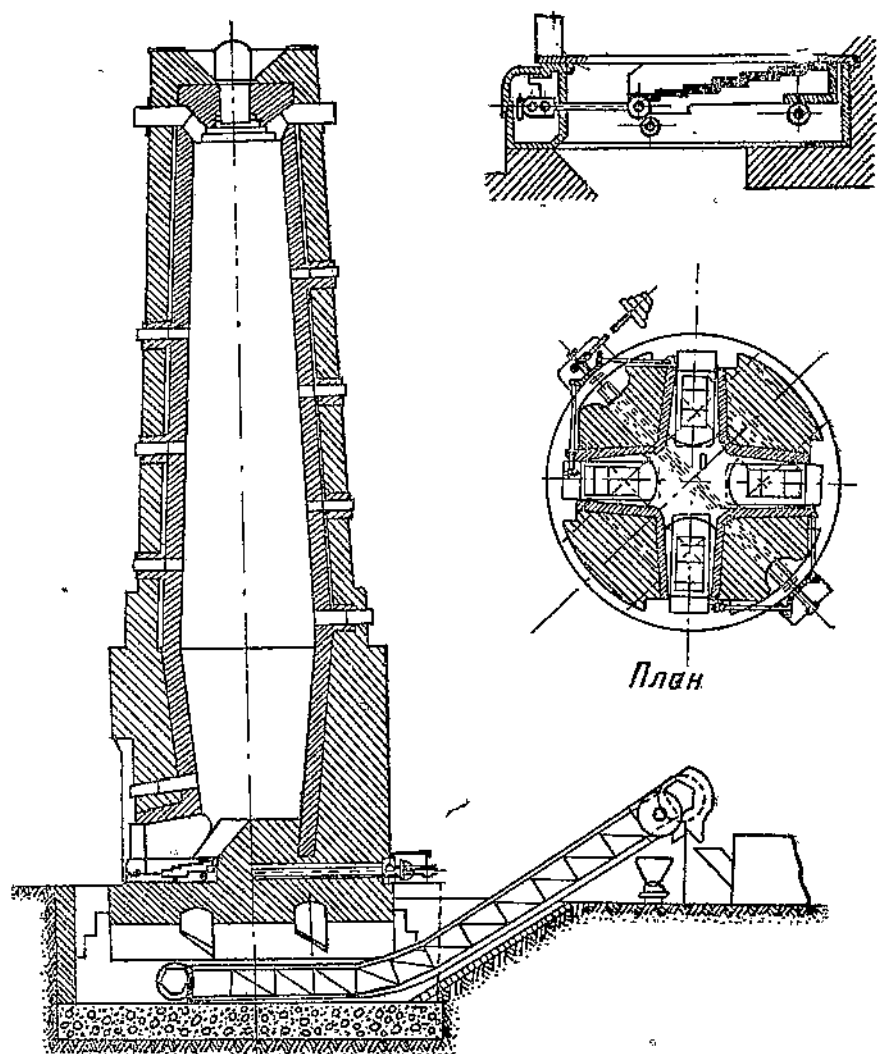


Рис. 33. Механическая выгрузка системы Антонова

Когда материал плотным спекшимся столбом давит на нижнее сечение круглой шахты, как например в цементобжигательных печах, разгрузочный механизм представляет собой медленно вращающуюся (около одного оборота в час) решетку, снабженную острыми зубьями, которые дробят нижнюю часть спекшегося столба клинкера. Раздробленные куски проваливаются сквозь отверстия решетки и падают в сборную воронку. Решетка насажена на массивной вертикальной оси, приводимой в движение червячной передачей, и воспринимает вес столба заполня-

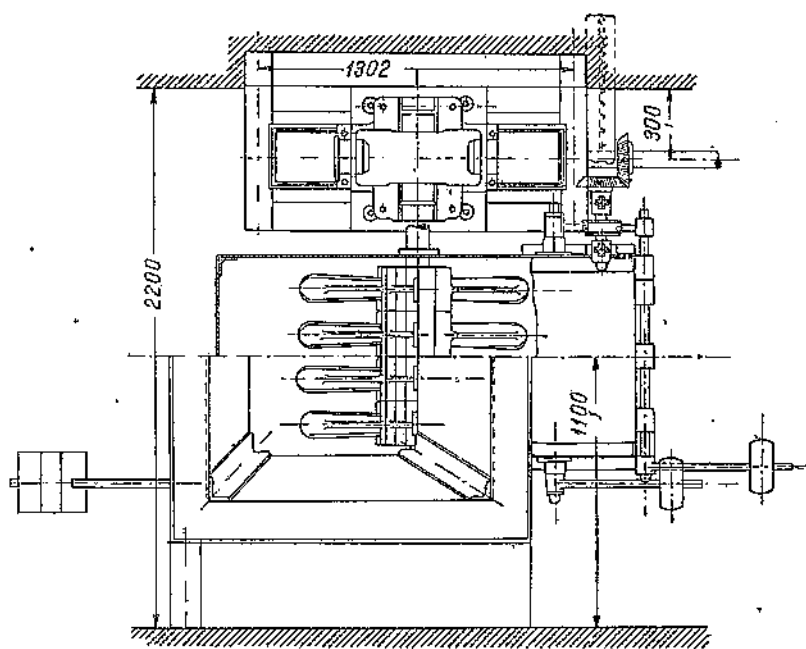
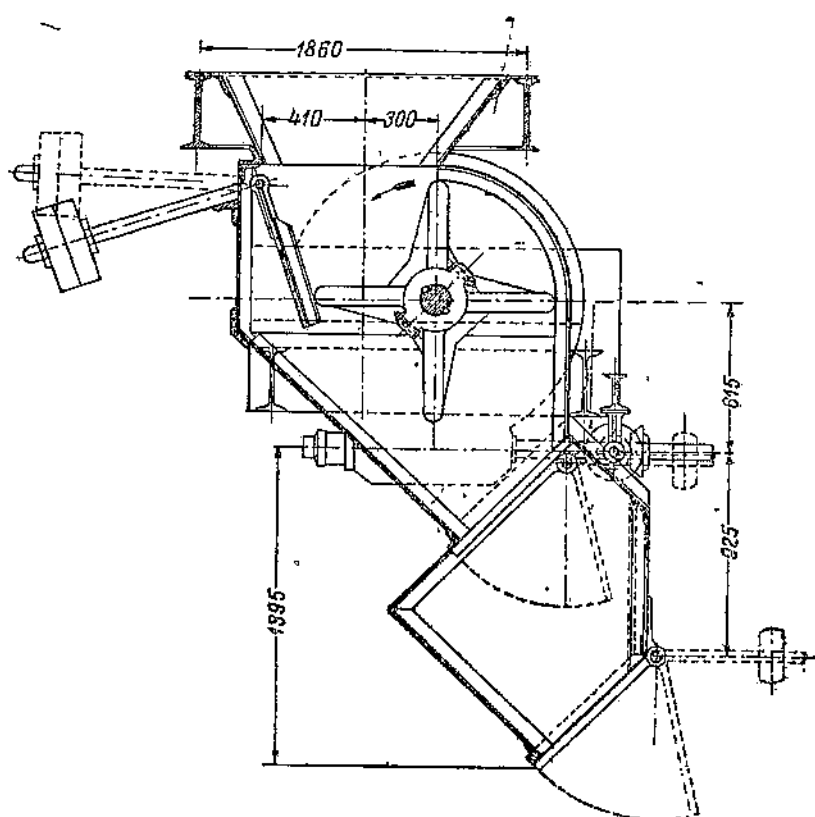


Рис. 34. Механическая выгрузка системы Иссерлиса

ющего шахту материала. Такова механическая выгрузка системы Грюбер (рис. 35). Для разгрузки оси решетка иногда устанавливается на роликах, катящихся по кольцу, укрепленному на массивной раме (решетка системы Крупп, изображенная на рис. 36).

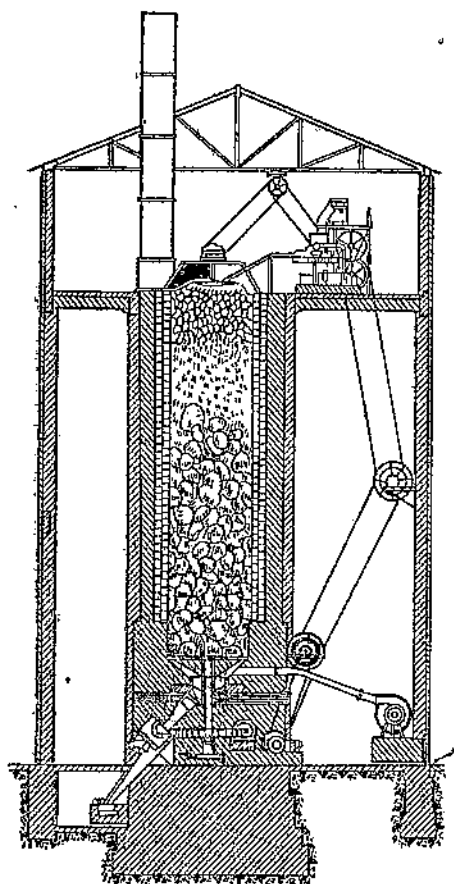


Рис. 35. Механическая выгрузка системы Грюбер

прижимаются противовесами, что ни обожженный материал, ни воздух под давлением не могут проходить из одной камеры в другую. Таким образом при наличии шлюзовых затворов достигается герметизация нижней части шахты и устраняется проникновение пыли в помещение.

Полная автоматизация шахтной печи делает ее весьма совершенным аппаратом, не уступающим другим видам автоматических печей, например вращающимся трубо-печами.

Конструкции шахтных печей

Конструкции шахтных печей зависят от рода обжигаемого материала.

Решетка системы Тиле представляет собой плоскую, снабженную зубцами решетку, разрезанную на две равные части, движущиеся в противоположные стороны. Наконец, разгрузочные колосники системы Манштедта (рис. 37) представляют собой стальные снабженные острыми зубьями вальцы диаметром 400 мм, вращающиеся в разные стороны и укрепленные на массивном фундаменте. Расстояние между вальцами равно 110 мм. Вальцы, вращаясь, дробят нижнюю часть клинкерного столба, причем куски материала проваливаются между ними в бункер.

Все автоматические разгрузочные решетки в нижней своей части снабжаются шлюзовыми затворами, препятствующими проникновению в помещение вдуваемого в печь воздуха.

Шлюзовой затвор (рис. 38) состоит из двух или трех последовательно открывающихся камер, снабженных клапанами с противовесами. Закрытые клапаны настолько плотно

Для обжига *гипса*, который происходит в токе газов, нагретых до температуры 300—500°, употребляются шахтные печи с

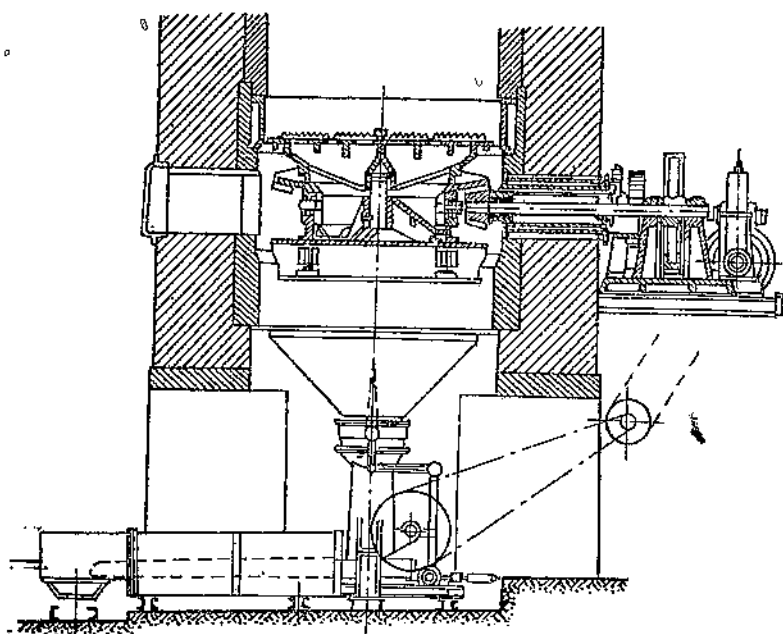


Рис. 36. Механическая выгрузка системы Круппа

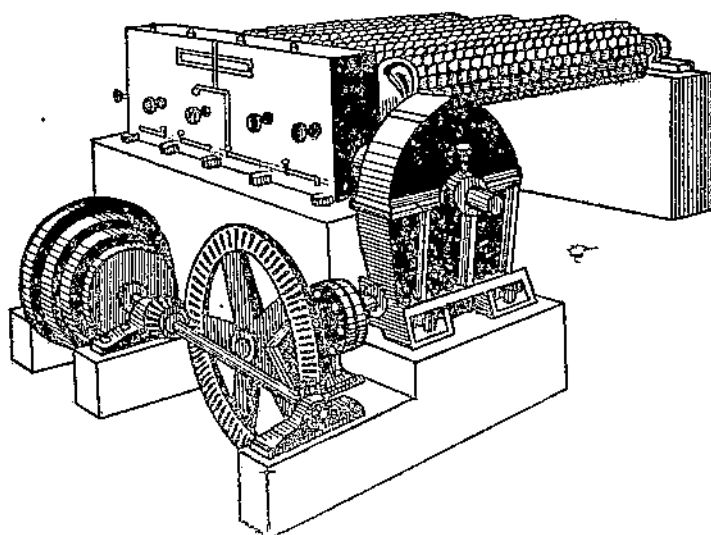


Рис. 37. Механическая выгрузка системы Манштедта

топками полного горения. В этом случае горизонтальное сечение шахты делается прямоугольным или круглым, по вертикальному сечению шахта обычно выполняется цилиндрической или

в виде двух конусов, сомкнутых основаниями на высоте около $\frac{1}{2}$ шахты. Примерно на той же высоте располагаются выносные топки. Загрузка сырья производится через загрузочное отверстие шахты, выложенное у основания дымовой трубы; загрузка

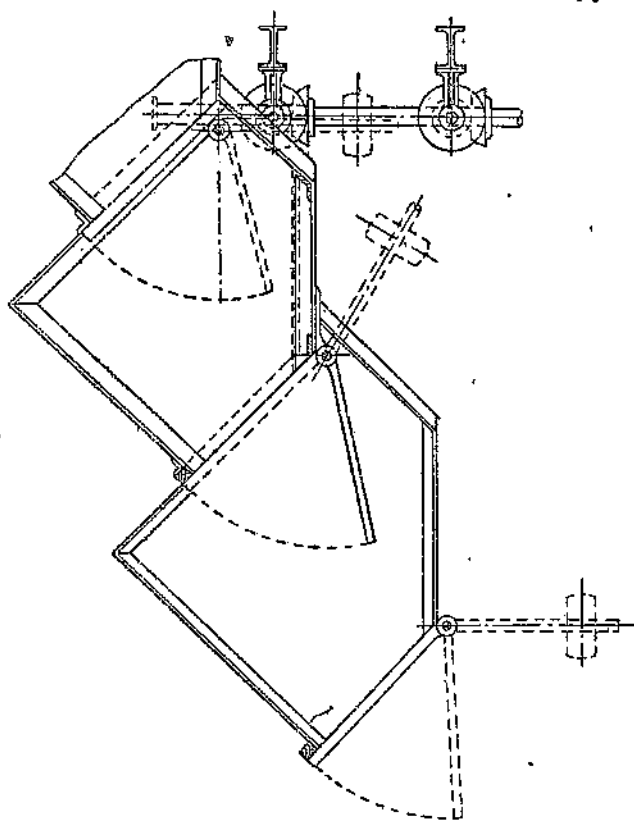


Рис. 38. Трехклапанный шлюзовой затвор

топлива и уборка золы и шлака производятся на топливной площадке, расположенной перед топками.

Шахтные печи указанного типа обычно не механизированы и требуют для обслуживания значительного количества рабочих. Производительность наиболее крупных печей — до 100 т обожженного материала в сутки, расход условного топлива — 5—10, проц. от веса обожженного материала.

Для улучшения условий горения, топки рекомендуется снабжать дутьем; возможна также установка дымососа, который повышает разрежение в печи. При этом, однако, необходима герметизация верхней части печи и регулирование количества воздуха, поступающего для охлаждения продуктов горения.

Основным типом шахтных *известкообжигательных* печей являются печи, работающие пересыпным способом, а в случае применения местных видов топлива — также на газе и полугазе. Пламенный обжиг извести применяется весьма редко; в этом

случае известеобжигательные печи имеют небольшие размеры (высота до 10 м и диаметр 1,5—1,8 м), снабжаются пламенными топками, отличаются небольшой производительностью и большим расходом топлива.

Шахтные печи с полугазовыми топками, работающие на местных видах топлива (рис. 32), состоят из шахты круглого, овального или прямоугольного с закругленными краями сечения. Высота (общая) шахты колеблется от 14 до 20 м, диаметр круглой шахты — до 2,0 м. Топки (в количестве от 2 до 8) располагаются по отношению к шахте симметрично, на высоте приблизительно $\frac{1}{3}$ шахты. Полугаз из топок поступает или непосредственно в печь через горловину топки, или в коллектор, соединенный с шахтой газовыми окнами.

Производительность полугазовой печи колеблется в зависимости от размеров от 15 до 100 т обожженной извести в сутки.

Печи с полугазовыми топками снабжаются дымососом с разрежением до 150 мм вод. ст. Если устанавливается дутьевой вентилятор, напор его не должен превышать сопротивления столба материала, наполняющего зону охлаждения печи, во избежание перебоев в работе топок.

Режим обжига сводится к установлению режима работы полугазовых топок и регулированию работы дутья и дымососа. Если печь снабжена механической выгрузкой и загрузкой, то режим обжига обуславливается скоростью выгрузки и загрузки материала, зависящих, в свою очередь, от работы топок, дутья и разрежения.

Шахтные печи с газовым отоплением состоят из шахты круглого или овального сечения с установленными с разных сторон газогенераторами, или подводом газа с центральной газогенераторной станции. Диаметр круглой шахты — не более 2,2 м при высоте в 12—17 м. Генераторный или иной газ подводится по газопроводу на высоте около $\frac{1}{4}$ высоты шахты и поступает в нее через газовые вылеты. Необходимый для горения воздух подается или через выгрузочные отверстия, или нагнетается вентилятором через помещенный в холодильнике печи канал с распределенными отверстиями — керн, а также через каналы двускатного гребня, рассекающего опускающийся в нижнюю часть шахты материал.

Производительность печи от 15 до 50 т обожженной извести в сутки. Режим обжига обуславливается главным образом режимом работы газогенераторов, а также скоростью выгрузки и загрузки материала.

Пересыпные известеобжигательные печи строятся различной производительности, доходящей до 100 т и более обожженной извести в сутки. Топливом для них являются кокс и антрацит различных марок, а также древесный уголь. Высота шахты колеблется в зависимости от размеров печи от 8 до 15 м, диаметр круглых шахт доходит до 3,5 м. Топливо вводится в шахту или послойно, или вперемешку с кусками известняка. Вертикальное сечение шахты имеет форму двух усеченных, сомкнутых широкими основаниями конусов или цилин-

дрическую, причем холодильник нередко делается несколько большего диаметра, чем зона обжига. Печи снабжаются или дымососом, или дутьевым вентилятором, или тем и другим, а также механической загрузкой и выгрузкой.

Режим обжига в пересыпной печи сводится к регулированию подачи топлива, силы дутья и разрежения. Установление нормального режима обжига при пересыпном способе проще, нежели в двух предыдущих случаях, пересыпные печи отличаются более простой конструкцией, большей удельной производительностью и меньшим расходом топлива. Отрицательной стороной является загрязнение извести золой топлива, что не имеет места при полугазовом и газовом способах обжига.

Нормы производительности известеобжигательных печей впервые были установлены отраслевыми конференциями и исчисляются по выходу обожженной извести на 1 м^3 просветного объема шахты в сутки. В 1936 г. они составляли:

для печей, работающих на полугазе 450 кг/м³ в сутки
для печей, работающих пересыпным способом 650 " "

Удельная производительность шахтных печей, снабженных пламенными топками, была значительно ниже и не превосходила 300 кг/м³ в сутки.

В настоящее время в результате применения стахановских методов работы эти нормы превзойдены на 20—60 проц. и производительность печей неуклонно продолжает повышаться.

Удельный расход топлива и тепла на обжиг извести для различных печей приведен в табл. 25.

Т а б л и ц а 25

Способ обжига	Расход условного топлива в проц. от веса обожженной извести	Расход тепла в кал на 1 кг обожженной извести
На пламенных газах . . .	23,0—26,0	1600—1800
На полугазе	18,5—23,0	1300—1600
На газе	20,0—23,0	1400—1800
Пересыпной	12,8—17,0	900—1200

Обжиг *шамота* в шахтных печах затрудняется тем, что глины, особенно жирные и пластичные, содержат значительное количество влаги, которая, испаряясь, конденсируется на поверхности кусков, загружаемых в шахту печи, особенно в зимнее время, когда глина смерзается. Конденсация водяных паров резко снижает температуру отходящих из печи газов и понижает создаваемое дымовой трубой разрежение, в силу чего производительность печей падает до минимума и нередко случаются полные остановки печей.

В печах Гросса (рис. 39) в верхней части шахты предусмотрена дополнительная зона предварительного подогрева глины при помощи горячего воздуха, поступающего из зоны охлажде-

ния по вертикальным каналам, проложенным в кладке печи. Горячий воздух поступает в верхний горизонт печи вместе со

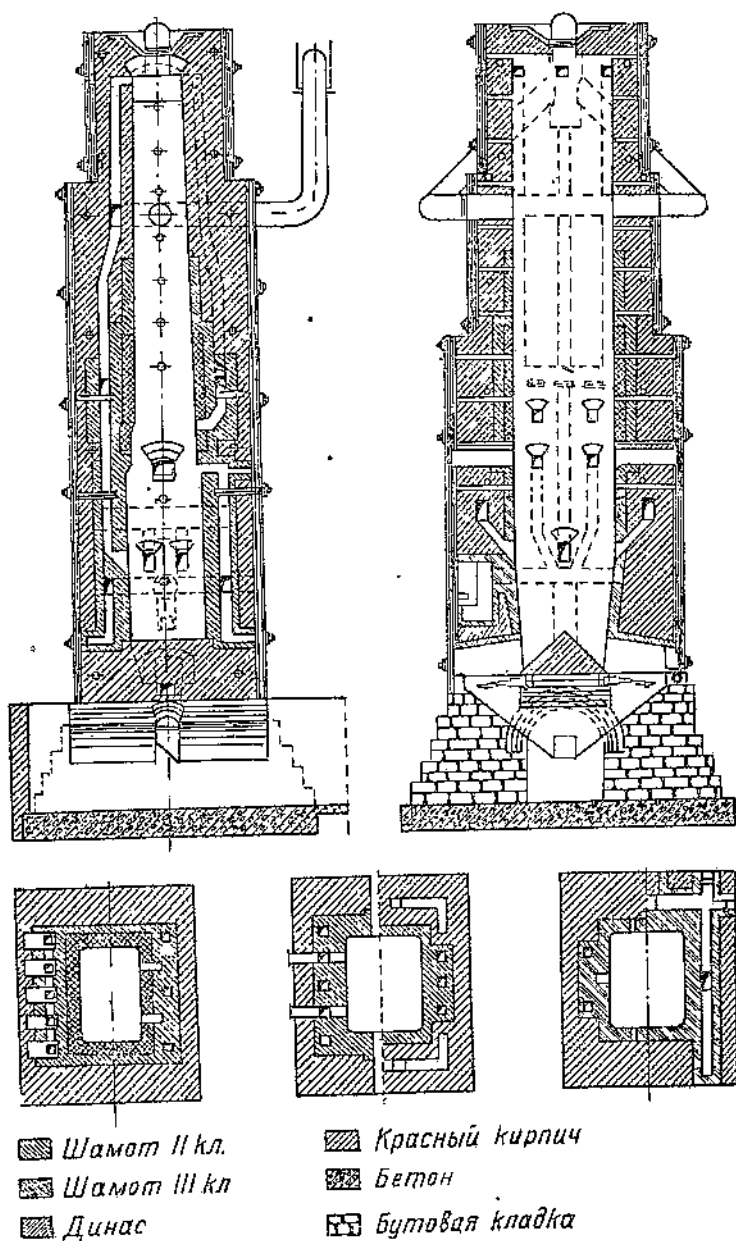


Рис. 39. Печь Гросса для обжига шамота

смерзшейся глиной и обогревает ее, отчего наружные слои глины подсыхают и конденсации водяных паров не происходит. Продукты горения и водяные пары отсасываются дымососом через

отверстия, расположенные ниже зоны предварительного подогрева, или так называемой зоны шмаухования.

В качестве топлива в печах Гросса обычно применяется генераторный газ, подаваемый из газопровода, расположенного на высоте около $\frac{1}{3}$ шахты. При этом рекомендуется необходимый для горения подогретый в зоне охлаждения воздух отсасывать по каналам и подавать вокруг горелок, располагая последние симметрично и возможно чаще по сечению шахты. В этих печах вполне возможно применение механической выгрузки.

Производительность печи Гросса составляет 25 т шамота в сутки, понижаясь в зимнее время до 10—12 т. Напряжение сечения шахты составляет от 300 до 500 кг/м² в сутки и выше. Расход топлива составляет 13—15 проц. от веса шамота, т. е. около 900—1000 кал на 1 кг обожженного шамота. Много общего с печами Гросса имеют шахтные печи системы Хирта, в которых глина обжигается также с применением шмауховоздуха.

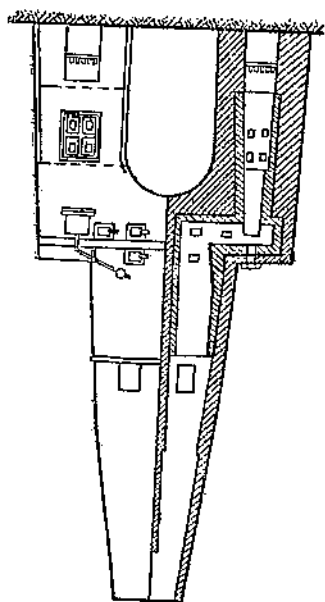


Рис. 40. Печь Дитча для обжига портланд-цементного клинкера

Обжиг портланд-цементного клинкера до начала XX столетия производился исключительно в шахтных печах, которые вначале были периодическими и обжигали естественный материал — мергель. В настоящее время клинкер обжигается в полуавтоматических и автоматических печах непрерывного действия, причем от обжига естественного материала перешли к составлению и обжигу искусственной смеси, спрессованной в брикеты или валюшки. При этом топливо подается вперемешку с материалом или впрессовывается в материал.

Из печей непрерывного действия с ручным обслуживанием до настоящего времени сохранились печи Дитча и Шнейдера.

Печь Дитча (рис. 40) или этажная печь представляет собой в верхней части вертикальную шахту. Сырьевой материал, высушиваясь и подогреваясь в верхней части шахты, опускается в нижнюю ее часть, разделенную внутренней вертикальной перегородкой. Затем горячий материал вручную переталкивается по горизонтальному участку в шахту обжига, в которую через отверстия забрасывается топливо. Обожженный материал опускается в зону охлаждения и выгружается. Загрузка сырья происходит на третьем этаже, загрузка топлива — на втором этаже печи. Благодаря разделению печи на верхнюю и нижнюю шахты, материал в зоне обжига не испытывает давления выходящего столба, что в значительной степени ослабляет явления привара или припекания массы клинкера к стенкам шахты.

Припекание клинкера происходит оттого, что размягченный при спекании материал под давлением вышележащих его слоев впрессовывается в поры горячей футеровки печи. Приварившийся к стенкам шахты материал застывает, с трудом поддается отбивке тяжелыми ломом и нарушает режим обжига.

Производительность печей Дитча невелика и составляет 20—30 *т* клинкера в сутки, при значительном расходе топлива. Расход рабочей силы на обслуживание печи очень большой и составляет 5,7—6,0 человеко-часов на 1 *т* клинкера.

Печь Шнейдера представляет собой цилиндрическую шахту диаметром 2,4—2,6 *м* и высотой 8—9 *м*, выложенную огнеупорной футеровкой; между футеровкой и стенками печи оставляется прослойка, засыпаемая трепелом (температурный шов). Сырьем для печей Шнейдера является мергель или искусственная смесь, которая прессуется в брикеты с влажностью 8—12 проц., благодаря чему пояс сушки и подогрева материала по высоте составляет от 1 до 2 *м*. Пояс обжига располагается в верхней части шахты, где материал спекается в тяжелую, плотную, постепенно опускающуюся вниз массу, своим весом препятствующую образованию явлений припекания.

Печи Шнейдера строятся открытыми и снабжаются легкой загрузочной площадкой, что удешевляет стоимость печи. Топливо загружается вместе с брикетами пересыпным способом, впрессовывается или вмалывается в брикет (способ „черного брикета“).

Производительность немеханизированных печей Шнейдера от 25 до 30 *т* клинкера в сутки. Расход рабочей силы на обслуживание печи значительно ниже, чем в печах Дитча и не превосходит 1,2—1,4 человеко-часа на 1 *т* клинкера. Загрузка и выгрузка производится вручную.

Автоматические шахтные печи обычно состоят из цилиндрической шахты, типа шахты Шнейдера, снабженной автоматической разгрузкой и выгрузкой и искусственным дутьем или отсосом газов; топливо впрессовывается в брикеты.

Наибольшее распространение получили печи Грюбера, Круппа, Тиле и Манштедта.

Печь Грюбера (рис. 35) состоит из цилиндрической шахты диаметром 2,5—3,0 *м* и высотой 8—10 *м*, снабженной вращающимся тарельчатым загрузочным приспособлением, плоской колосниковой решеткой Грюбера, укрепленной на массивной вертикальной оси и трехклапанным шлюзовым затвором. Скорость вращения решетки—до 1 оборота в час. Давление дутья до 600 *мм* вод. ст.

Печь Круппа (рис. 36) также состоит из цилиндрической шахты, снабженной тарельчатым загрузочным приспособлением и автоматической выгрузкой, представляющей собой горизонтальную решетку с зубьями, покоящуюся на шести роликах. Нижняя часть шахты снабжена или разгрузочной воронкой, или, при больших давлениях воздуха, трехклапанным шлюзовым затвором. Давление дутья составляет 600—700 *мм* вод. ст.

Печь Тиле (рис. 41) имеет цилиндрическую шахту, слегка расширенную в части холодильника, и автоматическую выгрузку

системы Тиле, весьма равномерно дробящую столб клинкера и достаточно надежную в эксплуатации. Установленная в СССР печь Тиле обжигает натуральный мергель. Диаметр шахты печи

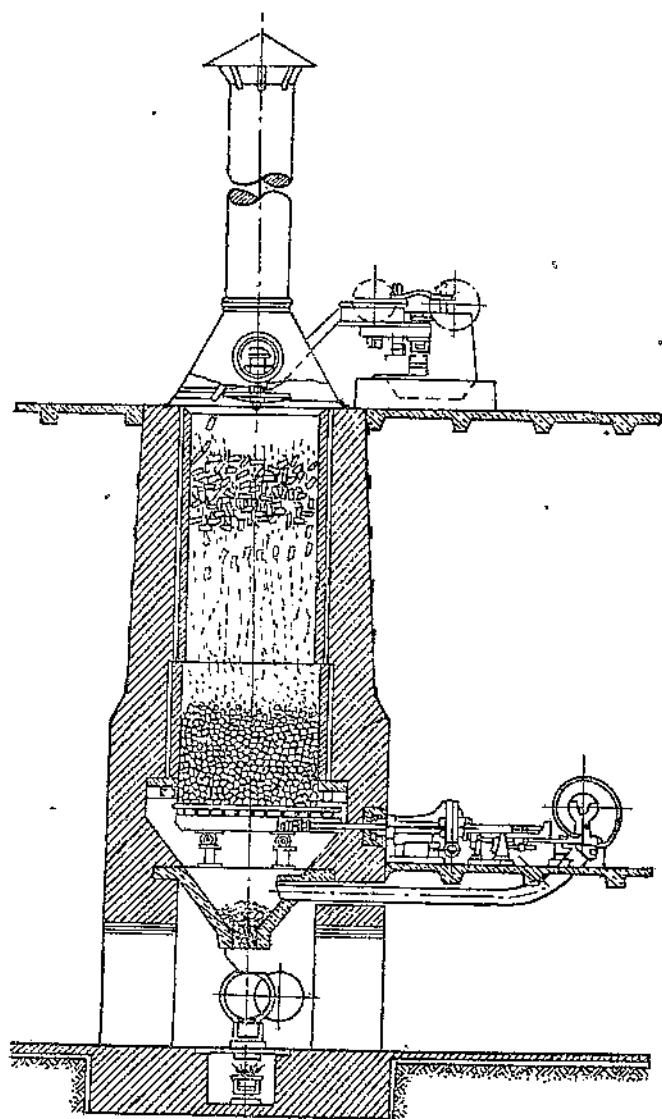


Рис. 41. Печь Тиле для обжига портланд-цементного клинкера

2,8 м, высота над колосниками—14,0 м. Возможен обжиг брикета или валяшки.

Печь Манштедта отличается от приведенных выше печей разгрузочным устройством—валцами, которые также достаточно просты и надежны в эксплуатации. Диаметр печи 2,5 м, высота—12 м.

Цементобжигательные печи работают на твердом топливе. Обжиг на полугазе или генераторном газе пока не производится, так как при этом топливе температура в печи не достигает необходимой для образования клинкера температуры (1430°). При совместном помоле материала и топлива (способ „черного брикета“) достигается более равномерное распределение топлива среди материала и значительное улучшение качества продукции. При этом однако имеется некоторый перерасход топлива.

Режим обжига клинкера в автоматических шахтных печах поддерживается регулированием давления дутья, а также скорости хода выгрузочного и загрузочного механизмов. Зона (пояс) горения обычно поддерживается на определенном уровне, примерно на 1,0—1,5 м ниже загрузочного отверстия, для чего регулируются скорость вращения решетки и сила дутья. Для сохранения полной загрузки шахты и для борьбы с пробивающимся вдоль стенок шахты пламенем, так называемым „краевым огнем“—в печь соответственно выгрузке непрерывно подаются брикеты.

Отраслевой конференцией в 1936 г. были приняты следующие нормы производительности цементобжигательных шахтных печей:

печи Дитча—500 кг/м³ в сутки

печи Шнейдера—850 кг/м³ в сутки

автоматические печи, работающие на брикете—1600 кг/м³ в сутки

то же, работающие на валяшке—1700 кг/м³ в сутки

Коэффициенты использования шахтных печей были приняты для печей Дитча—95 проц. и автоматических—92 проц.

За истекшие годы стахановской работы производительность всех шахтных печей возросла на 10—25 проц. выше приведенных цифр и неуклонно продолжает повышаться.

Основными мероприятиями, обеспечивающими стахановские методы работы на шахтных печах, являются:

- 1) исправное состояние шахты печи, механизмов, воздухо- и газопроводов,
- 2) точная дозировка топлива в брикетах,
- 3) минимальные колебания в химическом составе сырья и топлива,
- 4) возможность широкого регулирования выгрузки и загрузки, дутья и отсоса газов,
- 5) наличие измерительной аппаратуры и инструментов на каждой печи.

Заводы, соблюдающие указанные условия, значительно повышают производительность шахтных печей при одновременном снижении удельного расхода топлива и улучшении качества продукции.

Расход топлива и тепла на обжиг портланд-цементного клинкера в шахтных печах различных систем колеблется незначительно и приведен в табл. 26.

Таблица 26

Система печи	Расход условного топлива (в проц. от веса обожженного клинкера)	Расход тепла (в кал на 1 кг обожженного клинкера)
Дитча	14,3—17,2	1000—1200
Шнейдера	12,8—15,7	900—1100
Автоматические печи . .	14,3—18,6	1000—1300
То же, работающие по способу «черного брикета»	17,2—20,0	1200—1400

Таблица 27
Сводная таблица основных характеристик работы шахтных печей при обжиге различных материалов

Данные	Материалы				
	Гипс	Известь		Шамот	Портланд-цементный клинкер
Способ обжига	Пламенный	Полугазовый	Пересыпной	Газовый	Пересыпной
Средняя температура обжига (в ° Ц)	500	1100	1100	1200	1430
Высота шахты печи (в м)	8,1	14,06	14,4	13,1	9,0
Диаметр шахты печи (средний) (в м)	—	—	2,6	—	2,5
Объем печи (в м³)	16,5	53,0	77,0	40,0	50,0
Род топлива	Дрова	Подмосковный уголь	Антрацит АС	Генераторный газ	Антрацит АС
Теплотворная способность топлива (в кал/кг)	2200	3040	6400	995¹	6500
Начальная влажность материала (в проц.)	22,0³	10,0	2,0	21,3	1,0
Температура материала из печи (в ° Ц)	200	100	100	50	200
Температура отходящих из печи газов (в ° Ц)	300	350	280	120	350
Избыток воздуха в печи	3,0	1,5	1,3	—	1,1
Средний расход топлива (в кг/час)	655	458	342	905	310²
Средняя производительность печи (в кг/час)	4125	995	2080	900	1875
Средняя объемная производитель, печи (кг/м³ в сутки)	2500	450	650	540	900
Удельный расход тепла (в кал/кг)	350	1400	1050	1000	1075
Расход условного топлива (в проц. от веса обожженного материала)	5,0	20,0	15,0	14,4	15,4

¹ Теплотворная способность газа в кал/м³, расход газа в м³/час.

² Обжиг натурального мергеля.

³ Совместно с гидратной влагой.

2. Вращающиеся трубо-печи

Основные принципы работы

Вращающиеся трубо-печи отличаются от остальных печей тем, что они одновременно являются печью и транспортером, передвигающим материал или параллельно, или навстречу горячему потоку газов. Вращающиеся печи употребляются для сушки, обжига и прокаливания всевозможных сыпучих и кусковых материалов: гипса, извести, портланд-цементного клинкера, шамота, каустического и металлургического магнезита и т. д.

При этом топливо (твердое, пылевидное, жидкое или газообразное) сжигается или внутри печи, или вне ее, в специальной топке, благодаря чему температуры обжига во вращающихся печах могут колебаться в широких пределах — от 200° до 1700°. Соотношение между температурой обжига материала и calorиметрической температурой горения топлива характеризуется коэффициентом α — пирометрическим коэффициентом полезного действия печи, значения которого при обжиге различных материалов приведены в табл. 28.

Таблица 28

Наименование материалов	Средняя температура обжига (в °C)	Значения α	Примечание
Штукатурный гипс .	250	0,115	Среднее значение calorиметрической температуры горения угля принято 2180° при $\alpha = 1$ и температуре воздуха для горения 0° C. С повышением α значения α возрастают; с повышением температуры воздуха — падают.
Низкоожженный шамот	700	0,32	
Каустический магнезит	900	0,41	
Гидравлический гипс	1000	0,46	
Известь	1150	0,53	
Высокоожженный шамот	1350	0,62	
Портланд-цементный клинкер	1430	0,66	
Металлургический магнезит	1650	0,76	

Так как практическая температура горения топлива всегда ниже calorиметрической и колеблется в выносных топках от 1050° до 1200° и при сжигании топливной пыли — от 1200° до 1400°, при температурах обжига до 1000° (или что то же при значениях α до 0,46) топливо сжигается вне печи, в выносной топке, а при более высоких температурах и значениях α — внутри печи. Максимальной температурой обжига, достигаемой во вращающихся печах, является 1700°, выше которой для обжига применяют электропечи.

Вращающаяся печь (рис. 42) состоит из длинного железного барабана, расположенного слегка наклонно и медленно вращающегося. Верхним концом барабан входит в пыльную камеру, соединенную при помощи дымового боровца с дымовой трубой.

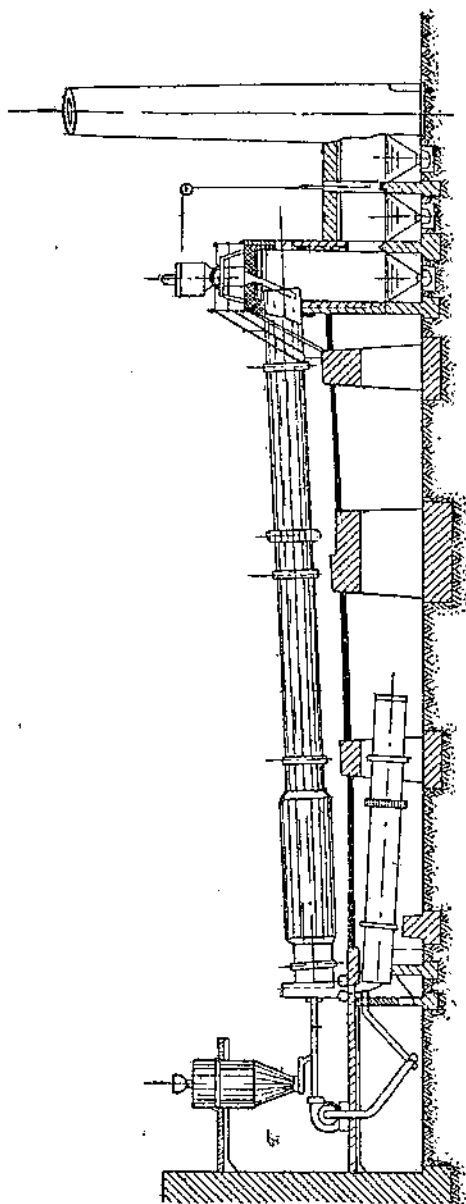


Рис. 42. Схема вращающейся печи для обжига порганд-цементного клинкера

Пылевидное топливо вдувается в печь через головку при помощи вентилятора и сжигается в передней части обжигательного барабана, которая является топкой печи. Продукты горения движутся вдоль обжигательного барабана и через пыльную камеру уходят в дымовую трубу.

Сырьевой материал в виде муки или в жидком виде подается по питательной трубе в верхнюю холодную часть обжигательного барабана, благодаря наклону и вращению передвигается навстречу газовому потоку вдоль барабана, в нижний его конец и высыпается в виде готового продукта — клинкера в холодильник. Холодильник представляет собой железный барабан, расположенный под печью и снабженный перемешивающими лопастями, которые поднимают и ссыпают горячий клинкер для охлаждения его воздухом. Холодный воздух поступает через нижний открытый конец холодильника, нагревается и через клинкерную камеру, расположенную под головкой, поступает в переднюю часть обжигательного барабана.

Из холодильника клинкер сыпается на транспортирующие устройства печи (тряски, вагонетки, ленты, транспортеры), которые доставляют его в клинкерный склад.

Таким образом обжигательный барабан цементнообжигательной вращающейся печи работает по принципу противотока и

объединяет в себе топку и печь. В части топки происходит полное горение топлива, а в печи — ряд технологических процессов. Эти процессы вполне автоматически следуют друг за другом и регулируются только работой топки и скоростью подачи сырьевого материала.

В зависимости от способа подачи сырьевой смеси различают мокрый и сухой способы производства клинкера. При мокром способе производства сырьевая смесь, состоящая обычно из мела или известняка с глиной, подается во вращающуюся печь в жидком виде (шламм) с влажностью от 32 до 50 проц. При сухом способе производства сырьевая смесь подается в печь в виде увлажненного до 10—14 проц. порошка (муки).

Топливо для вращающихся печей

При сжигании топлива в выносных топках, приставленных к вращающимся печам, могут применяться всевозможные виды топлива. При этом конструкция топок должна соответствовать роду сжигаемого топлива (ручные колосниковые решетки, шахтные топки с наклонными и ступенчатыми колосниками, цепные решетки и т. д.). Для понижения температуры продуктов горения между топкой и печью устраивается смесительная камера, в которую поступает холодный воздух. Для улучшения условий горения топлива топки снабжаются искусственным дутьем.

При сжигании топлива в полости вращающейся печи применяются в пылевидном состоянии каменные угли, торф и горючие сланцы, а также мазут и технические газы.

Наиболее распространено применение каменных углей.

Выбор твердого топлива для сжигания в полости печи в пылевидном состоянии обуславливается протекающими во вращающихся печах процессами, причем топливо должно удовлетворять следующим условиям:

- 1) быть дешевым и доступным,
- 2) обеспечивать при сжигании необходимую для обжига температуру факела горения,
- 3) время полного горения должно соответствовать времени полета топливной пыли до начала зоны обжига материала,
- 4) присадка золы к материалу не должна ухудшать качества продукции.

Первому условию удовлетворяют главным образом местные виды топлива, которые вполне успешно сжигаются во вращающихся печах. Для обеспечения остальных условий применяются смеси каменных углей различных марок, подобранные таким образом, чтобы, с одной стороны, обеспечить необходимую температуру обжига, а с другой — достаточно устойчивое положение зоны спекания, зависящее от длины факела горения, тонкости помола топлива и от содержания в нем летучих.

В цементной промышленности большинство заводов работает на смесях длиннопламенных и тощих углей. Так, например, топливом для вращающихся печей подмосковных заводов обычно является пылеугольная смесь, содержащая от 60 до 75 проц. подмосковных углей с примесью от 25 до 40 проц. до-

нецких тощих углей; ленинградский цементный завод работает на пылеугольной смеси, содержащей около 30 проц. длинно-пламенного или газового угля, 40—50 проц. тощего и до 30 проц. гдовских сланцев; на уральских заводах употребляется каменно-угольная смесь, содержащая от 60 до 70 проц. челябинского угля и от 30 до 40 проц. егоршинского антрацита.

Так как вращающаяся печь представляет собой длинную и узкую трубу, факел горения пылевидного топлива также должен иметь длинную и узкую форму. Кроме того, при горении должны обеспечиваться весьма высокие температуры, превышающие температуру материала на 100—600°. Так, например, при обжиге портланд-цементного клинкера температура факела горения должна быть не ниже 1500—1600°, а при обжиге металлургического магнезита — 1700—1800°.

Для достижения столь высокой температуры горения, топливо сжигается с предварительно подогретым воздухом, который нагревается до 250—500° за счет охлаждения в холодильниках обожженного продукта, который выходит из печи с температурой 1000—1400° и охлаждается до 100—200°.

Тонкость помола топлива является чрезвычайно важным фактором, обуславливающим наряду с содержанием летучих в топливе время полного горения топливной пыли. Чем грубее помол и меньше летучих в топливе, тем продолжительнее время горения, и наоборот.

Нормальное время горения топливной пыли во вращающихся печах составляет от 1 до 2 секунд, исходя из чего и зная содержание летучих в горючей массе топлива, можно, пользуясь графиком (рис. 47), определить средние размеры пылинок. Далее по формуле:

$$L = WZ \text{ (см. стр. 24).}$$

можно приближенно определить длину активной части факела горения.

Средняя скорость газов во вращающихся печах колеблется от 3,5 до 4,5 м/сек. Таким образом, длина факела горения составляет приблизительно от 4 до 10 м. Так как обжиг, а тем более спекание материала протекают при высоких температурах, которые достигаются при полном развитии факела горения, расстояние от головки печи до зоны спекания должно быть приблизительно равно длине факела горения, т. е. от 3 до 9 м от головки печи или от конца пылеугольной горелки. При грубом помоле топлива отдельные пылинки не успевают сгорать и выпадают на обжигаемый материал несгоревшими, что увеличивает расход топлива.

При сжигании во вращающихся печах мазута подготовка его к горению не отличается от обычной. Подогретый сначала в бассейнах (до 40°) мазут подается под давлением 15—25 ат на печи, в которых расплывается механическими форсунками. Распыленный и перемешанный с воздухом мазут должен гореть длинным и узким факелом, не касаясь футеровки печи. Так как это обстоятельство ухудшает условия образования газозвушной смеси, удельный расход тепла на обжиг при сжигании мазута несколько выше, чем при сжигании угольной пыли.

При обжиге во вращающихся печах шамота или извести, требующих более низкой температуры, может применяться генераторный газ, который в смеси с горячим воздухом может обеспечить необходимую для обжига температуру. При этом температура подогрева воздуха в случае обжига шамота должна достигать $450 - 500^{\circ}$, что может вызывать необходимость в устройстве специальных холодильников или подогрева газа.

Применение генераторного газа оправдывается при наличии центральной газогенераторной станции, так как установка индивидуальных газогенераторов непосредственно возле вращающихся печей не экономична.

Вполне возможно также применение в качестве топлива естественного (натурального) газа, теплотворная способность которого весьма высока и достигает 12000 кал/м^3 .

Основные элементы вращающихся печей

Основными элементами вращающихся печей являются:

- 1) обжигательный барабан,
- 2) опорные и упорные приспособления,
- 3) головка обжигательного барабана,
- 4) горячие и холодные камеры,
- 5) холодильник,
- 6) питательные устройства,
- 7) дымовая труба.

Обжигательный барабан вращающейся печи склепывается или частично сваривается из котельного железа толщиной в зависимости от диаметра и длины барабана — от 16 до 22 мм. Диаметр его колеблется от 2,0 до 3,6 м и длина от 30,0 до 150,0 м. Барабан выкладывается огнеупорной футеровкой для предохранения железа от воздействия высоких температур и для уменьшения тепловых потерь. Вес барабана составляет в зависимости от его длины от 300 до 1000 т, причем больше половины веса составляет футеровка. В передней части обжигательный барабан нередко делается большего диаметра, чем на остальном протяжении (печи с расширенной зоной). Делается это для увеличения объема топочного пространства, выравнивания скоростей газового потока и лучшего обжига материала, который в этом случае продвигается медленней и равномерней.

Обжигательный барабан при помощи стальных бандажей опирается на опорные ролики, которых бывает от 2 до 6 пар. Опорные ролики укрепляются в раме, которая в свою очередь укрепляется на железобетонном фундаменте. Для некоторого ограничения и контроля продольного передвижения обжигательного барабана за счет его удлинения при нагреве, с обеих сторон бандажей устанавливаются упорные ролики (рис. 43). Все ролики смазываются густой смазкой. При вращении барабана ролики благодаря трению о бандажу вращаются вместе с барабаном.

Бандаж свободно надевается на обжигательный барабан неразрезанными и делается из специальной стали. Для того чтобы бандаж не проворачивался на кожухе барабана, между ним и кожухом прокладывают железные прокладки (башмаки).

Уклон барабана, необходимый для продвижения материала, составляет от 3 до 5° к горизонту или от 4 до 6 проц. по отношению к общей его длине. Число оборотов барабана может изменяться в пределах от 0,25 до 1,2 об/мин. (от 15 до 72 об/час). Вращение барабана достигается при помощи привода, состоящего из набора шестерен, соединенных через муфту с мо-

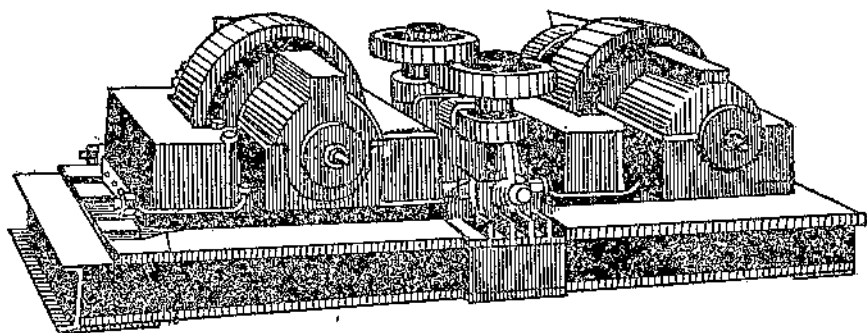
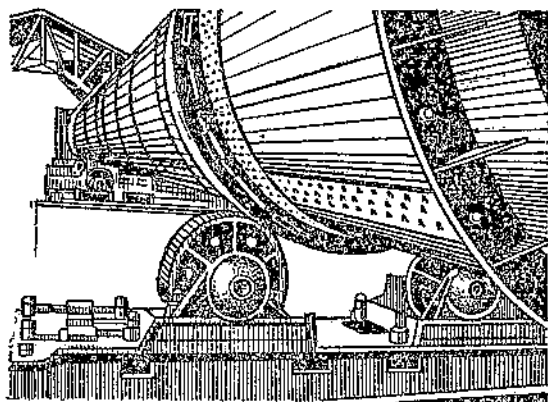


Рис. 43. Опорные и упорные ролики вращающейся печи

тором в 60—100 ЛС. Последняя шестерня (венцовая) состоит из 2 или 4 частей и насаживается непосредственно на корпус барабана при помощи железных пружин, представляющих собой Z-образные отрезки железа, прикрепленные к кожуху барабана и к шестерне. Благодаря им барабан имеет возможность расширяться от нагревания и не страдает от толчков при пуске мотора. Остальные шестерни (от 2 до 8) насаживаются на стальные валы и погружаются в масляную ванну (рис. 44). Нижним (горячим) концом обжигательный барабан входит в откатную головку, которая может отодвигаться от барабана по рельсам. С передней стороны головка имеет два смотровых окошка, между которыми вставляется форсунка. Головка барабана чугунная, отфутерована шамотом и имеет в дне отверстие для прохода обожженного продукта в холодильник.

Между головкой и кожухом барабана ставится уплотняющее кольцо для задержки воздуха, стремящегося проникнуть в печь через неплотности.

Верхний холодный конец обжигательного барабана входит в пыльную камеру. В зазоре между барабаном и камерой также ставится уплотняющее кольцо. Эта камера служит для осаждения пыли, устремляющейся из печи вместе с газовым потоком.

Пыль осаждается в бункерах пыльных камер и периодически удаляется из них. За пыльной камерой устанавливается дымовая заслонка (шибер), представляющая собой тяжелую чугунную плиту, подвешенную на перекинутах через блок стальной тросе. Шибер должен свободно подниматься и опускаться, плотно закрывая боров и не допуская засосов воздуха. Шибер является очень ответственной деталью печи, так как при помощи его регулируется весь процесс обжига. При опускании шиберов сопротивление проходу газов возрастает и факел горения приближается к головке обжигательного барабана; при подымании, наоборот, сопротивление проходу газов уменьшается и факел горения растягивается вдоль печи.

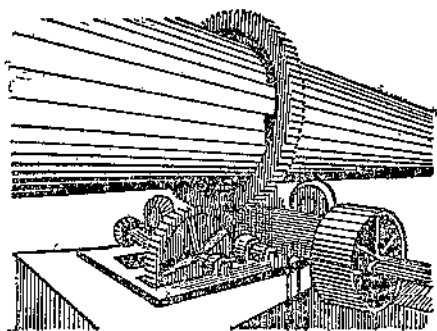


Рис. 44. Привод вращающейся печи

Головка обжигательного барабана соединяется с клинкерной камерой, выложенной огнеупорным кирпичом и снабженной клинкерным летком, по которому обожженный продукт самотеком ссыпается в холодильник. Для предохранения кирпича от воздействия горячего материала, падающего с высоты 2 м и больше, дно и стенки летка выкладываются броневыми плитами.

Для быстрого охлаждения обожженного продукта, а также для подогрева идущего для горения воздуха служат холодильники.

Холодильник обычно представляет собой железный барабан, длиной от 15 до 25 м и диаметром от 1,4 до 3,0 м и приблизительно на первую треть своей длины отфутерован шамотным кирпичом. Барабан холодильника наклонен в сторону, противоположную наклон обжигательного барабана. Угол наклона к горизонту составляет от 4 до 8° при вращении от 2 до 6 об/мин. Холодильник снабжен двумя бандажами, которые опираются на 2 пары роликов, расположенных на фундаментах. Благодаря наклону и вращению, обожженный горячий продукт продвигается по холодильнику и, встречая холодный воздух, поступающий через нижний открытый конец холодильника, охлаждается до 100—200°. Иногда холодильники выполняются в виде 8—12 цилиндров диаметром 0,8 м и длиной 4—5 м, расположен-

ных вокруг горячего конца обжигательного барабана (рис. 45) и являющихся как бы продолжением последнего. В этом случае обожженный продукт попадает в холодильники, называемые иначе

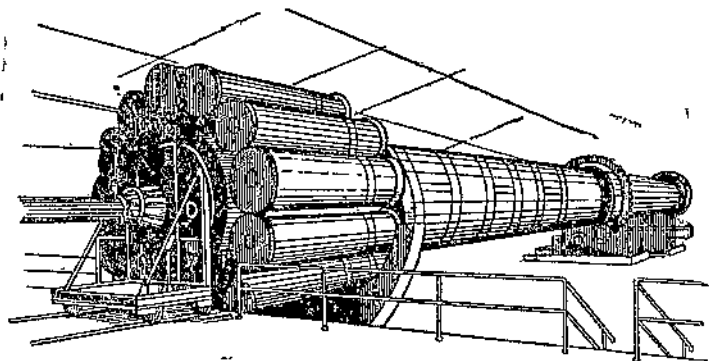


Рис. 45. Вращающаяся печь с рекуператорами

рекуператорами,¹ через отверстия, вырубленные в кожухе обжигательного барабана, а воздух засасывается через прорези или открытые концы холодильников (печи Унакс).

Цилиндры этих холодильников соединяются с корпусом печи при помощи стальных колен и футеруются на длину первой трети огнеупорным кирпичом; на остальной их длине навешиваются цепи, задерживаясь которыми горячий клинкер интенсивно охлаждается поступающим через открытый конец холодильника воздухом.

Конструкции питательных устройств зависят от способа работы вращающихся печей.

При мокром способе производства жидкий шлам сливается в обжигательный барабан самотеком через наклонно поставленную трубу, входящую в холодный конец барабана. Регулирование толщины сливаемой струи производится или по времени наполнения контрольного бачка, через который шлам сливается в трубу, или числом оборотов черпаков, которые черпают шлам и сливают его в трубу. В некоторых случаях шлам вбрызгивается в обжигательный барабан под давлением 4—6 ат (способ пульверизации шлама).

При сухом способе производства слегка увлажненный материал подается в питательную трубу обжигательного барабана при помощи двух вращающихся в разные стороны шнеков; число оборотов шнеков регулируется в широких пределах. По питательной трубе материал поступает в барабан самотеком.

Перед откатной головкой обжигательного барабана помещается бункер для пылевидного топлива. Бункера имеют круглое или эллипсоидальное сечение и изготовляются из железа или железобетона. Топливная пыль не должна скапливаться в мерт-

¹ Этот термин технически неправилен, так как в рекуператорах воздух никогда не смешивается с обжигаемым продуктом.

вых углах бункеров во избежание самовозгорания. Бункер заканчивается прямоугольной или круглой коробкой, через которую проходит от 2 до 4 питательных шнеков, вращающихся в разные стороны. Длина шнеков 1,5—2,5 м, диаметр 150—200 мм. Шнеки заключены в железный кожух и должны плотно прилегать к его стенкам. Обороты шнеков регулируются или фрикционной передачей или при помощи реостата мотора.

Из шнеков топливная пыль поступает в дутьевую трубу форсуночного вентилятора, также расположенного перед откатной головкой, и со скоростью от 25 до 50 м/сек вздувается в печь через форсунку.

Форсунка состоит из чугунной трубы, диаметром у выходного конца 130—250 мм и длиной 0,8—1,3 м, и укреплена в кожухе откатной головки. В печах Унакс длина форсунки достигает 3,0 м. Дутьевая труба имеет фланцы и может сниматься, когда головку необходимо откатывать для футеровки печи.

Форсуночный воздух подается в печь под давлением 150—350 мм вод. ст. в количестве 20—35 проц. от всего необходимого для горения воздуха (от 5000 до 8000 м³/час). Воздух подается горячим или холодным. Применение горячего форсуночного воздуха повышает температуру факела горения, улучшает обжиг и уменьшает расход топлива. Остальные 65 проц. необходимого для горения воздуха засасываются в печь за счет разрежения дымовой трубы через холодильник и горячую клинкерную камеру.

Дымовая труба устанавливается за дымовым бором. Высота ее при естественной тяге приблизительно равна длине вращающейся печи, доходя до 70 м и больше. Встречается оборудование двух и даже четырех печей одной дымовой трубой, что затрудняет, а иногда и перебивает работу печей, почему более правильным является устройство для каждой печи индивидуальной дымовой трубы. На длинных печах, в которых температура отходящих газов равна 180—220°, устанавливаются перед дымовой трубой дымососы (экстаустеры); при этом, однако, обязательно предусматривается возможность работы печи и помимо дымососа — прямо на трубу, что необходимо во время розжига печи, когда температура отходящих газов сильно возрастает. Установка дымососов всегда необходима при низкой температуре отходящих из печи газов, например при подаче шлама в печь способом пульверизации.

Дымосос рассчитывается на полное количество отходящих из печи газов с 20 проц. запасом и с поправкой на их температуру; разрежение, создаваемое дымососом, колеблется в пределах от 50—100 мм вод. ст.

Таким образом, если количество газов, отходящих из печи длиной 70 м и диаметром 3,5—3,0 м, составляет 35 000 м³ и температура отходящих газов равна 300° Ц, производительность дымососа должна составить в час:

$$Q_{\text{час}} = 35000 \times \frac{300 + 273}{273} \cdot 1,2 = 88\,000 \text{ м}^3/\text{час.}$$

$$\text{и в секунду } Q_{\text{сек.}} = \frac{88\,000}{3609} = 24,4 \text{ м}^3/\text{сек.}$$

Расход энергии на отсос газов составляет от 30 до 50 *квт.*
При наличии дымохода дымовая труба устанавливается высотой в 30 — 40 *м.*

Огнеупорная футеровка для предохранения железа обжигательного барабана от воздействия высокой температуры и для уменьшения тепловых потерь в области высоких температур на длине первых 8 — 12 *м* печи делается из специального кирпича, а на остальной длине — из шамотного.

В зависимости от химических свойств сырья, золы топлива, а также способности сырья к образованию защитного слоя (к налипанию обмазки), употребляются следующие виды футеровочных материалов:

- 1) клинкеро-бетонный кирпич, приготовленный из обожженного портландцементного клинкера и цемента,
- 2) магнезитовый кирпич,
- 3) хромо-магнезитовый кирпич,
- 4) тальковый кирпич из обожженного уральского талькового камня.

- 5) шамотный кирпич.

Кладка футеровки должна производиться весьма тщательно, причем ее производят кольцами вперевязку, обращая особенное внимание на укладку последнего в кольцо кирпича-замка. При производстве футеровки отодвигают головку печи, поврежденную футеровку выламывают и выкладывают новую сначала в нижней части барабана, а затем, распирая уложенные ряды кирпича домкратами, поворачивают печь и производят футеровку верхней половины барабана.

Чем выше стойкость футеровки, тем выше коэффициент использования печи и, следовательно, ее годовая производительность. Средний срок службы футеровки вращающейся печи (в горячей ее части) в цементной промышленности составляет около 30 суток, понижаясь на отдельных заводах до 6 — 10 суток и повышаясь до 3 месяцев и выше.

Процесс обжига во вращающихся печах

Обжиг кусковых и сыпучих материалов во вращающихся печах состоит в постепенном доведении обжигаемых материалов до температуры обжига и охлаждения обожженного продукта.

Так как сырьевой материал, из которого обжигаются вяжущие вещества, всегда содержит влагу, углекислый магний, углекислый кальций и органические примеси, обжигательный барабан вращающейся печи в зависимости от химического состава материала подразделяется на технологические зоны.

При обжиге гипса в обжигательном барабане происходит только выделение гигроскопической и конституционной влаги, протекающее по всей длине барабана.

При обжиге извести (рис. 46) в холодной части барабана, на протяжении около 0,3—0,4 от общей его длины L , происходит сушка и подогрев известняка, что соответствует зоне сушки и подогрева; на протяжении дальнейших 0,35—0,45 L рас-

полагается зона диссоциации и на протяжении последних $0,25 L$ — зона охлаждения. При этом пространство горения топлива соответствует зоне охлаждения и началу зоны диссоциации.

При обжиге портланд-цементного клинкера при мокром способе производства холодная часть обжигательного барабана на длине $0,25 — 0,5 L$ соответствует зоне сушки (рис. 47), за ней следует зона подогрева и кальцинирования (диссоциации) материала, занимающая длину $0,3 — 0,6 L$, далее на протяжении $0,2 — 0,3 L$ — зона спекания и охлаждения, которой соответствует пространство горения топлива. Аналогично располагаются технологические зоны при обжиге шамота, металлургического магнезита и других материалов.

Процессу обжига различных материалов соответствуют кривые обжига, характер которых различен и зависит от температуры обжига, начальной влажности и физико-химических свойств материала. Однако кривая обжига одного и того же материала (например извести или портланд-цементного клинкера) во вращающихся печах различной длины более или менее постоянна.

Так как во вращающихся печах осуществляется полная поточность производства, отдельные стадии обжига следуют непосредственно друг за другом и могут быть подразделены по длине печи лишь условно.

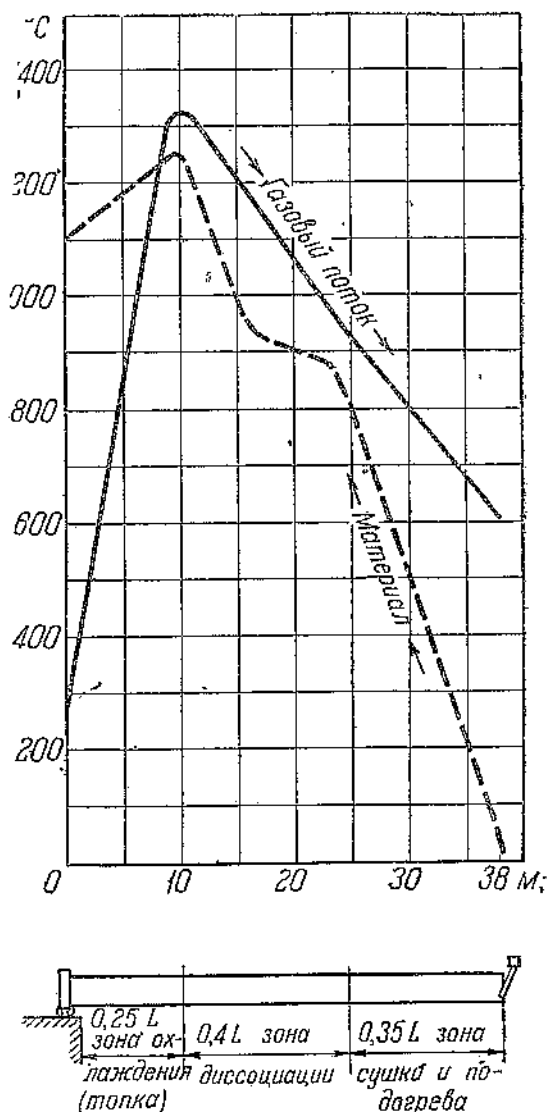


Рис. 46. Кривая обжига извести во вращающейся печи

Ниже в качестве примера рассматривается процесс обжига портланд-цементного клинкера во вращающейся печи длиной $69 м$ и диаметром $3,0/2,5 м$. Если просверлить кожух обжигательного барабана и измерить температуры газового потока и мате-

риала, можно построить график температур по длине печи, представленный на рис. 47.

Температура факела горения сразу после поступления пылевидного топлива в печь резко возрастает, достигая при сжигании высококалорийного топлива 1800° , после чего вследствие отдачи тепла материалу начинает постепенно понижаться.

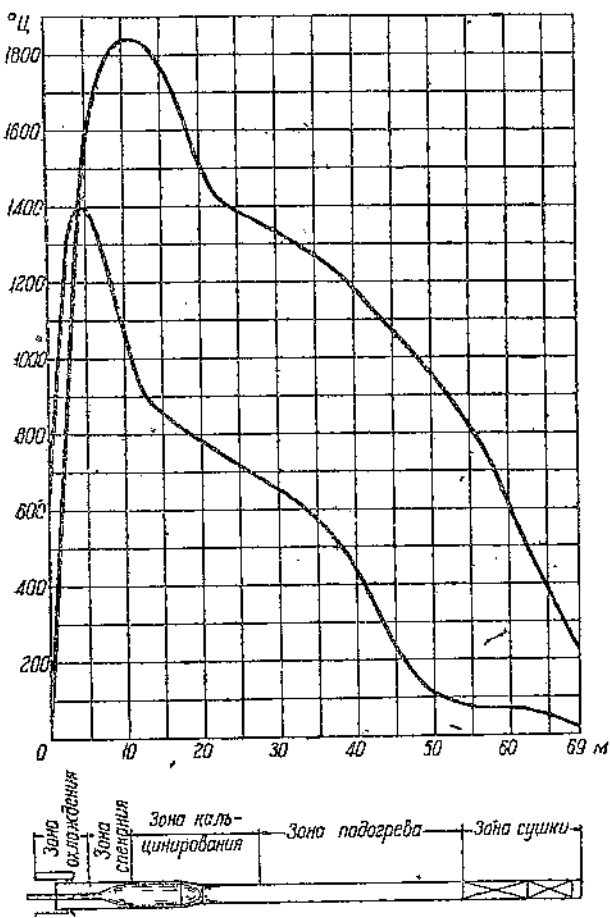


Рис. 47. Кривая обжига портланд-цементного клинкера во вращающейся печи при мокром способе производства (по Г. Гиги)

Смесь воздуха и топливной пыли вылетает из устья форсунки в виде узкого конуса, который начинает загораться на расстоянии 1,5 — 2,0 м и заканчивается на длине от 8 до 15 м.

При горении мазутного топлива часть золы выпадает на клинкер, часть осаживается в пыльных камерах и наиболее мелкая зола уносится в дымовую трубу.

Количество золы, выпадающей на клинкер, зависит от длины печи, способа подачи в печь шлама и разрежения, развиваемого дымовой трубой. При сжигании каменноугольной пыли присадка золы к клинкеру составляет от 2 до 4 проц. от веса обожженного клинкера. При сжигании пылевидных сланцев, зольность которых доходит до 75

проц., эта присадка доходит до 20 проц. от веса клинкера, что резко понижает качество продукции. Поэтому, а также из-за низкой теплотворной способности сланцев, их сжигают всегда в смеси с тощим углем.

Подавая определенное количество пылевидного топлива во вращающуюся печь, положение зоны спекания устанавливают при помощи поднятия или опускания дымовой заслонки (шибера) таким образом, чтобы, с одной стороны, обеспечить полное горе-

ние топлива, а с другой,— возможно полнее использовать объем печи для протекания технологических процессов. При этом стараются не слишком удалять зону спекания от головки печи, так как при отодвигании зоны спекания вглубь печи, зоны кальцинирования и сушки перемещаются к холодному концу печи, отчего материал может подойти к зоне спекания недостаточно подготовленным и выйти из печи неспекшимся (недожог).

В этом случае печь переводят на тихий ход или останавливают, и сырой материал в течение известного времени прогревается.

На устойчивое положение зоны спекания сильно влияет качество сырьевой смеси. При повышении влажности шламма зона подсушки соответственно удлиняется, передвигая зону кальцинирования и спекания к головке печи, что приводит к понижению производительности. Точно также с повышением содержания CaCO_3 в материале растягивается зона кальцинирования, причем разложение добавочного углекислого кальция приводит не только к повышению расхода топлива, но также влечет за собой и повышение температуры отходящих газов.

В той части печи, где температура газового потока и материала являются наивысшими, скорость газов в трубе максимальна и составляет от 6 до 12 м/сек. В этой части обжигательного барабана газы состоят только из продуктов горения топлива. По мере продвижения к холодному концу печи скорость газов уменьшается и в заднем сечении печи составляет от 2,5 до 4,0 м/сек. Здесь газы состоят из тех же продуктов горения топлива, к которым примешиваются углекислота, выделяющаяся при разложении углекислого магния и углекислого кальция, и испаренная из материала влага.

Сырьевая смесь, поступающая в заднюю верхнюю часть печи обычно в виде жидкого шламма, вначале налипает на стенки обжигательного барабана, затем, подсыхая, отваливается от них и, скатываясь в плотную массу, медленно продвигается по печи. Окончательно высыхая, сырье разбивается на куски, которые по мере продвижения измельчаются и после спекания образуют конечный продукт обжига цемента во вращающихся печах — клинкерный горошек.

В начале зоны сушки температура газового потока составляет около 500—1000° и падает при выходе в пыльную камеру в коротких печах, работающих по мокрому способу, — до 450—500°, в более длинных печах (60—80 м) — до 300—400° и в печах, работающих по сухому способу, — до 700—800°.¹

Для более энергичного перемешивания материала с газовым потоком в холодной части печи подвешивают цепи, на которые налипает подсыхающий материал, отчего поверхность соприкосновения кусков материала с газовым потоком значительно увеличивается. При этом сушка происходит быстрее и длина зоны сушки уменьшается. Еще интенсивнее сушка происходит в том

¹ При наличии цепей на длинных печах (90—110 м) температура отходящих газов составляет 180—200°.

случае, когда шламм не вливается, а брызгается в печь особыми форсунками (пульверизация шламма). Мельчайшие капельки шламма пронизывают несущийся навстречу газовый поток и, нагреваясь, теряют влагу значительно быстрее, чем крупные куски.

Высушенный материал, нагреваясь до температуры $100-200^{\circ}$, переходит в зону кальцинирования, в которой происходит дальнейшее его нагревание до $1000-1100^{\circ}$, разложение $MgCO_3$ и $CaCO_3$ с выделением большого количества углекислоты и образование простейших соединений извести с кремнеземом (силикаты кальция).

Так как образование этих силикатов, так же как и разложение углекислого кальция, происходит с затратой тепла, температура газового потока на протяжении зоны кальцинирования понижается с $1300-1800^{\circ}$ до $500-1000^{\circ}$. В зоне кальцинирования, протекающего с большей затратой тепла, температура материала повышается очень незначительно (на $100-150^{\circ}$), в то время как температура газового потока понижается почти на 800° .

В самом начале зоны спекания происходит резкое повышение температуры материала на $350-450^{\circ}$, в то время как температура газового потока изменяется мало. Здесь в материале развиваются реакции, протекающие с выделением тепла, в силу чего и повышается температура материала. Дальнейшее повышение температуры материала происходит вновь с затратой тепла. В процессе спекания происходят реакции образования сложных силикатов кальция, которые в основном и составляют портланд-цементный клинкер.

Контроль обжига производится при помощи синего стекла, пользуясь которым наблюдают через гляделки в головке печи за состоянием материала в зоне спекания. Темный материал указывает границу зоны спекания и кальцинирования, которую стремятся держать в поясе полного развития факела горения, не давая ей возможности приблизиться к головке или отодвинуться в глубь печи. Положение зоны спекания регулируется шибером: при опускании шибера зона спекания приближается к головке печи, при поднятии — отодвигается в глубь печи. Регулируя положение зоны спекания, регулируя питание печи шламом (толщину слоя материала) и подачу топлива, добиваются работы печи с полным числом оборотов и выпуском продукции нормального качества.

Широко развернувшееся в цементной промышленности станхановское движение коснулось в первую очередь обжига, как основной операции производства, и отразилось на нормах обжига, значительно превысив гарантии фирм, устанавливавших печи.

Происходившая в феврале 1936 г. в Москве отраслевая конференция цементников приняла и установила на первое время следующую производительность вращающихся печей, исходя из их объема (объем печи определяется по внутреннему диаметру обжигательного барабана без учета толщины футеровки) (табл. 29):

Группа	Длина печи (в м)	Объем (в м³)	Производительность (в кг/м³ сутки)	Примечание
I	30	до 150	650	Производительность печей, работающих по сухому способу или снабженных шлама-фильтрами, принималась на 15 проц. выше, печей, снабженных пульверизацией шлама — на 10 проц. выше.
II	43—46	150—200	580	
III	50—60	250—350	540	
IV	65—75	425—525	510	
V	Печи Унакс		530	

Истекшие годы стахановской работы внесли значительные изменения в работу вращающихся печей, причем в ряде случаев принятая конференцией производительность печей превзойдена. Так например, отдельные печи группы III устойчиво дают производительность 640 кг/м³ сутки, печи Унакс свыше 550 кг/м³ сутки. В настоящее время заводы и проектирующие организации принимают производительность вращающихся печей на 10—30 проц. выше принятых в 1936 г. отправных производительностей. Совершенно несомненно, что и последние нормы могут быть значительно повышены. При этом основными мероприятиями, обеспечивающими стахановскую работу на вращающихся печах, являются следующие:

- 1) исправное состояние печи,
- 2) бесперебойная работа всех подсобных цехов и агрегатов (сушилок, мельниц, транспортных устройств),
- 3) тщательный и равномерный помол сырья и топлива,
- 4) полная однородность сырьевой и топливной смеси,
- 5) высокая устойчивость футеровки,
- 6) максимальное уменьшение тихих ходов,
- 7) тщательное ведение процесса обжига.

При этих условиях коэффициент использования может быть повышен точно так же, как и средняя часовая производительность печи.

Для того чтобы, исходя из принятых удельных производительностей, определить среднюю часовую производительность печи, следует удельную производительность умножить на объем печи и разделить на 24.

Так, например, средняя часовая производительность печи длиной 70 м и диаметром 3,5/3,0 м, объем которой по внутреннему диаметру кожуха равен 480 м³, составляет:

$$K = \frac{561 \times 480}{24} = 11230 \text{ кг/час} = 11,23 \text{ т/час}$$

Так как во вращающиеся печи, работающие по мокрому способу производства, поступает шлам большой влажности (32—50%)

и температура отходящих из печей газов сравнительно высока, основные мероприятия по рационализации теплоспользования во вращающихся печах направлены, с одной стороны, на повышение эффективности процесса сушки и подогрева материала, а с другой — на использование отходящего из печей тепла.

К первым мероприятиям относится навеска в печах железных корабельных цепей, на которые налипают подсыхающий шламм. Цепи навешиваются преимущественно в длинных печах, отступя 2—3 м от холодного их конца до сечения, в котором температура газов составляет 700—750° (при более высокой температуре цепи перегорают). Навеска цепей повышает производительность печи и уменьшает расход топлива на 5—10 проц. К этим же мероприятиям относится также подача шлама способом пульверизации, который заключается в подаче шлама в печь под давлением 4—6 ат через специальные форсунки, установленные в задней стенке пыльной камеры. При этом температура отходящих газов понижается на 150—200°, производительность печи повышается на 15—25 проц. и экономия тепла составляет 15—20 проц. К отрицательным явлениям при пульверизации относится увеличение уноса пыли из печи, который достигает до 10 проц. от веса клинкера. Дополнительный расход электроэнергии составляет от 6 до 10 квт·ч на топку клинкера. Пульверизация шлама выгодно применяется при коротких печах с высокой температурой отходящих газов.

Для механического уменьшения содержания влаги в шламме устанавливаются вакуум-фильтры, составленные из 4—12 дисков, покрытых тканью и вращающихся со скоростью до 12 об/час. Сквозь диски подзначительным разрежением отфильтровывается вода, причем влажность при пластичном шламме понижается до 18—20 проц., а при малопластичном шламме — до 22—28 проц. Расход дополнительной энергии — до 10 квт·ч на 1 т клинкера.

Сушильный барабан вращающейся печи представляет, вообще говоря, мало эффективный аппарат для сушки пластичного материала вследствие его незначительного заполнения и слабо развитой поверхности соприкосновения материала с газовым потоком; поэтому за вращающимися печами устанавливаются специальные испарители, представляющие собой барабаны длиной 2—3,6 м и диаметром 3,5—4,0 м, установленные поперек печи над пыльной камерой.

Стенки испарителя состоят из стальных полос-колосников, между которыми сверху наливается жидкий шламм, а снизу выходит подсушенный материал. Барабан заполнен до половины стальными телами специальной формы, которые обволакиваются шламом. Газы из печи пронизывают испарительный барабан и отсасываются дымососом. При этом их температура понижается с 600—650° до 100—120°, влажность шлама уменьшается с 40 проц. до 10—18 проц., производительность печи возрастает на 25—30 проц. и экономия тепла составляет 18—30 проц.

В целях использования тепла отходящих из вращающихся печей газов, за печами устанавливаются паровые котлы, снабжающие паром турбины. При температуре отходящих газов в

600° паровая турбина может дать до 42 проц. от необходимой цементному заводу электроэнергии, при температуре 700° — до 72 проц. и при температуре 800° — может снабдить завод электроэнергией полностью. Паровые котлы устанавливаются водотрубные с поверхностью нагрева до 1500 м², давлением до 20—30 ат и перегревом пара до 350°. Коэффициент полезного действия котла составляет 60—70 проц.; напряжение поверхности нагрева при мокром способе производства 6—8 кг/м² час и при сухом 8—12 кг/м² час.

Наконец за вращающимися печами устанавливается движущаяся колосниковая решетка (печь Леполь), на которую поступает шлам с влажностью 12—14 проц. Газы из короткой печи при температуре 900—1000° пронизывают слой материала на решетке сверху вниз, температура их понижается до 100—120°, после чего они отсасываются мощными дымососами. Материал на решетке полностью высыхает и частично (на 5—7 проц.) кальцинируется, после чего ссыпается в печь для окончательного разложения CaCO₃ и спекания.

Расход условного топлива на обжиг портланд-цементного клинкера во вращающихся печах приведен в табл. 30.

Таблица 30

Конструкция печи	Расход условного топлива (в проц. от веса обожженного материала)	Расход тепла (в ккал на 1 кг обожженного материала)
При мокром способе производства		
Короткие печи без перемешивающих устройств и без использования тепла	28,6—31,4	2000—2200
Длинные печи	25,7—28,6	1800—2000
Печи Унакс	22,9—25,7	1600—1800
Печи, снабженные пульверизацией шлама	22,9—24,3	1600—1700
Печи, снабженные испарителями . .	18,6—22,9	1300—1400
При сухом способе производства		
Печи без перемешивающих приспособлений и без использования тепла . .	23,6—25,7	1650—1800
Печи, снабженные паровыми котлами .	14,3—15,7	1000—1100
Печи, снабженные колосниковой решеткой	12,8—14,3	900—1000

Вращающиеся печи для обжига шамота и извести употребляются сравнительно редко, так как применение их связано со значительными капиталовложениями. Высокотемпературный обжиг шамота в коротких цементнообжигательных печах, произведенный инж. Г. О. Гросс в 1927 г., показал полную возможность их применения для этой цели. Результаты работы приведены в сводной табл. 31. Расход топлива составил 10—14 проц.

Таблица 31

Сводная таблица основных характеристик работы вращающихся трубчатых печей при обжиге различных материалов

Данные	Материалы					Металлургический магнезит
	Гипс (штукатурный)	Известь	Шамот	Портланд-цемент		
Средняя температура обжига материала (в ° Ц)	200	1250	1350	1430	1430	1650
Длина печи (в м)	11,0	38,0	35,6	43,0	90,5	75,0
Диаметр печи (в м)	1,75	1,8	2,3	1,8	2,4/2,1	2,9/2,6
Скорость вращения (об/мин)	1,0	—	—	1,0	1,0	0,5
Род топлива	Мазут	Пылеугольное	Пылеугольное			Мазут
Низшая теплотворная способность топлива (в кал/кг)	10050	—	7000	6722	6470	10050
Начальная влажность материала (в проц.)	22,52	—	23,0	39,6	39,7	2,0
Содержание $MgCO_3 + CaCO_3$ (в проц.)	—	100,0	—	78,6	79,5	98,0
Температура материала из печи (в ° Ц)	158	—	—	1110	1100	1370
Температура подогрева воздуха (в ° Ц)	20	300	87	265	403	740
Температура отходящих из печи газов (в ° Ц)	172	600	375	475	170	500
Избыток воздуха за печью	—	—	2,1	1,07	1,13	1,05
Средний расход топлива (в кг/час)	99,0	—	384	1340	2510	1100
Средняя производительность печи по обожженному продукту (в кг/час)	2840	—	3200	3842	9520	4075
Удельный расход тепла (в кал/кг)	350	—	840	2345	1708	2700
Расход условного топлива (в проц. от веса обожженного продукта)	5,0	—	12,0	34,9	26,4	38,5

от веса обожженного шамота и может быть уменьшен; производительность печи, достигавшая 3250 кг/час или 670 кг обожженного шамота на 1 м² печи, может быть увеличена.

Во вращающихся печах возможен также низкотемпературный обжиг шамота, причем, так как температура обжига в этом случае не превышает 800°, печь должна снабжаться выносной топкой или отапливаться генераторным газом.

При обжиге извести происходит только диссоциация СаСО₃; это находит свое отражение на кривой обжига (рис. 46), характеризующейся в поясе диссоциации медленным повышением температуры материала при резком понижении температуры газового потока.

Как при обжиге шамота, так и при обжиге извести часть золы топлива присаживается к обжигаемому материалу, что должно неблагоприятно отражаться на качестве продукции.

Обжиг штукатурного гипса производится в коротких вращающихся печах небольшого диаметра, снабженных выносной топкой и смесительной камерой, в которой температура газов понижается до 200°—250°. В печь поступает предварительно раздробленный гипс, который после обжига высыпается в шнек. Печь снабжается задерживающими материал перегородками или перемешивающими приспособлениями. Обжиг гипса в сушильных барабанах также вполне возможен.

Обжиг каустического и металлургического магнетита

Таблица 32
Основные размеры вращающихся печей для обжига порланд-цементного клинкера, принятые к производству Союзстромстроймашин

Размеры печи (в м)	3,0 × 51,2	3,0 × 60,5	3,0 × 65,5	3,0/3,5 × 60	3,0/3,5 × 75	3,5 × 70	3,5 × 90
Размеры холодильника (в м)	2,2 × 23,0	2,2 × 24,8	2,2 × 24,8	2,5 × 24,8	2,5 × 24,8	3,0 × 25,6	3,0 × 25,6
Число оборотов печи в минуту	0,5—1,0	0,5—1,0	0,5—1,0	0,5—1,0	0,5—1,0	0,5—1,0	0,5—1,0
Число оборотов холодильника в минуту	3—6	3—6	3—6	3—6	3—6	2—4	2—4
Вес печи без футеровки (в т)	247	277	297	293	329	487	592
Вес футеровки печи (в т)	208	223	235	236	281	309	377
Вес холодильника (в т)	68	70	70	77	77	106	106
Мощность мотора печи (в ЛС)	40—80	45—90	45—90	50—100	60—100	100—260	120—140
То же холодильника	25—50	25—50	25—50	30—60	30—60	50—100	50—100

производится в больших вращающихся печах длиной до 75 м, отопляемых мазутом или высококалорийным углем. При обжиге каустического магнезита, температура обжига которого не превышает 1000° , топливо сжигается в печи с большим избытком холодного воздуха. Металлургический магнезит обжигается при температуре 1650° с минимальным избытком сильно подогретого воздуха и охлаждается в холодильнике.

Основные размеры вращающихся печей для обжига портланд-цементного клинкера приведены в табл. 32.

В. ПЕЧИ ДЛЯ ОБЖИГА ФОРМОВАННЫХ ИЗДЕЛИЙ

1. Периодические печи

Классификация и основные принципы работы

Периодические печи или периодические горны, как показывает само название, работают с перерывами, в течение которых производится выгрузка и загрузка материалов или изделий.

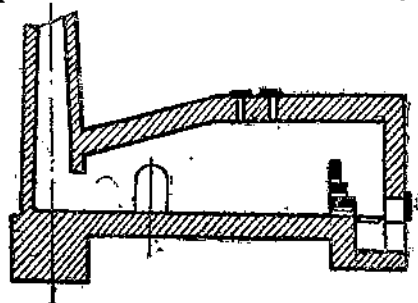


Рис. 48. Схема печи с горизонтальным направлением газового потока.

Весь цикл обжига состоит в них из загрузки изделий, обжига их, охлаждения и выгрузки, в силу чего стенки печи то нагреваются, то охлаждаются. Периодические печи (горны) получили очень широкое распространение и в них производится обжиг самых разнообразных изделий и материалов грубой, тонкой и строительной керамики. Несмотря на высокий расход топлива, эти печи часто применяются потому, что в них можно осуществить

любой режим обжига, так как процесс обжига в них легко регулируется и может устанавливаться каждый раз в зависимости от ассортимента изделий.

В зависимости от направления движения продуктов горения, периодические печи подразделяются на печи с горизонтальным направлением газового потока (рис., 48), с прямым или восходящим потоком газов (рис. 29) и с обращенным или нисходящим газовым потоком, которые иначе называются печами с горячим подом (рис. 30).

Примером одиночных печей с горизонтальным направлением пламени является кассельская печь, устроенная в виде вытянутой прямоугольной камеры. Топка расположена в переднем конце камеры, обжигаемые изделия размещаются по всему поду и разгружаются через расположенные в боковых стенках печи сади́ва. Газовый поток переваливает через порог или проходит сквозь шамотовую решетку, выложенную в пороге, для лучшего перемешивания газов и воздуха, обогревает изделия и удаляется в дымовую трубу, расположенную в заднем конце камеры.

Кассельские печи расходуют много топлива и постепенно выходят из употребления.

В печах с восходящим газовым потоком продукты горения проходят через отверстие в своде печи и удаляются в дымовую трубу; в печах с обращенным потоком продукты горения удаляются через отверстия в поде печи, собираются подподовыми (сборными) каналами и через дымовой боров уходят в дымовую трубу. Так как температура выходящих из печи продуктов горения в третий период обжига достигает $1100 - 1200^{\circ}$, периодические печи, как с восходящим, так и с нисходящим потоком делают двух- и трехэтажными, используя тепло отходящих из нижней камеры газов в камерах второго и третьего этажа. Такие печи применяются главным образом в фарфоро-фаянсовой промышленности.

Основным требованием при обжиге различных изделий является равномерность температуры как по высоте, так и по сечению печи. В этом отношении печи с обращенным газовым потоком имеют значительное преимущество перед печами с восходящим потоком, в которых горячие газы сразу устремляются в подсводовое пространство, в результате чего температура на поду и в средней части печи всегда ниже, чем в верхних ее горизонтах и нагрев обжигаемых изделий неравномерен.

Печи с обращенным газовым потоком (с горячим подом) в значительной степени лишены этого недостатка; однако при неправильной конструкции подовых отверстий и в них возможно неравномерное распределение и остывание газовых потоков, что приводит к значительной, доходящей до $100 - 200^{\circ}$, разнице температур между низом и верхом печи. Во избежание этого явления и для выравнивания температуры по всему объему печи подовые отверстия должны быть равномерно распределены по поду печи и сопротивление прохождению газов через них должно быть значительно выше сопротивления подподовых (сборных) каналов и дымового борава.

При обжиге керамических изделий разница температур между верхом и низом печи не должна превышать $30 - 40^{\circ}$; только при этом условии все изделия могут быть одинаково равномерно обожжены.

В настоящее время периодические печи строятся почти всегда с горячим подом, причем в двух- и трехэтажных фарфоровых горнах горячие газы нижней камеры поступают в верхнюю по вертикальным каналам, соединяющим подподовые каналы первой камеры с верхней камерой горна. Так как кладка печи при этом довольно скоро разрушается, в последнее время начинают применяться вместо каналов в стенах — наружные короба, подающие газы прямо из топки или из нижней камеры.

Принцип работы периодических печей сводится к следующему: в первый и второй периоды обжига топливо сжигается в расположенных симметрично топках, и продукты горения поступают в печь через перевальную стенку, проходят в промежутках между загруженными в печи изделиями, нагревают их и через отверстия в поду печи удаляются подподовыми каналами в ды-

мовой боров и дымовую трубу. В третий период обжига, когда температура в печи достигает максимума ($1300-1500^{\circ}$), который превосходит среднюю температуру пламенной топки ($1000-1100^{\circ}$), сжигание топлива производится полугазовым способом и догорание полугаза переносится в полость печи. Горючие элементы полугаза, т. е. H_2 и CO , догорая среди изделий со вторичным воздухом, повышают нагрев изделий до необходимой температуры и удаляются в дымовую трубу или каким-либо способом утилизируются. Охлаждение изделий достигается при помощи воздуха, который подводится через подовые отверстия и разобранные садива, и отводится через отверстие в своде печи, используя для целей сушки.

Основные элементы периодических печей

Основными элементами периодических печей являются:

- 1) камера печи,
- 2) топки,
- 3) газоотводящие устройства (подовые отверстия, подподовые каналы, дымовой боров),
- 4) дымовая труба.

Периодические печи (горны) по форме горизонтального сечения подразделяются на круглые и прямоугольные. Высота печи в огнеупорной промышленности колеблется от 2,5 до 4 м, достигаая в фарфоровой промышленности, где изделия обжигаются в капсулах, — 6 — 7 м. Диаметр или ширина печей обычно колеблется от 4,5 до 9,0 м, что, однако, не является пределом, и в последнее время встречаются печи для обжига изделий при высоких температурах (например динаса) диаметром 12,0 м. Наиболее распространенной является емкость периодических печей от 80 до 200 м³, которая повышается до 600 м³ в печах больших диаметров.

Круглые печи получили преимущественное распространение в фарфоро-фаянсовой промышленности, тогда, как в остальных отраслях промышленности встречается и тот и другой вид печей. По сравнению с прямоугольными, круглые горны малых емкостей дают за счет несколько меньшей наружной поверхности небольшую экономию топлива, составляющую от 2 до 5 проц. То же относится и к обжигу в круглых горнах изделий с малой плотностью садки; так, например при обжиге канализационных труб, плотность садки которых составляет около 250 кг/м³ горна, экономия тепла в круглом горне емкостью 100 м³ по сравнению с прямоугольным может составить от 8 до 13 проц. При увеличении объема печей удельный расход топлива на обжиг уменьшается, так как сокращаются потери тепла на его аккумуляцию стенам и печи.

Своды периодических печей выполняются различных конструкций. Так в прямоугольных печах обычно устраиваются высокие циркульные своды, имеющие наименьшие статические и температурные напряжения. В очень широких печах своды устраиваются по цепной кривой (катенарные своды), имеют эксцентрическую нагрузку и являются более прочными и стойкими в работе. В

круглых печах своды обычно выполняются сферическими; однако и в данном случае возможно выполнение свода по катенарной кривой.

Для увеличения срока службы свода, материал свода, его изоляция и охлаждение должны быть тщательно продуманы.

Стены периодических печей делаются из соображений прочности толщиной от 0,9 до 1,2 м. Они, прогреваясь на всю толщину, поглощают тепла больше, чем отдают его в окружающее пространство. Так как стены все время находятся под воздействием переменных температур и несут большую нагрузку свода, их стягивают железными обручами.

В своде оставляется одно и несколько отверстий для отвода горячего воздуха; в период охлаждения изделий отверстия закрываются шамотовыми шиберами. В стене устраивается одно или два садива, через которые выгружают и загружают изделия. После загрузки садиво заделывается наглухо двумя кирпичными стенками, толщиной в один кирпич; наружная поверхность стенок промазывается глиной. Пространство между кирпичными стенками засыпается золой, шлаком или другими изоляционными материалами. Размеры садива должны быть достаточными для свободного прохода садчика с изделиями. При заделке садив в них оставляются глазки для наблюдения за нагреванием изделий и режимом обжига.

Топки периодических печей служат для сжигания кускового топлива (см. раздел „Топливо и его сжигание“). Количество их зависит от размеров печи и колеблется от 4 до 14. Топки располагаются симметрично по сечению печи; в прямоугольных печах одностороннее расположение топок применяется при ширине камеры печи, не превосходящей 5,5 м. При соотношениях между длиной и шириной камеры 2,5, топки располагаются также с торцов печи.

Режим работы топок должен быть для всех топок одинаковым и должен строго соответствовать кривой обжига изделий, так как от работы топок целиком зависит режим обжига. Как было указано, в первые два периода обжига все топки печи работают как пламенные со значительным, постепенно уменьшающимся избытком воздуха; на протяжении третьего периода обжига, когда температура обжига изделий начинает превосходить температуру полного сгорания топлива, все топки должны работать, как полугазовые. Таким образом, топки должны обеспечивать возможность сжигания различного, меняющегося в широких пределах, количества топлива и по режиму работы приближаться к непрерывно действующим топкам. Кроме того, количество их должно быть минимальным, они должны легко регулироваться, быть просты и удобны при обслуживании.

Благодаря простоте конструкции и легкости обслуживания, в периодических печах наибольшее распространение получили простые колосниковые решетки с ручным обслуживанием. Однако эти топки обладают следующими недостатками:

1) вследствие периодической загрузки топлива режим работы их непостоянен и после большого возрастания температуры и

недостатка воздуха для горения начинается ее понижение с возрастанием избытка воздуха (вследствие прогара слоя топлива) и резкое падение, связанное с поступлением большого количества паразитного воздуха в момент загрузки топлива;

2) чистка топки сильно затруднена, особенно при спекающемся топливе и сопряжена с новым перебоем работы топки;

3) при полугазовом сжигании топлива толщина слоя топлива, а, следовательно, и производительность топки ограничивается сопротивлением слоя топлива, через который вследствие незначительного разрежения в полости топки воздух проходит с трудом и в недостаточном количестве.

Для повышения производительности колосниковых топок с ручным обслуживанием применяется искусственное дутье, улучшающее также полугазовое сжигание топлива. При искусственном дутье становится возможным использование местных видов топлива.

Значительно более рациональными являются полугазовые топки с наклонными ступенчатыми колосниками и перевод периодических печей на отопление газом.

Полугазовые топки, кроме ступенчатого наклонного колосника, снабжаются горизонтальными колосниками, на которых происходит горение основной массы топлива в первые два периода и выгорание шлака в третий период обжига. Загрузочная горловина топки должна быть рассчитана на максимальную загрузку топлива, которая в третий период обжига превосходит в 2 — 3 раза средний расход топлива. На ступеньках наклонных колосников образуются местные очаги горения, обеспечивающие подсушку и газификацию в толстом слое топлива. Расстояние между ступенями делается от 100 до 200 мм; ступени легко должны заменяться и не гнуться под весом горящего топлива. Между ступенчатой решеткой и горизонтальными колосниками оставляется расстояние 200 — 300 мм для удаления скапливающегося на горизонтальных колосниках шлака. Полугазовая топка углубляется ниже уровня пола на 1,5—2,0 м, что повышает гидростатический напор горячих газов (см. рис. 4) и нередко снабжается искусственным дутьем. Толщина слоя топлива при полугазовом процессе составляет от 0,7 до 1,3 м (для дров и торфа). Для того чтобы не происходило выбивания газов через загрузочное топливное отверстие, топка по возможности вдвигается в полость печи так, чтобы горизонтальная решетка находилась под вылетом газов в печь (см. рис. 4).

Вторичный воздух для дожигания полугаза, для наилучшего его перемешивания с газовым потоком вводится по ходу горячих газов из топки.

При газовом отоплении газ и воздух подаются симметрично со всех сторон печи, причем горелки устанавливаются против основания перевальной стенки. В первые периоды обжига горение газа должно заканчиваться в полости камеры, в которой установлена горелка, причем продукты горения разбавляются до требуемой температуры холодным воздухом, а в третий период горение газа частично переносится в полость печи.

В этих целях предусматривается широкая возможность регулирования газа и воздуха.

К газоотводящим устройствам периодической печи относятся подовые отверстия, подподовые каналы, образующие уравнительную камеру печи, и дымовой боров.

Так как неравномерное распределение температур по объему периодической печи вызывается главным образом неравномерным распределением количества газов, которые отсасываются подовой решеткой, распределение подовых отверстий и их сопротивление имеют очень большое значение. Как правило, гидравлическое сопротивление подовой решетки должно быть больше сопротивления подподовых каналов и дымового бора. Сопротивление садки в периодических печах обычно незначительно; тем не менее плотность садки по объему печи должна быть равномерной. Для равномерного отсоса газов через подовые отверстия применяется Т-образное расположение подподовых каналов (рис. 49). Для наиболее равномерного распределения температуры по высоте печи не допускается создание большого разрежения в полости печи; обычно на уровне подовой решетки разрежение поддерживается близким к ± 0 , в силу чего рабочая полость печи находится под некоторым (небольшим) давлением.

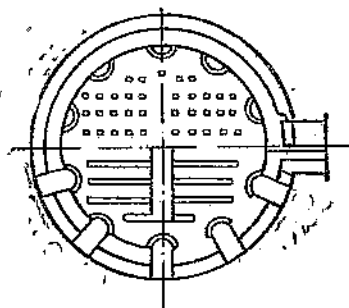


Рис. 49. Т-образное расположение подподовых каналов

Общая величина разрежения в периодических печах в первые периоды обжига не превышает 4—6 мм вод. ст., повышаясь до 10—15 мм вод. ст. в последний период. При этом сопротивление дымового бора составляет 2—3 мм вод. ст. Если сопротивление дымового бора составляет 50 проц. от общего сопротивления проходу газов, степень неравномерности газовых потоков доходит до 50 проц. и выше.

Дымовая труба устанавливается на одну печь или группу печей и рассчитывается по максимальному сопротивлению системы. Обычно высота ее не превосходит 45 м.

Способы садки изделий

Садка сырых изделий в периодических печах должна быть плотной, прочной и проницаемой для газов. Чем больше изделий помещается в 1 м³, тем больше производительность печи. В зависимости от формы и величины изделий, плотность садки, которая обычно выражается в кг на 1 м³ емкости печи, бывает различной. Так, например, на заводах „Красный керамик“ средняя плотность садки изделий при обжиге в периодических печах в 1938 г. составляла:

для нормального шамотового кирпича		850 — 950	кг/м ³
„ простых фасонных изделий		700 — 800	„
„ сложных		600 — 700	„
„ шамотовых стаканов и изоляционного кирпича		250 — 300	„

Приведенная плотность садки не является предельной и общей для всех печей и по мере развития стахановского движения непрерывно улучшается и возрастает.

Садка должна быть прочной и устойчивой, чтобы в процессе обжига не происходило завалов и разрушений. Для этой цели изделия кладутся вперевязку, причем правила перевязки должны в точности соблюдаться. Для того чтобы газы, опускаясь по камере печи, равномерно пронизывали всю массу обжигаемых изделий и омывали каждое из изделий со всех сторон, садка должна быть по всему сечению печи проницаемой для газов. При установке нижних рядов изделий, они не должны закрывать подовых отверстий и должны быть уложены по всей высоте печи таким образом, чтобы каждое из изделий по возможности равномерно омывалось газами. При слишком плотной садке удлиняется время прохождения газов через печь, газы остывают, что влечет за собой неравномерность температуры по высоте печи, недожог в сильно уплотненных местах и пережог в местах редкой садки.

При обжиге кирпича наиболее употребительными являются два вида садки: садка в „клетку“ и в „елку“.

При садке в клетку (рис. 50) три кирпича устанавливаются на ребро и перпендикулярно им на ребро устанавливаются три верхних кирпича, что обеспечивает хорошую проницаемость и в то же время устойчивую перевязку садки. Плотность при этом получается наибольшей и достигает 900—1000 кг/м³ емкости печи.

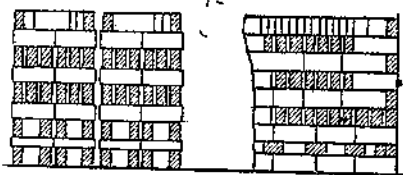


Рис. 50. Садка кирпича-сырца в клетку

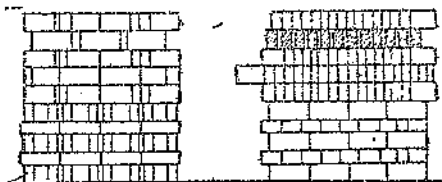


Рис. 51. Садка кирпича-сырца в елку

При садке в „елку“ сырой кирпич („сырец“) укладывается на ребро (рис. 51) под углом с промежутками 10—15 мм. На первый ряд устанавливается второй ряд кирпича, затем третий и так до самого верха печи. В вершине угла, образованного двумя кирпичами, образуется промежуток для прохода газов. Подобная садка кирпича является также достаточно прочной и проницаемой для газов; плотность ее несколько меньше, чем в предыдущем случае.

Во избежание спекания каждый ряд кирпича пересыпается молотым шамотом или не содержащим плавней песком.

Обжигаемые изделия загружаются и выгружаются из периодических печей вручную, что требует значительного расхода рабочих рук и является одним из основных недостатков периодических печей. Потребность в рабочей силе на загрузку и выгрузку изделий составляет от 3,5 до 6,0 человеко-часов на 1 т обожженных изделий. Вследствие соревнования, а также применения стахановских методов работы, правильной организации процессов загрузки и выгрузки изделий и механизации процессов на протяжении последних лет расход этот непрерывно уменьшается, достигая сокращения против прежних норм в 2 — 5 и более раз.

Расход топлива и способы использования тепла

Расход топлива на обжиг различных изделий в периодических печах выше, чем в других типах керамических печей и вызывается периодичностью работы печи и связанными с нею большими потерями тепла. Печи с восходящим (прямым) пламенем расходуют топлива больше, чем печи с обращенным потоком (горячим подом). Кроме того, обжиг высокоогнеупорных изделий, происходящий при более высоких температурах, требует больше топлива, чем обжиг шамотовых изделий. Сравнительный расход условного топлива в зависимости от рода обжигаемых изделий приведен в табл. 33.

Таблица 33

Конструкция периодической печи	Род обжигаемых изделий	Удельный расход условного топлива (в проц. от веса обжигаемых изделий)	Удельный расход тепла (в кал/кг)
Круглая печь с прямым пламенем	Шамотовый кирпич	30 — 35	2100 — 2450
Круглая печь с обратным пламенем	То же	20 — 28	1400 — 1900
То же	Фасонные шамотовые изделия	30 — 40	2100 — 2800
То же	Динасовые изделия	35 — 40	2450 — 2800
То же	Высокоогнеупорные материалы и изоляционный кирпич	35 — 75	2450 — 5250
То же	Магнезитовые изделия	50 — 60	3500 — 4200

Потери тепла периодическими печами складываются из потерь с отходящими из печи газами, которые составляют от 25 до 50 проц. и потерь на аккумуляцию тепла стенами и сводом печи, которые в зависимости от температуры обжига, плотности садки и размеров печи колеблются от 10 до 25 проц. Таким образом в сумме эти две потери составляют от 35 до 75 проц. от всего количества расходуемого печью тепла. Полезный расход тепла в периодических печах невелик; он склады-

вается из затраты тепла на испарение влаги, на нагрев обжигаемых изделий и на физико-химические реакции и составляет от 12 до 40 проц. от общего расхода тепла.

Температура отходящих из периодических печей газов сильно колеблется по периодам обжига и лишь не намного ниже температуры в печи. В первом периоде обжига температура отходящих газов в борове за печью составляет от 40° до 120°, а в последнем периоде доходит до 1200°.

Столь большие потери тепла с отходящими газами диктуют необходимость использования этого тепла в других установках. Однако, несмотря на очевидную целесообразность дальнейшего использования тепла, методы его использования до настоящего времени не получили большого распространения вследствие того, что при этом усложняется ведение и регулировка процесса обжига в печах.

В периодических печах имеют место следующие способы использования тепла:

1) соединение нескольких рядом стоящих печей в общий блок таким образом, что газы из каждой печи до удаления их в трубу проходят через одну или несколько других печей, обогревая находящиеся в них изделия;

2) установка регенераторов и рекуператоров для нагревания воздуха (или газа и воздуха);

3) использование тепла отходящих из печей газов и тепла горячего воздуха (в периоды охлаждения изделий) в сушилках, на отопление помещений или подача горячего воздуха в топку;

4) установка водяных экономайзеров и паровых котлов.

При блокировке печей под каждой из входящих в блок печей устраивается два борова, один из которых соединяет печь с дымовым бором, а другой соединяет ее с соседней печью, или же устраивается общий соединительный канал, позволяющий перевести газы только из одной печи в другую. Таким образом, тепло отходящих из одной печи газов, так же как и тепло горячего воздуха из одной печи, полностью используется в другой печи. Однако управление подобным блоком печей очень сложно, сильно возрастает общее протяжение соединительных боронов, усложняется их устройство и возрастают присосы воздуха через неплотности, что понижает температуру газов. Печи в блоке должны работать по графику, учитывающему продолжительность обжига различных изделий. Экономия топлива на обжиг при блокировке печей может составить от 15 проц. в начальные периоды обжига до 40 проц. в последний период обжига, увеличиваясь по мере уменьшения удельного расхода топлива.

Установка регенераторов и рекуператоров для подогрева воздуха производится для одной или для группы печей, причем горячий воздух используется в топках и в качестве вторичного воздуха — в печах. Установка рекуператоров производится чаще, чем регенераторов, так как рекуператоры проще в установке. Для этой цели применяется почти исключительно керамические рекуператоры, которые устанавливаются в общем дымовом бором, собирающем горячие газы со всех печей. Кроме того, всегда

устанавливается второй боров, отводящий холодные газы в первые периоды обжига (до 400°) непосредственно в дымовую трубу. При установке рекуператоров из стальных труб температура нагрева их не должна подниматься выше 400° и при установке чугунных — выше 600° . Экономия топлива на обжиг при подогреве идущего на горение воздуха в рекуператорах по сравнению с работой на холодном воздухе может составлять от 8 до 18 проц., повышаясь с повышением расхода топлива, особенно в последний период обжига.

Установка водяных экономайзеров и паровых котлов производится также на сборном дымовом борове при температуре отходящих газов в борове не ниже 300° — для экономайзеров и 500° — для котлов. При этом необходимо обеспечить подвод к котельной установке возможно более равномерного потока тепла. Конструкция экономайзеров и котлов мало отличается от обычной; котлы преимущественно устанавливаются с дымогарными трубками, что увеличивает их поверхность нагрева. При установке рекуператоров, экономайзеров и паровых котлов между ними и дымовой трубой ставится дымосос.

Основные размеры и характеристики работы

Конструкции и размеры периодических печей отличаются большим разнообразием и в каждой отрасли промышленности применяются свои установившиеся типы. Основные размеры топок, подовых отверстий и дымового борова, помимо непосредственных размеров, обычно выражаются в процентах от площади пода печи или в м^2 , приходящихся на 100 м^3 объема печи.

При обжиге огнеупорных изделий в небольших печах, емкостью до 100 м^3 , суммарная площадь колосниковых решеток действующих печей колеблется в пределах 4—8 м^2 на 100 м^3 печи, или от 9 до 14 проц. от площади пода. В печах емкостью до 200 м^3 суммарная площадь колосниковых решеток уменьшается, составляя от 4 до 6 м^2 на 100 м^3 объема печи, или от 8 до 12 проц. площади пода. В печах для обжига изделий санитарного фарфора и фаянса суммарная площадь решеток составляет от 3 до 6 м^2 на 100 м^3 емкости печи, при обжиге электротехнического фарфора — от 9 до 12 м^2 и при обжиге половых и стенных плиток — от 7 до 12 м^2 .

Основные размеры печей для обжига половых и стенных плиток, а также для обжига шамотовых изделий и фарфора и основные характеристики их работы приведены в табл. 34.

2. Камерные печи

Основные принципы работы

Камерные печи, к которым относятся печи Мендгейма, относятся к непрерывно действующим печам с подвижным источником тепла. Они представляют собой два параллельных ряда камер, разделенных огнеупорными стенками и соединенных между

Основные размеры и характеристики периодических печей

Таблица 34

Тип печи	Характеристика объектов	Температура обжигта (в °C)	Продолжительность обжигта (в час)	Плотность сажи (в кг/м³)	Вес изделий (в % от общей сажи)	Объем печи (в м³)	Диаметр печи (в м)	Высота от пола до рамки свода (в м)	Площадь пода (в м²)	Количество топок	Количество подовых отверстий	Площадь (в м²)				Площадь колосниковых решеток (в м² на 100 м³ печи)
												одног. подового	всех подовых	отверстий	общая колосниковых решеток	
Половые и стеновые плитки																
С нисходящим потоком	Бисквит	1280	41	503,5	42,6	59,3	4,27	4,57	14,31	8	24	0,0193	0,463	5,25	12,1	—
то же	Бисквит	1200	48	582	51,7	54,4	3,81	5,18	11,43	8	24	0,0162	0,39	4,24	7,71	—
"	Глазурован.	1300	15	357,6	26,2	59,3	4,27	4,57	14,31	8	24	0,0198	0,463	—	—	—
"	Однократный обжиг	1350	72	816,2	39,5	62,2	4,42	4,42	15,33	8	24	0,0129	0,51	4,8	8,72	—
"	Бисквит	1300	—	528,3	50,6	45,9	3,81	4,41	11,43	8	24	0,0129	0,310	5,95	12,83	—
"	Глазурован.	1280	—	432,9	26,1	72,5	4,72	4,57	17,56	8	24	0,0129	0,310	—	—	—
Санитарные изделия																
С восходящим потоком	Бисквит	1300	55	288,3	31,7	133,6	5,18	7,01	21,09	10	—	—	—	4,87	8,6	—
то же	Глазурован.	1230	51	298,3	29,7	133,6	5,18	7,01	21,09	10	—	—	—	4,87	8,6	—
Электротехнический фарфор																
С восходящим потоком	Однократный обжиг	1350	60	997,3	14,8	96,3	5,09	5,09	20,34	10	—	—	—	7,18	7,35	—
С восходящим и нисходящим потоками	"	1320	42	396,9	30,1	60,9	4,33	4,42	14,77	8	32	0,0103	0,33	5,9	9,60	—
Шамотовые и dinasовые изделия																
С нисходящим потоком	Шамот нормальный	1280	150	—	—	86,5	6,10	—	29,2	10	—	—	—	0,93	5,9	6,8
то же	Dinas нормальный	1480	363	—	—	406,0	11,6	—	103,4	8	—	—	—	2,7	15,4	3,8

собой каналами для прохода воздуха и горячих газов (рис. 52). По принципу работы каждую отдельную камеру можно сравнить с периодической печью, так как по мере передвижения огня камера нагревается и затем охлаждается. При соединении пе-

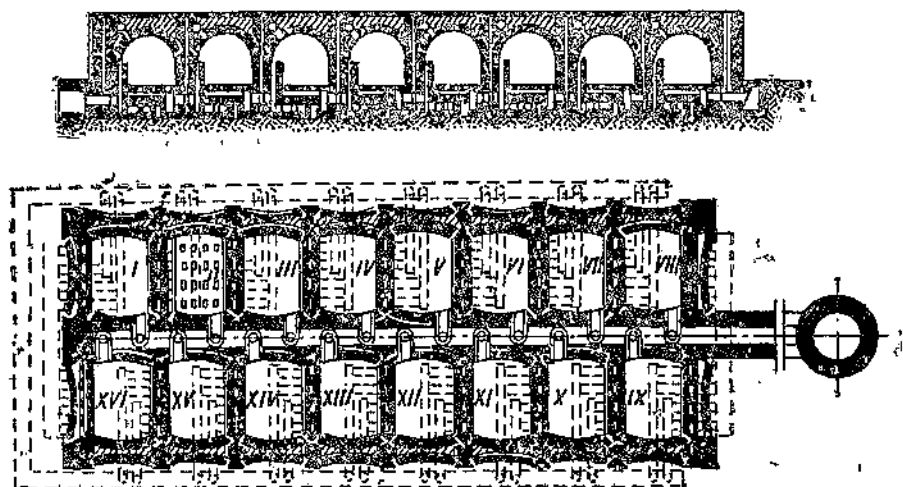


Рис. 52. Схема камерной печи

риодических печей в блок режим их работы более или менее соответствует работе камерной печи; однако, в камерных печах газоходы получаются более короткими и простыми по конструкции, и управление печью менее сложным, чем управление блоком периодических печей.

Принцип работы камерной печи заключается в следующем. Допустим, что обжиг изделий происходит в одной из камер, например в камере V. Горячие дымовые газы проходят из этой камеры в камеры, лежащие впереди ее, т. е. в камеры VI, VII и VIII, подогревают загруженные в них изделия и, охладившись, уходят в дымовой боров и дымовую трубу. Лежащие позади огня камеры IV, III и II находятся на остывании. Холодный воздух, поступая в крайние камеры, нагревается и частично проходит в находящуюся на огне камеру V, частично отбирается на сушку. По окончании обжига в камере V, огонь переносится в камеру VI, т. е. передвигается на одну камеру. Вслед за ним передвигается на одну камеру подогрев изделий и их охлаждение. Благодаря этому выгрузка изделий происходит из камеры III, а загрузка производится в камеру X.

При большом количестве камер печь работает „на два огня“, т. е. под обжигом находятся две далеко отстоящих друг от друга камеры, каждая из которых имеет впереди себя несколько камер подогрева, а позади — несколько камер остывания. Оба огня следуют друг за другом, постепенно обходя все камеры печи. Производительность печи при этом почти удваивается. В печах, имеющих больше 30 камер, обжиг ведется на три огня.

По направлению движения газов камерные печи подразделяются на печи с нисходящим газовым потоком, или с подовой канализацией, и печи с горизонтальным направлением газового потока или с канализацией в промежуточных стенах.

В печах с подовой канализацией газы из одной камеры переходят в другую через расположенные на поду камеры отверстия. Отвод охлажденных газов из последней камеры производится через те же подовые отверстия в сборный боров, расположенный ниже подовых отверстий; иногда отходящие газы отводятся через специальные каналы, устроенные в нижней части средней стены камеры (рис. 53).

В печах с канализацией в стенах газы проходят из одной камеры в другую через систему каналов, выложенных в разделяющих камеры стенах. Отвод отходящих газов в дымовой боров производится через специальные каналы, расположенные в средней стене камеры или через систему специальных каналов, расположенных на поду камеры и соединенных с дымовым боровом (рис. 54).

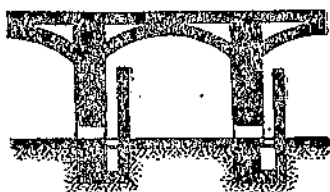


Рис. 53. Схема камерной печи с канализацией в нижней части стен

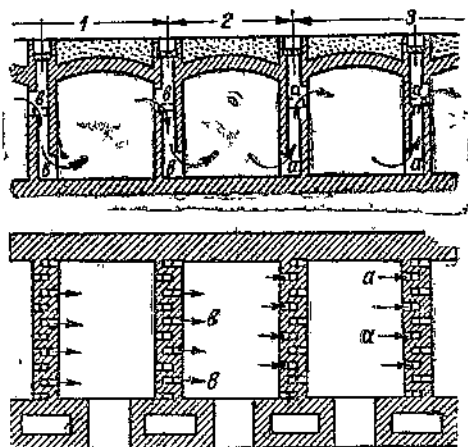


Рис. 54. Схемы камерной печи с канализацией в стенах

1—зона остывания, 2—зона обжига, 3—зона подогрева

В печах с подовой канализацией распределение температур по высоте камеры достаточно равномерное; при этом, однако, подовые отверстия и подподовые каналы сравнительно быстро разрушаются и требуют частого ремонта, так как температура газов, отходящих из камеры, которая находится под огнем, очень велика. Этот тип печей особенно удобен при сравнительно низких температурах обжига ($1100 - 1250^{\circ}$). При высоких температурах обжига изделий (например, при обжиге динаса или магнезита) употребляются печи с канализацией в стенах, так как неравномерность прогрева изделий по высоте камеры в период большого огня выравнивается.

Если в период нагревания и обжига изделий в камерных печах температура по высоте камеры распределяется достаточно равномерно, то в период остывания холодный воздух всегда остается на поду камеры, а горячий собирается в верхней ее части, что приводит к неравномерному остыванию изделий по

высоте камеры. Это обстоятельство является одним из основных недостатков камерных печей. Для устранения указанного недостатка проф. В. Е. Грум-Гржимайло была предложена камерная печь, в которой движение воздуха, охлаждающего изделия, происходит снизу вверх, а движение нагревающего изделия горячих газов — сверху вниз. Однако конструкция такой печи довольно сложна и большого распространения не получила.

Камерные печи обычно отапливаются генераторным газом, почему они и называются газокамерными печами.

В газокамерных печах преимущественно обжигаются изделия, требующие весьма равномерной температуры обжига по всей высоте камеры, а также изделия с высокой температурой обжига (динас, магнезит). Расход топлива в газокамерных печах меньше, чем в периодических. Количество камер различно и колеблется от 12 до 32 и выше.

Основные элементы газокамерных печей

Основными элементами газокамерных печей являются:

- 1) камера,
- 2) газоподводящие и газоотводящие каналы и
- 3) сборный дымовой боров и дымовая труба.

Емкость одной камеры в газокамерных печах различна и колеблется от 14,0 до 40,0 м³. Глубина (длина) камеры составляет от 4,0 до 6,0 м, ширина — от 2 до 2,5 м при одностороннем подводе газа и до 4,5 м при подводе газа с двух противоположных сторон; высота камеры от 2,0 до 3,0 м.

При обжиге магнезитовых изделий высота камеры не превосходит 2,0 м, так как садка магнезита по высоте незначительна.

В своде камеры оставляется одно или несколько отверстий для отвода горячего воздуха в период охлаждения. Отверстия закрываются шамотовыми задвижками.

В нижней части камеры, со стороны входа газов, из шамота выкладывается перевальная стенка на высоту около половины камеры. Стены камеры рассчитываются на прочность с учетом каналов, если печь со стенной канализацией. Внутренняя часть стен и свода выкладывается из шамота или динаса; толщина наружных стен доходит до 1 м и более. С наружной стороны каждая камера имеет садиво, которое подобно садиву периодических печей герметически закладывается после загрузки. С наружной стороны все камеры обвязываются каркасом, состоящим из швеллерных балок и железных тяг, которые в процессе работы печи могут быть натянуты и ослаблены. Над сводом обычно выстилается слой засыпки из шлака, шамота или инфиузориной земли.

Камеры располагаются по обе стороны сборного дымового борова, который делит печь на две симметричные части.

Генераторный газ подводится по двум основным каналам, расположенным в грунте по обе стороны камер, с наружной их стороны. Эти каналы соединяются с газоподводящими каналами каждой камеры. Впуск газа в газоподводящие каналы осуществляется при помощи специального шибера или конуса, подъем

которого должен плавно регулироваться. Конус или шибер должен плотно закрывать газоподводящий канал, во избежание прохода газа в камеру. Из газоподводящих каналов газ подводится по стоякам, расположенным в стенах, с одной, или с двух сторон камеры. Если имеется перевальная стенка, газ подводится под стенку и смешивается с поступающим из соседней камеры горячим воздухом. В печах с канализацией в стенах газовые влеты (отверстия) чередуются с воздушными отверстиями или же газ смешивается с воздухом перед вылетом в камеру.

Горячий воздух и продукты горения в печах с подовой канализацией проходят через отверстия в поду камеры, собираются подподовыми каналами и через ряд отверстий, расположенных в фундаментах промежуточных стенок, переходят в соседнюю камеру у подножья перевальной стенки.

В печах с канализацией в стенах продукты горения удаляются из камеры через отверстия в нижней части стены, поступают в расположенный в стене канал и вылетают из него в соседнюю камеру также через ряд отверстий, расположенных как в верхней, так и в нижней части стены. Скорость влета газа в камеру всегда должна быть подобрана таким образом, чтобы камера была по всей ширине заполнена пламенным потоком. Как и в периодических печах, выравнивание температур по высоте газокамерной печи достигается регулированием сопротивлений отдельных элементов газопроводящей системы. При этом сопротивление подовой решетки, т. е. суммарное сопротивление отверстий, расположенных на поду печи (в печах с подовой канализацией) должно значительно превышать сопротивление подподовых каналов и дымового боровца. Продукты горения и отходящие из камеры газы должны с большими скоростями проходить через подовые отверстия и сравнительно медленно — по подподовым каналам и дымовому борцову. Обычно газоотводящие подподовые каналы непосредственно соединяются с расположенным центрально дымовым борцовым и отключаются от последнего при помощи дымовых конусов или задвижек, открытие которых должно плавно регулироваться. В печах с канализацией в стенах отходящие из камеры газы проходят через отверстия в нижней части стен в дымовые каналы, расположенные под подом печи и соединенные с центральным дымовым борцовым. Сопротивление стенных отверстий всегда меньше сопротивления подовой решетки, в силу чего общая сумма сопротивлений в печах с канализацией в стенах меньше, чем в печах с подовой канализацией.

Для того чтобы возможно было нормально вести продолжительный обжиг изделий, в печах с подовой канализацией в начале зоны нагревания необходимо иметь разрежение в 15 — 20 мм вод. ст., так как сопротивление одной камеры составляет от 1,5 до 2,5 мм вод. ст. В печах с канализацией в стенах достаточно разрежения в 5 — 10 мм вод. ст., так как сопротивление одной камеры составляет от 0,5 до 1,0 мм вод. ст. Разрежение в 25 мм вод. ст. практически трудно осуществимо и приводит к большим засосам паразитного воздуха.

Режим обжига и расход топлива

Продолжительность процесса обжига в газокамерной печи зависит от длины зоны нагревания, т. е. от количества камер, расположенных впереди камеры, находящейся под газом (впереди огня). Чем больше камер находится под зоной нагревания, тем больше продолжительность обжига при заданной производительности печи. Производительность печи зависит от продолжительности оборота печи в месяц, которая в свою очередь зависит от времени нахождения камеры обжига под газом. Чем меньше времени камера обжига находится под газом, тем скорее переключается на газ следующая камера, тем быстрее передвигается огонь по печи или, как принято говорить, „тем больше скорость огня“. При эксплуатации газокамерных печей длина зоны нагревания ограничивается большой аккумуляцией тепла стенами и подом камеры и большими гидравлическими сопротивлениями движению газов, в силу чего редко удается держать под нагреванием больше трех камер. Уже при этом температура газов, отходящих из третьей (считая от огня) камеры, незначительна и не превосходит в момент включения камеры на дым 50 — 100°, повышаясь к концу обжига до 100 — 200°. Распределение температур по остальным камерам нагревания видно из табл. 35, которая составлена на основании замеров температур в камерах нагревания при обжиге динаса.

Таблица 35
Распределение температур газокамерной печи с подовой канализацией при обжиге динаса

Ка м е р ы	Температура в момент перехода первой ка- меры на газ	Температура в момент выключения первой камеры и включения следующей камеры на газ
Камера обжига	1000 — 1100°	1400 — 1475°
Первая камера зоны нагревания, счи- тая от камеры обжига	400 — 550°	1000 — 1100°
Вторая камера зоны нагревания . .	100 — 200°	400 — 550°
Третья камера зоны нагревания . . .	50 — 100°	100 — 200°

В печах с канализацией в промежуточных стенах количество камер, находящихся на нагревании, выше и составляет от 5 до 6 камер, так как отходящие газы меньше охлаждаются и гидравлические сопротивления при проходе газов ниже.

Ввиду того, что в этом случае подогрев изделий осуществляется дольше, чем в печах с подовой канализацией, продолжительность нахождения камеры под газом меньше и оборачиваемость печи в месяц выше. Так, если при обжиге шамотовых изделий продолжительность нахождения камеры под газом в печах с подовой канализацией составляет около 25 часов и продолжительность одного оборота 16-камерной печи около 16

суток, то в печи тех же размеров с канализацией в стенах продолжительность нахождения камеры под газом сокращается примерно до 17 часов и продолжительность одного оборота печи понижается приблизительно до 11 суток, т. е. в первом случае печь оборачивается около 2 раз в месяц, а во втором — около 3 раз.

Таким образом, газокамерные печи с канализацией в стенах могут дать большую производительность, чем печи с подовой канализацией; при этом, однако, температура по высоте камеры распределяется менее равномерно, что приводит к неравномерному обжигу изделий. Для повышения производительности печей с подовой канализацией стремятся к уменьшению сопротивлений для прохода газов и повышают разрежение за печью путем установки дымососа.

Разнообразие обжигаемых в газокамерных печах изделий и большие колебания в режиме обжига обуславливают значительные колебания в расходе топлива на обжиг одних и тех же изделий. В печах с канализацией в стенах расход топлива обычно ниже, чем в печах с подовой канализацией.

Нормальным расходом генераторного газа, пересчитанным на условное топливо, можно считать:

для шамотового фасона	12%	или 840 кал/кг
„ динаса	15—19%	или 1050—1330 „
„ канализационных труб	20% или 1400	„

Расход твердого условного топлива, часть которого сгорает в газогенераторе и теряется, выше указанных величин приблизительно на 30 проц.

Таким образом, расход топлива на обжиге изделий в газокамерных печах несколько ниже, чем в печах периодических, но все же значителен, особенно при ненормальной работе печей.

Значительный расход топлива в газокамерных печах объясняется наличием больших потерь тепла при обжиге. Наибольшие потери тепла относятся к потерям с отходящими из печи газами, составляющим от 30 до 45 проц. от общего расхода тепла, и потерям через кладку, составляющим от 18 до 30 проц. К полезному расходу тепла следует причислить расход на нагревание воздуха. Большие потери тепла с отходящими газами объясняются большими присосами воздуха через неплотности в стенах и каналах, по которым проходят газы. Чем больше создаваемое дымовой трубой разрежение, тем значительнее присосы паразитного воздуха; поэтому при установке дымососа необходимо уплотнять все зазоры по пути движения газов.

Регулирование режима обжига производится при помощи клапанов или конусов, открываемых на различную высоту для выпуска продуктов горения в дымовой боров. При этом всегда стремятся к тому, чтобы продукты горения удалялись при возможно более низких температурах, во избежание больших потерь с отходящими газами. Регулирование режима остывания изделий достигается при помощи воздуха, избыточное количество которого выпускается наружу или отводится на сторону для целей сушки.

3. Кольцевые печи

Основные принципы работы

Кольцевые печи, так же как и газокамерные, относятся к непрерывно действующим печам с подвижным источником тепла. Наибольшее распространение среди этого типа печей получили печи Гофмана, которые в недалеком прошлом были единственными печами непрерывного действия для обжига изделий огнеупорной керамики.

Гофманские печи представляют собой замкнутый кольцевой канал, условно подразделяемый на камеры. Каждая камера гофманской печи имеет одно садиво, 4—5 рядов отверстий для загрузки топлива и 1—2 отверстия для выхода продуктов горения. Камеры не отделяются одна от другой стенками, и поэтому кольцевой канал может быть только условно подразделен на камеры. Обычно за длину камеры принимается расстояние между осями двух садив. Топливо подается в камеры через отверстия, расположенные в своде печи, и горит среди изделий. Отверстия для заброски (топливные трубочки) после заброса топлива закрываются крышками.

Схема работы гофманской печи представлена на рис. 55.

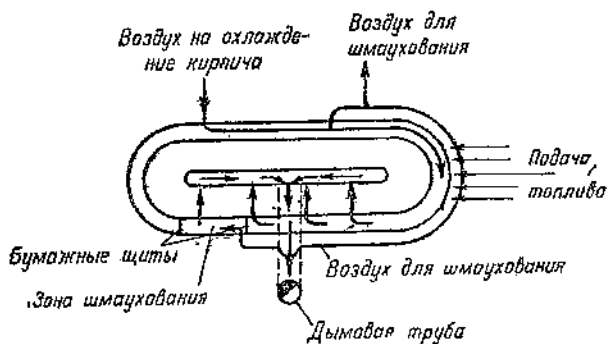


Рис. 55. Схема работы гофманской печи

Обжигаемые изделия, например строительный красный кирпич, заполняет 14—20 камер гофманской печи. В средние камеры через топливные трубочки забрасывается топливо и горит среди кирпича. Продукты горения проходят в расположенные впереди огня камеры, отдают свое тепло находящемуся в них кирпичу, охлаждаются, и при температуре 150—300° удаляются в дымовую трубу. Воздух поступает в задние камеры с обожженным кирпичом, охлаждает кирпич и, нагреваясь, проходит в зону огня.

Так как количество воздуха, расходуемого для охлаждения кирпича, значительно превышает количество, необходимое для сжигания топлива, часть его отбирается в особый канал, называемый смаух-каналом, огибает камеры огня и подогрева и подается в самые передние камеры для подогрева и для просушки загруженного в них кирпича-сырца. Эти камеры носят название

камер шмаухования. Нагретый в зоне охлаждения печи до 200—300° воздух отдает свое тепло кирпичу-сырцу, остывает и при температуре 100—120° отводится в дымовой боров, где смешивается с охладившимися дымовыми газами и уходит в дымовую трубу. По мере обжига кирпича в зоне огня или, как ее называют, в зоне „взвара“, топливо забрасывается в следующие по ходу газов рядки топливных трубочек, на шмаух-процесс включается следующая камера, а из остывшей камеры в зоне охлаждения производится выгрузка обожженного и остуженного кирпича.

Таким образом, с одной стороны, весьма полно используется теплота продуктов горения, и с другой — хорошо используется теплота нагретых изделий, воспринимаемая воздухом, который, с одной стороны, отдает это тепло на горение, повышая тем самым теплосодержание продуктов горения, а с другой стороны ускоряет процесс досушки изделий, передавая тепло кирпичу-сырцу. Благодаря такому полному использованию тепла, гофманские печи расходуют на обжиг меньше топлива, чем периодические и газокамерные печи.

В указанной схеме работы гофманской печи камеры, находящиеся на загрузке, расположены впереди камер шмаухования и, естественно, воздух, врывающийся через садиво, расположенное в боковой части кладки печи, стремится проникнуть в камеры шмаухования. Во избежание этого передняя камера шмаухования отделяется от загрузочной камеры щитами с наклеенной на них плотной бумагой, которая при передвижке огня прорывается крючьями через топливные трубочки или прожигается. Иногда бумажные листы просто прикладываются к садке кирпича и плотно прижимаются к ней благодаря разрежению в шмаух-камере.

Бумажные щиты должны плотно закрывать все сечение кольцевого (обжигательного) канала во избежание присосов пара-зитного воздуха, понижающих температуру шмаух-воздуха и приводящих к увеличению потерь с отходящими из печи газами. Отвод продуктов горения производится через специальные отверстия — фуксы (дымовые очелки), расположенные на уровне пода подового канала и соединенные с дымовым бором при помощи подъемных конусов. Идущий на шмаухование воздух поступает в специальный шмаух-канал, который собирает его из любой камеры зоны остывания и передает в любую камеру зоны подогрева.

В гофманских печах с количеством камер, превышающим 30, обжиг ведется на два огня. В этом случае топливо засыпается в двух местах, отстоящих друг от друга на расстоянии 14—16 камер, печь имеет по две зоны взвара, подогрева и охлаждения и оба огня перемещаются, не догоняя друг друга. При этом производительность печи почти удваивается.

Много общего с гофманской печью имеет печь Бюрера, так называемая „Зиг-заг“ (рис. 56). Эта печь имеет вытянутое четырехугольное сечение, причем камеры разделены в ней поперечными стенками, не достигающими до противоположной стены

канала и образующими зигзагообразный путь для прохода газов. Длина камеры колеблется в пределах 6—8 м, высота — 2,0—2,2 м и ширина — 2,4—3,0 м, при общем количестве камер от 22 до 36. Печи „Зиг-заг“ занимают несколько меньшую площадь по сравнению с гофманскими печами и удобнее их в смысле загрузки и выгрузки кирпича, однако, конструкция их сложнее и общая стоимость выше. Печи „Зиг-заг“ имеют значительно меньшее распространение, чем гофманские печи.

В гофманских печах можно обжигать кусковые материалы, например гипс, известь, роман-цемент, которые садятся в печь кусками, размерами от 200×200 мм до 400×400 мм. При обжиге

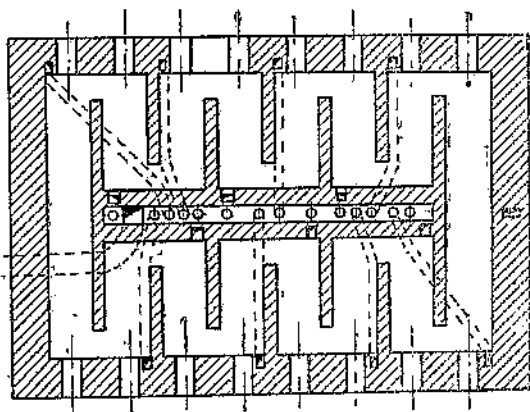


Рис. 56. Схема печи системы Бюрера („Зиг-заг“)

огнеупорных изделий и изделий строительной керамики в гофманских печах обычно обжигают изделия массового производства, не требующие соблюдения особо точного режима обжига и высоких температур при обжиге, как например, строительный и шамотовый кирпич, черепицу, а также огнеупорные изделия среднего веса и несложной формы. Сложные фасонные изделия, а также изделия, требующие высоких температур обжига (динас, магнезит), обжигаются преимущественно в периодических и камерных, а в последнее время — в туннельных печах.

Основные элементы гофманских печей

Основными элементами гофманских печей являются:

- 1) обжигательный канал,
- 2) каналы, отводящие газы,
- 3) каналы разводящие воздух,
- 4) топливоподающие и регулирующие приспособления,
- 5) дымовая труба.

Обжигательный канал гофманской печи (рис. 57) выкладывается из красного кирпича и при высокотемпературном обжиге футеруется изнутри шамотовым кирпичем. Высота канала не превосходит 2,7—3,0 м. Более высокие каналы не выкладываются, так как это осложняет загрузку и выгрузку изделий и вызывает опасность раздавливания нижних рядов садки. Ширина канала колеблется от 3,5 до 4,5 м. Свод выполняется обычно полуциркульным. Площадь сечения канала с таким сводом определяется по формуле:

$$F = b \left(h - \frac{b}{2} \right) + \pi \frac{b^2}{8} \text{ м}^2$$

где: b — ширина канала (в м),

h — высота канала (в м).

Длина обжигательного канала колеблется от 60 до 200 м. При длине канала большей 150 м печь работает на два огня.

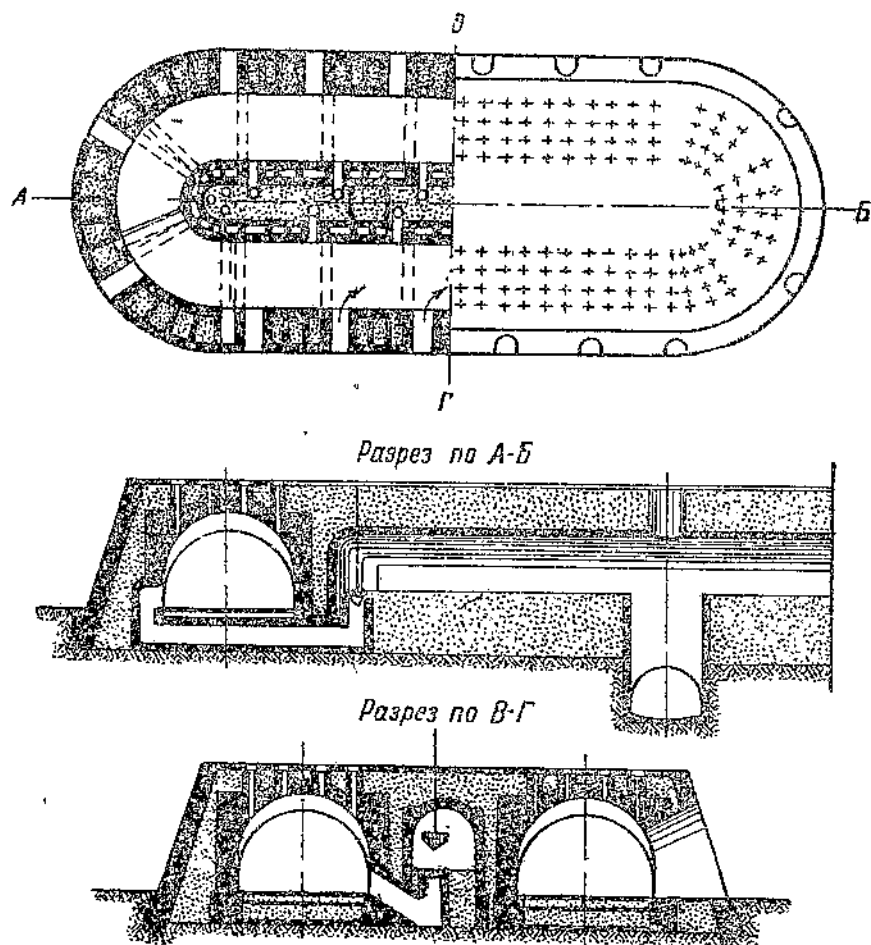


Рис. 57. План и разрезы гофманской печи

Стены обжигательного канала выкладываются из красного кирпича, толщина их колеблется от 1,5 до 2,0 м, в силу чего объем обжигательного канала составляет 25—40 проц. от объема печи по наружному ее обмеру.

Длина одной камеры обычно обуславливается системой садки изделий; так, при обжиге красного кирпича длина камеры составляет 5,2 м, исходя из кратности длины сажаемого в печь

кирпича-сырца, равной 0,26 м. В одной камере при этом сажается 20 рядов кирпича или при садке в елку — 5 садок кирпича. Под обжигательного канала выравнивается и выстилается щебнем и песком. Садива устраиваются в боковых стенах канала по одному на каждую камеру и после садки изделий тщательно заделываются и промазываются глиной, как и садива периодических и газокамерных печей.

В своде обжигательного канала оставляются четырехугольные отверстия для топливных трубочек. В верхней части отверстий вставляются круглые чугунные патрубки, закрывающиеся крышкой, снабженной петлей, за которую поднимается крышка при загрузке топлива в печь. Диаметр отверстий топливных трубочек колеблется от 150 до 200 мм. В зависимости от ширины обжигательного канала поперек его располагается от 4 до 6 трубочек, расстояние между центрами трубочек составляет от 0,8 до 0,9 м. По длине печи расстояние между центрами трубочек колеблется от 0,9 до 1,5 м. Каждая камера имеет от 15 до 40 топливных трубочек. На закругленных частях канала трубочки, идущие вдоль наружной стенки, располагаются нормально, а идущие вдоль внутренней стенки — через один ряд.

Над печью обычно устраивается шатер, в верхней части которого располагаются фонари с открывающимися окнами. Против каждого садива печи оставляются двери для загрузки изделий в печь.

Для отвода продуктов горения из печи служат фуксы, подподовые боровки, дымовой канал и дымовой боров. В зависимости от размеров камеры предусматривают один или два фукса размерами от 0,5 до 0,8 м как по ширине, так и по высоте. При двух фуксах один располагается в наружной стене печи, другой — во внутренней; если фукс один, он всегда располагается во внутренней стене, так как такое расположение уменьшает длину пути, проходимого отходящими из камеры газами, а следовательно, уменьшает сопротивление проходу газов. На закругленных частях печи фуксы располагаются всегда в наружной стене печи.

Из фуксов продукты горения отводятся подподовыми боровками в дымовой канал. Подподовые боровки должны быть достаточного сечения во избежание больших сопротивлений при проходе газов, должны быть легко доступны для очистки и ремонта и не должны заливаться грунтовыми водами. Из фуксов, расположенных во внутренней стене печи, подподовые боровки делаются с наклоном к дымовому конусу, чтобы предохранить последний от воздействия пламени, если почему либо конус будет открыт в зоне высоких температур. Из подподового боровка продукты горения поступают в сборный дымовой канал через отверстия, закрываемые дымовыми конусами.

Дымовой канал служит для отвода из камер продуктов горения и шмаух-воздуха. Он располагается обычно во внутренней стене обжигательного канала, параллельно его длинной стороне. Размеры дымового канала зависят от размеров печи

и колеблются от 1,0 до 2,0 м как по ширине, так и по высоте дымового борова. Стены канала толщиной в 1,5 — 2,0 кирпича не связаны с общей кладкой печи и между ними и кирпичной кладкой обжигательного канала делается засыпка, толщиной 400 — 500 мм, сквозь которую проходят столбы, подпирающие крышу печного здания. Для осмотра и чистки дымового канала в своде его оставляются лазы, которые тщательно герметизируются. Дымовой канал обычно расположен выше уровня пода печи и соединен с дымовой трубой дымовым боровом, идущим из средней части канала вниз под подом печи. Дымовая труба обычно располагается сбоку печи. Дымовой боров отделяется от дымовой трубы железной заслонкой — шибером, который должен плавно подниматься и опускаться для регулирования создаваемого дымовой трубой разрежения.

Общая схема распределения воздуха в гофманской печи состоит в том, что излишний воздух из остывающих камер отбирается в воздушный (жаровой) канал, по которому направляется в камеры шмаухования. При этом отбор и распределение воздуха выполняются различными способами. В печах старых конструкций, которых до настоящего времени еще много находится в эксплуатации, отбор воздуха из находящихся на остывании камер производится при помощи жаровых очелков, представляющих собой 2 или 4 отверстия, расположенных в нижней и верхней части камеры. Эти отверстия соединяются с жаровым каналом при помощи жаровых конусов. Открывая жаровой конус, соединяют жаровой канал с остывшей камерой с одной стороны и с камерой, находящейся на шмаухе, с другой. Так как при этом досушка сырых изделий происходит главным образом против жаровых очелков, подобное устройство нецелесообразно и в последнее время заменяется так называемой „рассыпной“ системой.

Рассыпная система заключается в том, что внутри кладки свода обжигательного канала, параллельно поперечным рядам топливных трубочек, располагаются жаровые каналы небольшого сечения, соединенные при помощи ответвлений с топливными трубочками. Каждый жаровой канал разделен продольной стенкой на две половины и соединяется с двумя поперечными рядами топливных трубочек и с жаровым конусом. При открытии конуса горячий воздух устремляется из топливных трубочек через жаровые каналы в сборный жаровой канал и передается в камеры шмаухования по их жаровым каналчикам через топливные трубочки этих камер. Преимущество рассыпной системы перед очелочной заключается в более равномерном распределении горячего воздуха; недостаток этой системы — неравномерная сушка изделий по высоте садки, так как горячий воздух поступает сверху вниз и более интенсивно сушит верхнюю часть садки, чем нижнюю часть ее, куда он проходит уже остывшим и насыщенным водяными парами.

Наконец встречается передача воздуха из камер остывания в шмаух-камеры при помощи железных коробов, которыми перекрываются поперечные ряды трубочек как в камерах остыва-

ния, так и в шмаух-камерах. Этот способ аналогичен рассыпной системе, но мало удобен в эксплуатации и страдает недостатками рассыпной системы.

Сборный жаровой канал, передающий горячий воздух из камер остывания в шмаух-камеры, не сообщается с наружным воздухом и располагается или над дымовым каналом посреди внутренних стен обжигательного канала, или в верхней части наружных его стен. В первом случае он называется центральным, во втором — кольцевым. Центральный канал обычно разделяется продольной стенкой, не доходящей до концов канала на 1,5—2,0 м. Назначение стенки — равномерно распределить воздух, если камеры остывания находятся против шмаух-камер, так как может быть такое положение, что камера, заполненная наиболее влажными изделиями, находится прямо против камеры с наиболее нагретым воздухом. Сборный жаровой канал имеет размеры от 0,8 до 1,5 м по ширине и высоте и не должен создавать больших сопротивлений при проходе воздуха.

Регулирующими приспособлениями гофманской печи являются дымовые и жаровые конусы.

Дымовой конус служит для разобщения фуксов с дымовым каналом. Он состоит из чугунного конуса с диаметром основания 0,4—0,8 м, который плотно закрывает своей верхней частью отверстие в поде дымового канала. Герметичность достигается тем, что чугунные ребра основания конуса входят в кольцевой канал чугунного седла, которое снабжено внутренним ребром. Промежуток между ребром седла и кирпичной кладкой, в которую вмуровано ребро, заполняется песком. Конус может плавно подыматься и опускаться при помощи железных штанг, выведенных через свод обжигательного канала. Штанги или подымаются от руки или имеют винтовую резьбу и подымаются вращением маховичка. Последнее обеспечивает легкое обслуживание и плавную регулировку.

Жаровые конусы представляют собой чугунные крышки с кольцами, за которые они подымаются при помощи железных штанг.

Таким образом управление как газовой, так и воздушной сетью печи производится снаружи и легко поддается регулировке.

Дымовая труба гофманской печи имеет обычно большую высоту (до 70 м) вследствие низкой температуры отходящих газов, разбавленных шмаух-воздухом. В эксплуатационных условиях температура отходящих газов колеблется от 70 до 150°; поэтому в жаркие летние дни создаваемое дымовой трубой разрежение невелико и с трудом обеспечивает нормальную работу печи. Для увеличения разрежения в цоколе трубы устраивают подтопок, в котором сжигают небольшое количество топлива, повышая тем самым температуру газов в трубе. Более рациональным средством является установка дымососа. Мощность дымососа определяется из полного количества газов с 20-проц. запасом, разрежение — от 20 до 40 мм вод. ст. При установке дымососа производительность печи значительно воз-

растает; при этом, однако, возрастают и присосы холодного воздуха, почему все неплотности в этом случае должны быть тщательно устранены.

Способы садки изделий

Способы садки изделий в гофманской печи весьма разнообразны и от них в значительной мере зависит качество обжига. В общем виде при садке кирпича необходимо выложить дымовые каналы, оставить отверстия для прохода горячих продуктов горения и осуществить топку для сжигания топлива.

Подовые каналы для прохода горячих газов и воздуха осуществляются при помощи козелков или ножек, представляющих собой столбики кирпича, составленные из двух-трех штук кирпича-сырца, поставленных на ребро и перекрытых перпендикулярно поставленными кирпичами. Промежутки между ножками оставляются в полкирпича и образуют прямолинейные подовые каналы для прохода газов вдоль печи. Против фуксов между ножками делается разрыв, образующий поперечные каналы для проходов газов в фуксы. Высота ножек определяется родом топлива, на котором производится обжиг кирпича. Если употребляется высококалорийное и малозольное топливо, то при достаточном разрежении в печи высота ножек не превосходит длины кирпича, т. е. 250—260 мм; при многозольном и местном топливе (подмосковный уголь, горючие сланцы, фрезерный торф) высота ножек доходит до 6—7 кирпичей. В этом случае подовые каналы являются своего рода зольником, который должен вместить золу топлива, не затрудняя при этом движения газов и воздуха.

Ножки перекрываются кирпичом-сырцом хорошего качества, образующим основание для всей садки, или, как обычно называют, основание для ёлки. При кладке в ёлку кирпич укладывается под углом к оси обжигательного канала печи, причем второй ряд кирпича укладывается под углом в противоположную сторону по отношению к первому ряду. Таким образом до самого верха печи кирпичи лежат крест-накрест.

Садка кирпича под топливными трубочками резко отличается от описанной и зависит от рода применяемого топлива. Она должна быть выложена таким образом, чтобы образовалась максимальная площадь решетки для сжигания топлива, причем забрасываемое топливо должно распределяться по высоте садки, и взварщик должен иметь возможность через топливную трубочку следить по всей высоте садки за состоянием огня. При применении мелкого топлива применяется садка более частая, чем при крупном топливе; кроме того, путь при падении мелкого топлива должен быть зигзагообразным, что особенно успешно достигается при так называемой немецкой системе садки. При этой системе садки топливная ёлка по всей ширине печи образует как бы клетку, каждый вертикальный ряд которой перпендикулярен соседним рядам, и крайние кирпичи, выступая друг из-под друга на $\frac{1}{4}$ кирпича, образуют как бы ступеньки

(рис. 58). При сжигании крупного кускового топлива применяется стыковая садка, значительно более редкая, чем садка по немецкой системе. При сжигании антрацитового штыба применяется плотная украинская садка, при которой выкладываются специальные колосники и часть кирпичей сильно сканивается по отношению к оси печи. Наконец при обжиге кирпича на дровах применяется колодезная садка кирпича, при которой под топливными трубочками оставляются вертикальные колодцы (шахты), размерами 260×260 мм; остальная садка выполняется в ёлку.

Садка кирпича производится через садива. При этом влажность кирпича-сырца составляет в среднем 9—10 проц.; влажный кирпич садится в верхнюю часть садки. Подача кирпича в печь должна быть равномерной и загрузка и выгрузка не должны отставать от хода огня в печи. Ручной способ подачи кирпича в печь и вывоза кирпича, а также способ садки кирпича подверглись значительному усовершенствованию и изменению за истекшие два года стахановской работы садчиков, и скорость садки и высадки кирпича неуклонно возрастает.

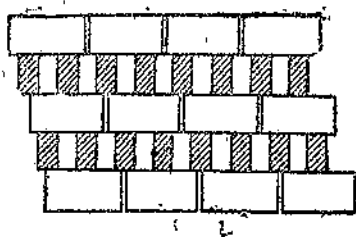


Рис. 8. Немецкая садка кирпича-сырца

Садка изделий в гофманской печи должна быть плотной, прочной, проницаемой для газов и простой в выполнении. При обжиге кирпича плотностью садки называется количество кирпича-сырца в штуках, укладываемого в 1 м^3 объема обжигательного канала; это количество колеблется от 230 до 310 штук кирпича на 1 м^3 , что соответствует от 50 до 67 проц. по отношению к полному заполнению объема обжигательного канала.

От плотности садки зависит оборачиваемость печи в месяц и, как следствие, продолжительность обжига кирпича. Отраслевой конференцией, происходившей в 1936 году, была установлена минимальная производительность печи в 1150 штук красного кирпича на 1 м^3 обжигательного канала в месяц. При плотности садки 230 шт./ м^3 оборачиваемость печи в месяц составляет $1150 : 230 = 5,0$ оборотов и продолжительность обжига соответственно $30 : 5 = 6$ суток. При увеличении плотности садки до 300 шт./ м^3 , достигаемой в 1939 г., оборачиваемость печи составляет 3,83 оборота в месяц и продолжительность обжига возрастает до 7,85 суток.

При продолжительности обжига 6—7 суток, производительность печей поднялась до 1200—1300 штук кирпича в месяц на 1 м^3 обжигательного канала, достигая в отдельных случаях 1700 штук. Стахановские методы работы, обеспечивающие указанную производительность, являются следствием правильной загрузки топлива, тщательного ведения режима обжига, тщательного наблюдения за механическим состоянием печи, быстрой и правильной садки и высадки кирпича, а также усиления тяги благодаря установке дымососа.

Сжигание топлива и режим обжига

В гофманских печах употребляются всевозможные виды топлива, причем очень широкое применение получили местные топлива. Как уже указывалось (см. раздел „Топливо и его сжигание“ и предыдущий раздел „Способы садки изделий“), для каждого вида топлива применяется специальная садка под топливными трубочками, образующая подобие топки, по своей конструкции отвечающей специфическим особенностям сжигания данного вида топлива. При мелкокусковых, высокозольных топливах садка должна образовывать ряд ступенчатых колосников, а высокие ножки должны образовывать своего рода зольник. При сжигании крупнокусковых топлив садка должна образовывать ряд достаточно развитых колосниковых решеток.

Сжигание генераторного или естественного газа производится путем его ввода в топливный колодезь по вертикально установленной шамотовой трубе, снабженной по всей высоте рядом отверстий, через которые газ поступает в печь. При этом разводка газа осуществляется или по верху печи, или же газопроводящие каналы устраиваются под подом печи.

Засыпка топлива через топливные трубочки должна производиться возможно чаще и равномерно мелкими порциями (от 1 до 3 кг). Так как при этом горячие газы выбивают из открытых в момент заброса топлива трубочек, часть тепла теряется и засыпка топлива осложняется антигигиеничными условиями работы взварщика. В последнее время загрузка топлива механизмуется путем применения автоматических шур-аппаратов, устанавливаемых на топливных трубочках и автоматически забрасывающих мелкодробленое топливо ровными порциями. При равномерной засыпке топлива количество необходимого для горения воздуха не подвергается резким колебаниям, и все сечение обжигательного канала равномерно насыщается газами. Для повышения производительности печи стремятся растянуть зону обжига (зону взвара), забрасывая топливо в наибольшее число рядков по длине печи (20—25 рядков). При этом легко воспламеняющиеся виды топлива (торф, корье, опилки) забрасываются небольшими порциями в рядки с наименьшей температурой изделий, а трудно воспламеняющееся и высококалорийное топливо — в средние (по ходу огня) рядки, где температура изделий достигает 600—1000°. Наконец в самые передние рядки забрасывается меньшее количество топлива, так как в них только поддерживается температура обжига (взвара).

Обжиг в гофманских печах складывается из загрузки изделий, шмаузования (досушки на парах), подогрева изделий (прокурки на дыму), обжига (взвара), выдержки при температуре обжига (закала), охлаждения и выгрузки изделий. В зависимости от продолжительности этих процессов, под каждым из них находится определенное число камер гофманской печи или печи „Зиг-Заг“.

Так, например, при обжиге красного кирпича в 20-камерной гофманской печи и при продолжительности всего цикла обжи-

га, равной 150 часам, обжигательный канал распределяется по зонам, т. е. по камерам обжига, следующим образом:

на шмаух-процессе	8 камер
„ подогреве	3 „
„ обжиге	3,5 „
„ выдержке	2 „
„ охлаждение	5 „
„ загрузке, выгрузке и в ремонте .	3,5 „

Всего 20 камер

При длине камеры в 5,2 м, шаге подсадки—1, 04 м и длине обжигательного канала (20×5,2) 104 м, режим обжига устанавливается, исходя из распределения камер, следующим образом (цифры округлены):

на шмаух-процессе	28 часов
„ подогреве	27 „
„ обжиге	30 „
„ выдержке	20 „
„ охлаждение	45 „

Всего 150 часов

При увеличении влажности поступающего в печь кирпича-сырца длительность обжига возрастает и соответственно этому перераспределяется количество камер, находящихся под различными операциями. В этом случае для достижения той же производительности печи увеличивается плотность садки кирпича.

В зоне шмаухования происходит окончательное досушивание изделий, которое производится при помощи отобранного из камер остывания воздуха, причем температура изделий повышается до 80—110°. После досушки изделий происходит их подогрев продуктами горения до температуры, обеспечивающей воспламенение топлива (400—700°). При переходе камеры на подогрев (прокурку на дыму) прорывается или прожигается бумажная ширма и закрываются жаровые конусы, через которые шмаух-воздух поступал из шмаух-канала, а также конусы, отводившие воздух в дымовой канал. Температура продуктов горения, выпускаемых из камер подогрева в дымовой боров, колеблется от 120° до 350°, в зависимости от поднятия конусов, расположенных ближе или дальше от зоны обжига (зоны взвара).

Одной из величин, определяющих производительность гофманской печи, является скорость огня, измеряемая обычно в м в сутки. Скорость огня в общем случае определяется по формуле:

$$W = \frac{(L - 2l) 24}{Z} \text{ м/сутки}$$

где: L — длина обжигательного канала (в м).

l — длина камеры (в м),

Z — продолжительность обжига в часах.

Чем меньше продолжительность обжига, тем больше ско-

рость огня, и наоборот. С другой стороны, продолжительность обжига тем длительней, чем больше плотность садки.

Таким образом, с увеличением плотности садки возрастает продолжительность обжига и уменьшается скорость огня. Другими словами, при средних скоростях огня и при очень плотной садке достигается повышение производительности и, с другой стороны, при сравнительно незначительной плотности садки производительность печи возрастает по мере повышения скорости огня. Если раньше скорость огня в гофманских печах при обжиге красного кирпича составляла 5—10 м/сутки, то теперь целый ряд заводов работает со скоростью огня 25—28 м/сутки.

Большим недостатком гофманских печей является расслоение газов по высоте печи. Разность температур по высоте обжигаемого канала в зоне остывания колеблется в пределах 300—400°, достигая в зоне подогрева еще больших значений. В целях выравнивания температуры по высоте печи в зоне обжига стремятся работать с возможно большим числом камер подогрева или устанавливают особые щитки, до известной степени, выравнивающие температуру по сечению печи. Тем не менее, обжиг особо чувствительных к изменениям температуры изделий производится в периодических или газокамерных печах.

Сопротивление садки в гофманских печах обычно незначительно и составляет 2,5—3 мм вод. ст. при общем разрежении у основания дымовой трубы около 15 мм вод. ст. Наибольшим сопротивлением обладают подподовые дымовые каналы, соединяющие наружные фуксы с дымовым каналом; сопротивление их составляет от 60 до 90 проц. от общей суммы сопротивления. С этой точки зрения всегда целесообразнее устройство внутренних фуксов, понижающее сопротивление подподовых каналов до 40—60 проц.

Расход топлива на обжиг различных изделий в гофманских печах ниже, чем в печах двух предыдущих типов, и составляет 12—15 проц. условного топлива от веса обожженных изделий или 840—1050 кал/кг; при обжиге красного кирпича 3,5—4 проц. или 245—280 кал/кг. Полезный расход тепла в гофманских печах невелик и повышается благодаря использованию подогретого воздуха для сушки кирпича (шмаух-воздух), составляя от 15 до 30 проц. Наибольшими потерями тепла являются потери с отходящими из печи газами (от 25 до 40 проц.), а также потери на аккумуляцию тепла стенами печи и в окружающее печь пространство (20—35 проц.). Потери тепла с отходящими газами зависят главным образом от количества отходящих газов, которое всегда значительно, так как к продуктам горения примешивается отработавший в зоне шмаухования воздух.

Подогретый в зоне охлаждения воздух в некоторых случаях отбирается не только для шмаухования, но и для целей сушки. Если на сушку воздуха недостаточно, из печи отбирается и часть отходящих газов. Для этого между печью и сушилкой выкладывается специальный канал, по которому отходящие из печи газы и направляются в сушилку для сушки сырых изделий перед их поступлением в обжиг.

4. Туннельные печи

Основные принципы работы

Туннельные печи относятся к непрерывно действующим печам с неподвижным источником тепла. В зависимости от принципа обжига они выполняются с непосредственным действием огня или муфельными. В первом случае топливо сгорает в камерных горелках или в туннеле среди обжигаемых изделий; во втором случае продукты горения не соприкасаются с обжигаемыми изделиями и топливо сжигается в специальном высокоогнеупорном муфеле, который передает тепло изделиям путем теплопередачи, лучеиспусканием и частично конвекцией.

Туннельные печи, по сравнению с остальными керамическими печами являются наиболее экономичными в отношении расхода топлива и потребности в рабочей силе. В них осуществлена полная автоматизация процесса обжига, регулировка которого возможна в широких пределах.

Принцип работы туннельных печей состоит в том, что длинному узкому туннелю печи непрерывно движутся плотно сомкнутые друг с другом вагонетки с обжигаемыми изделиями, которые сначала подогреваются отходящими из зоны обжига продуктами горения, затем проходят через зону огня, подвергаясь воздействию пламенных газов и, наконец, остывают, отдавая свое тепло стенкам туннеля или непосредственно охлаждаясь холодным воздухом. Газы и воздух движутся всегда навстречу передвигающимся вагонеткам с обжигаемыми изделиями, в силу чего туннельные печи, так же как шахтные и вращающиеся, работают по принципу противотока.

В зависимости от специфических особенностей обжига тех или иных изделий, схема движения газов и воздуха в туннельных печах может быть различна.

Наиболее простыми по принципу работы туннельными печами являются печи с движением воздуха и горячих газов непосредственно по каналу, к которым относятся печи типа Отто (рис. 59).

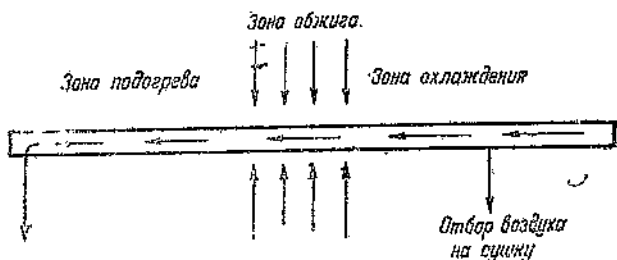


Рис. 59. Схема туннельной печи Отто

Печь Отто в сущности представляет собой растянутый в одну прямую обжигательный канал гофманской печи с неподвижной зоной огня, через который проходят обжигаемые

изделия. Весь воздух поступает в туннель в зоне охлаждения, нагревается, вступает в реакцию с топливом — генераторным газом, сгорающим в канале печи между садкой вагонеток после чего продукты горения, двигаясь по каналу, отдают свое тепло поступающим в канал изделиям и удаляются в начале зоны подогрева в дымовую трубу. Эти печи имеют большие размеры; производительность их достигает 200—250 т обожженных изделий в сутки.

При садке изделий на вагонетках оставляют промежутки, которые, располагаясь против горелок, образуют как бы топочные камеры, в которых сгорает генераторный газ.

Печи указанного типа, подобно гофманским печам, работают с относительно большим избытком воздуха и тем большим, чем ближе к зоне охлаждения расположена газовая горелка. Размеры этих печей должны соответствовать количеству, а также кривой обжига определенного рода изделий, так как в печи устанавливается определенный режим обжига, с трудом поддающийся регулировке. Для уменьшения избытка воздуха при горении, часть его отбирается из зоны охлаждения и направляется в сушилки.

Для того чтобы можно было в широких пределах изменять действительную кривую обжига в туннельной печи, приближая ее к теоретической кривой, осуществляют регулирование количества и температуры воздуха и продуктов горения в различных сечениях туннеля (рис. 60). Из схемы видно, что в зону

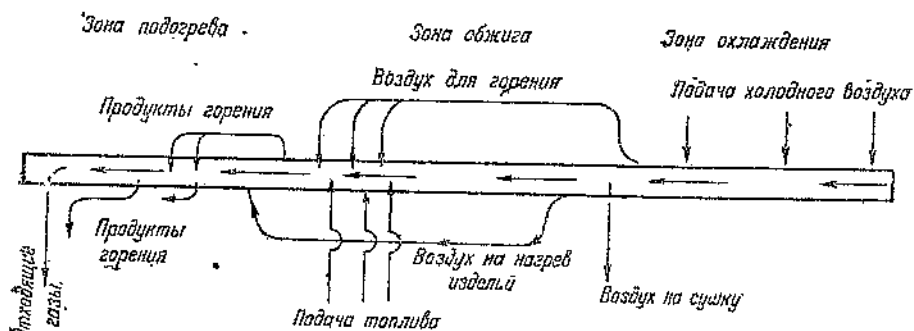


Рис. 60. Схема туннельной печи с широкой регулировкой воздуха и газов

охлаждения по туннелю поступает только часть воздуха; добавочный, необходимый для охлаждения изделий воздух поступает еще в нескольких сечениях, а горячий воздух отбирается как для целей сушки (на сторону), так и для передачи его в зону подогрева, где он повышает температуру горения и способствует нагреву изделий. Кроме того, часть продуктов горения отбирается из туннеля в горячих сечениях зоны подогрева и возвращается обратно к холодной ее части. Благодаря такой регулировке подачи холодного и отбора горячего воздуха и продуктов горения, является возможность в широких пределах ре-

гулировать как падение, так и подъем температуры изделий по длине туннеля, т. е. изменять кривую обжига. Так как некоторые изделия не допускают непосредственного охлаждения воздухом, последний подается в шамотовые рекуператоры, устанавливаемые с обеих сторон туннеля на всем протяжении зоны остывания или только в части ее. Кроме того, между сводами туннеля оставляется свободное пространство, по которому также пропускается часть охлаждающего воздуха. Приведенная схема является весьма сложной по своему выполнению и поэтому она обычно осуществляется в печах только частично.

Так, например, в схеме туннельной печи системы ВИТГЭО и Гипроогнеупора (рис. 61), предназначенной для обжига динасо-

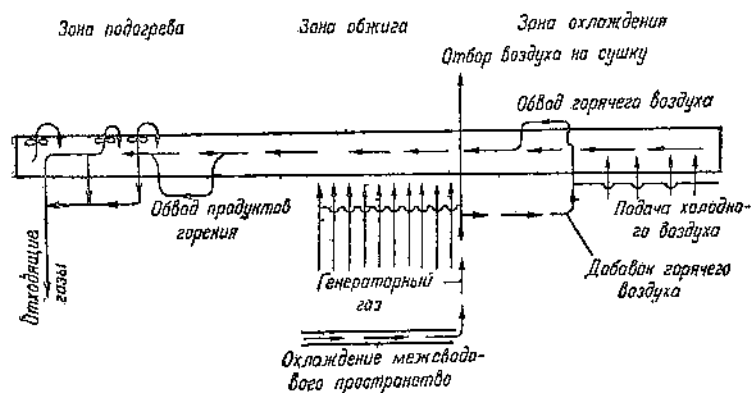


Рис. 61. Схема туннельной печи системы ВИТГЭО и Гипроогнеупора

вых изделий, воздух подается непосредственно в зону охлаждения в различных точках по ее длине. Для того чтобы изделия не страдали от непосредственного воздействия холодного воздуха, к нему может подмешиваться воздух, отбираемый из зоны подогрева в области температур 500° .

В горячем конце зоны охлаждения часть воздуха отбирается в сушилки, а часть подводится к горелкам. В этом же месте отбирается воздух, проходящий по межсводовому каналу в зоне обжига и охлаждающий свод. Кроме того, для более тщательной регулировки охлаждения изделий воздух, отбираемый в области температур 500° , может подаваться в область зоны охлаждения с температурой 600° . Воздух к горелкам подводится при помощи инжекторов и смешивается с генераторным газом.

Отбор продуктов горения из зоны подогрева осуществляется в нескольких точках, причем для выравнивания температуры по сечению туннеля в области температур ниже 500° установлены перемешивающие осевые вентиляторы. В области температур $500-600^{\circ}$ зоны подогрева сделан частичный отвод продуктов горения, так как при этих температурах подогрев изделий должен замедляться.

Таким образом, в данном случае осуществлена весьма сложная схема движения воздуха и продуктов горения, коли-

чество и температура которых может широко регулироваться. Это сделано из тех соображений, что обжиг динасовых изделий требует весьма тщательного соблюдения кривой обжига.

В туннельной печи сист. Проектстеклофарфора (ныне ГИКИ) (рис. 62), предназначенной для обжига фарфоровых изделий,

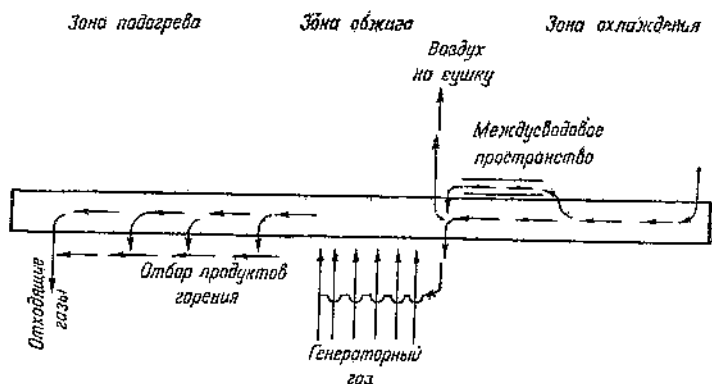
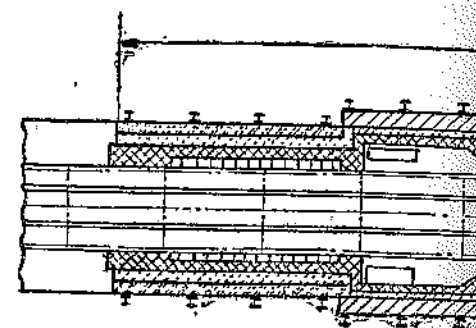
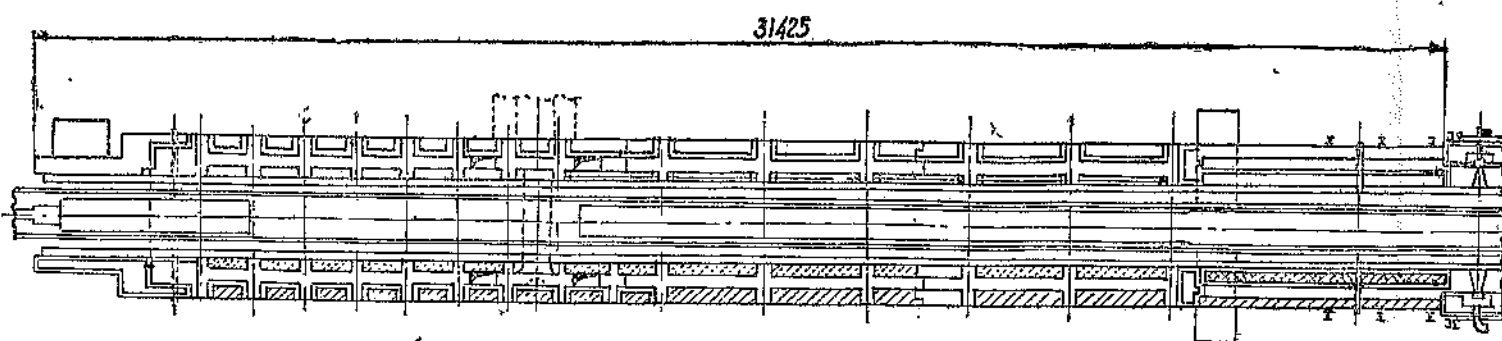
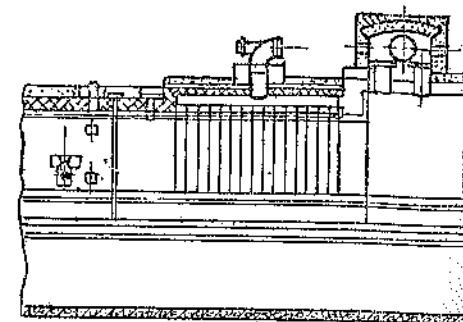
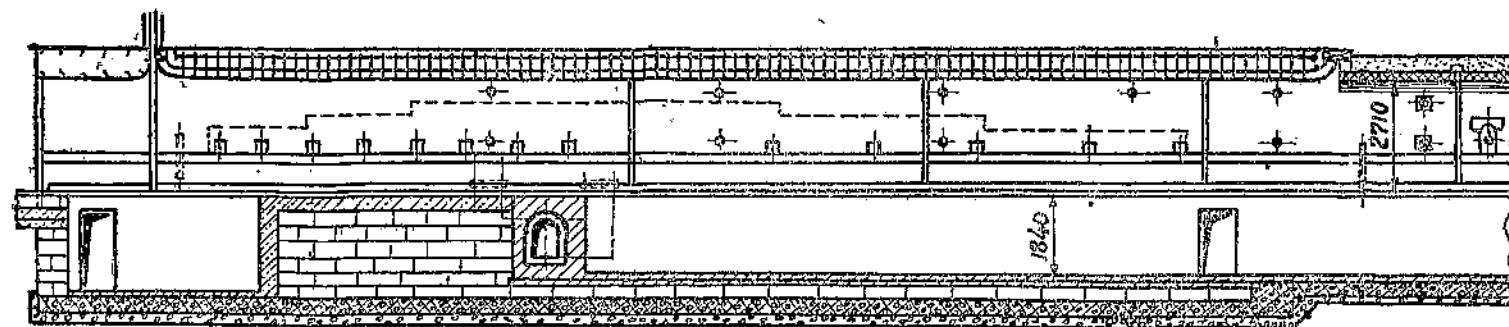


Рис. 62. Схема туннельной печи сист. Проектстеклофарфора (ГИКИ)

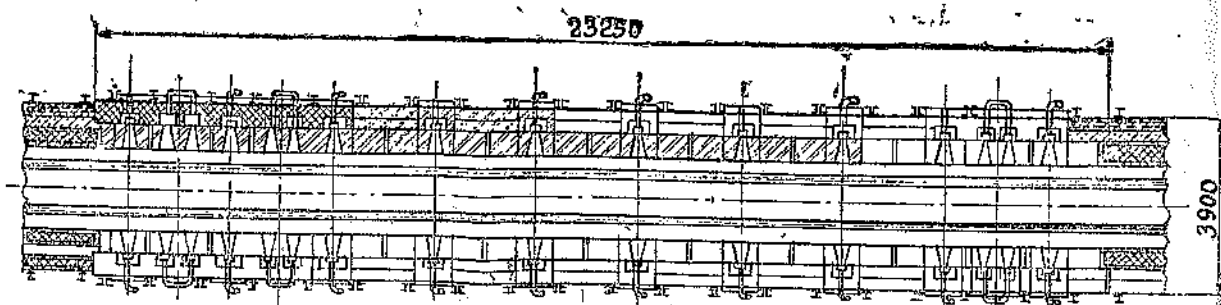
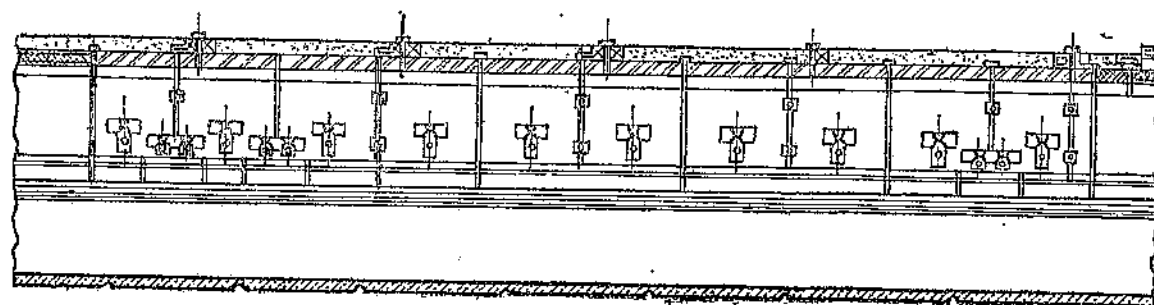
охлаждение изделий производится непосредственно омытием их холодным воздухом, который подается вентилятором в конце зоны охлаждения. Затем часть воздуха переходит по междуводовому каналу и в дальнейшем отбирается для целей сушки, а часть поступает в специальные каналы, подводящие воздух к горелкам. Охлаждение изделий в зоне высоких температур достигается при помощи рекуператоров. Отбор продуктов горения происходит постепенно на большой длине зоны подогрева, после чего они отсасываются дымососом (рис. 63).

В туннельной печи сист. Дресслера (рис. 64) подача воздуха в зоне охлаждения производится в расположенные с обеих сторон туннеля шамотовые рекуператоры, из которых часть воздуха отбирается на сушку, а часть, проходя через туннель, подводится затем по специальным каналам к газовым горелкам. Продукты горения отводятся в холодном конце туннеля дымососом. Часть зоны охлаждения, в которой воздух непосредственно омывает изделия, носит название зоны быстрого охлаждения.

На рис. 65 представлена схема движения воздуха и газов в туннельной печи системы Хирта. В печи этой конструкции часть продуктов горения (от крайних к зоне охлаждения горелок) направляется в зону охлаждения, смешивается с поступающим по туннелю горячим воздухом и по обводному каналу, расположенному в кладке печи, направляется в зону подогрева или непосредственно в туннель или в междуводовое пространство зоны подогрева, соединенное с вытяжным бором и дымососом. В зоне охлаждения расположены воздушные рекуператоры и водяной экономайзер. Часть охлаждающего воздуха поступает прямо в туннель; этот воздух в дальнейшем смешивается с продуктами горения и отводится в зону подогрева. Воздух же, поступаю-

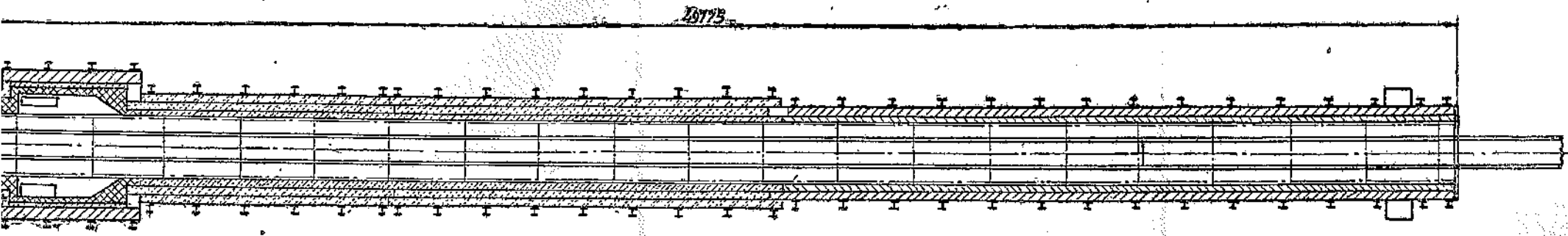
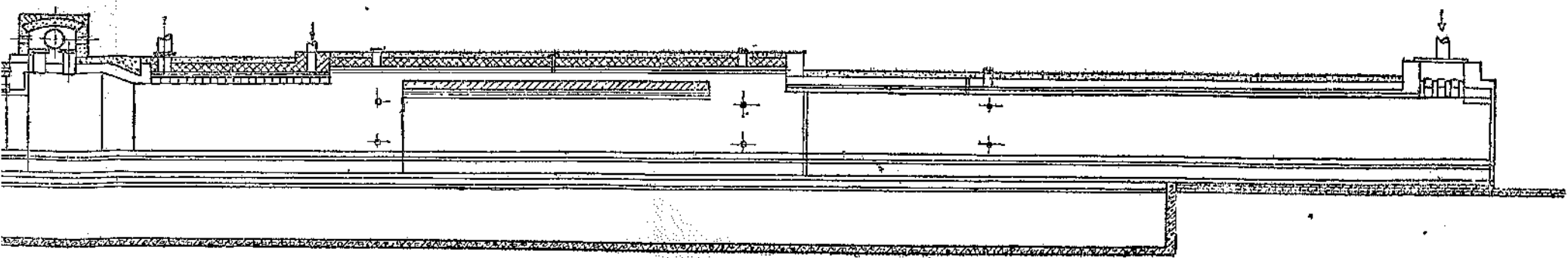


a

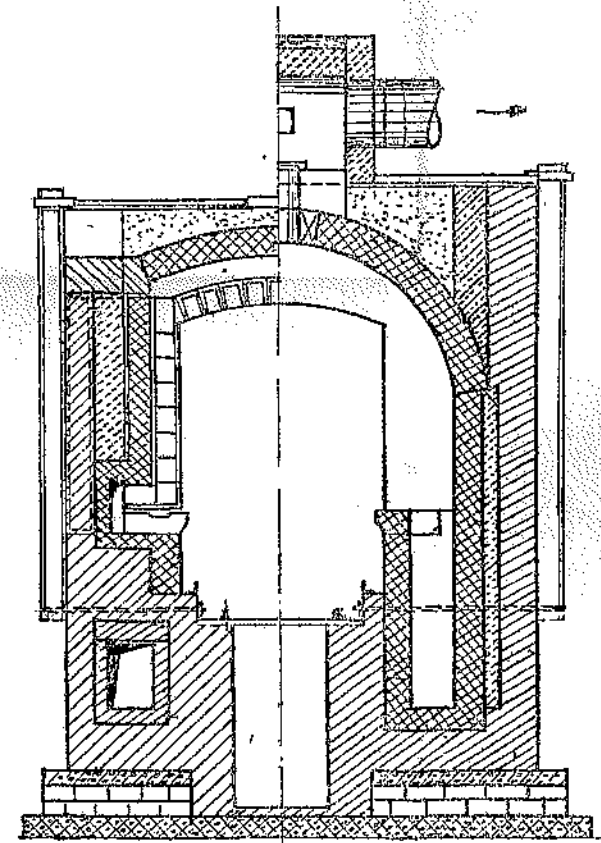
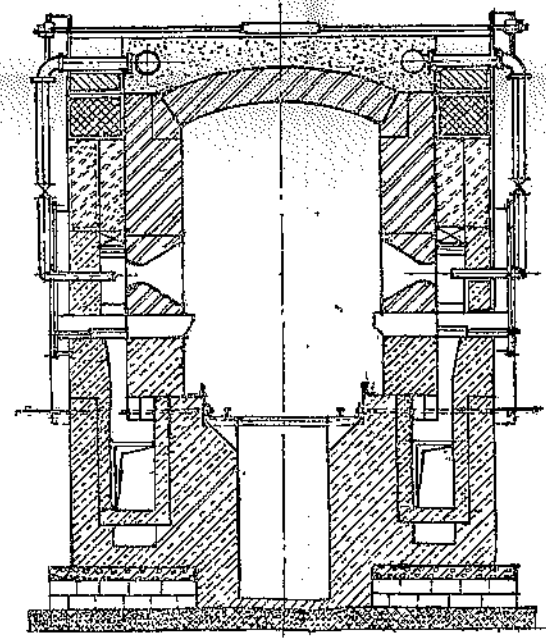
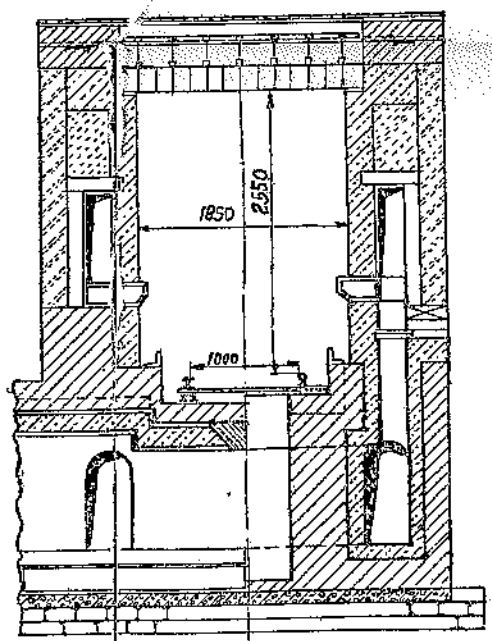


б

3900



6



2

течь для обжига фарфоровых изделий

ший для горения, подогревается в воздушных рекуператорах. Генераторный газ также может быть подогрет в специальных стальных трубках, омываемых горячим воздухом и продуктами горения. Вода в экономайзерах нагревается до 90° и идет для целей отопления или на производство. По пути движения про-

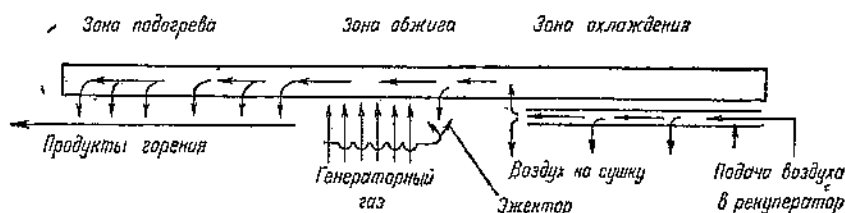


Рис. 64. Схема туннельной печи типа Дресслера

дуктов горения и воздуха, направляемых из зоны охлаждения в зону подогрева, установлен паровой котел с дымогарными трубками.

Схема движения газов и воздуха в печи типа Хирта весьма сложна и трудно поддается регулировке в отдельных ее деталях.

В настоящее время более целесообразным считается нагнетание воздуха в зону охлаждения специальным вентилятором

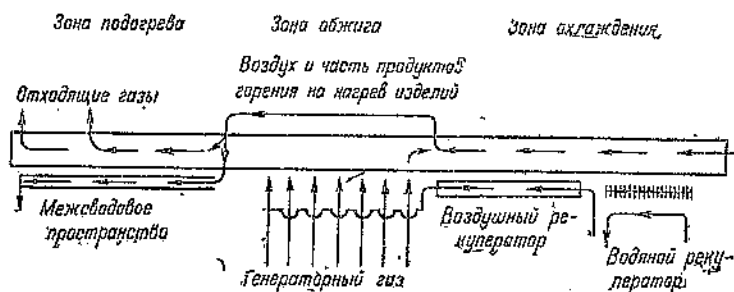


Рис. 65. Схема туннельной печи типа Хирта

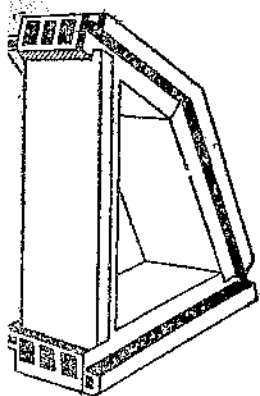
и непосредственное охлаждение изделий, а также упрощение схемы работы печи за счет увеличения ее длины.

Кроме печей указанных типов имеют применение печи системы Фужерона, Керабедарф, Гарропа и др., данные по которым приведены в табл. 37 и 38 (стр. 162).

Из муфельных печей большое распространение получили американские муфельные печи системы Дресслера. Эти печи, как и печи с непосредственным действием огня, подразделяются на три зоны: нагревания, обжига и охлаждения.

Топливо (генераторный газ или мазут) сжигается в специальных высокоогнеупорных муфелях, обладающих большой теплопроводностью и расположенных по всей длине зоны обжига и частично в зоне подогрева. Муфель состоит из отдельных звеньев, имеющих форму, приведенную на рис. 66. Высота звена Дресслера 1400 мм при ширине 300—400 мм. Плиты, из кото-

ых складывается звено муфеля, имеют сквозные каналы, по которым циркулирует горячий воздух, омывая часть садки вагонетки. Охладившийся воздух опускается в нижнюю часть туннеля.



ис. №66. Муфель печи
Дресслера

Продукты горения отводятся в зоне подогрева горизонтально расположенными трубами, которые отделены от канала печи шамотовыми перегородками и затем отсасываются дымососом. Охлаждение изделий в зоне низких температур производится или непосредственно воздухом или при помощи стенок из рифленого железа, внутренняя поверхность которых омывается воздухом. Далее следуют горизонтально расположенные вдоль стен печи трубы, в которые воздух нагнетается специальным вентилятором. Наконец в зоне наиболее высоких температур производится быстрое охлаждение изделий при помощи воздуха, который при температуре $100-120^{\circ}$ поступает в расположенные вдоль стен печи каналы и, пройдя их, подается под свод туннеля, нагреваясь до $300-1100^{\circ}$; в дальнейшем этот воздух используется для горения.

Кроме печей Дресслера, применяются муфельные печи других типов, в которых муфеля расположены до верха боковых ген и в своде зоны обжига, а также частично в зоне подогрева и охлаждения. Муфельные каналы могут регулироваться гдетельно, что позволяет создавать в печи любой режим бжига.

В последнее время получают распространение электрические туннельные печи, которые применяются в зависимости от стоимости электроэнергии для обжига фарфора и других изделий и отличаются чрезвычайно точной регулировкой температуры. В зоне обжига этих печей устанавливаются элементы сопротивления из графита или карборунда. Предварительный подогрев изделий производится горячим воздухом, отбираемым из зоны охлаждения. При стоимости электроэнергии $0,5-1,0$ коп. за квт-ч, электропечи могут быть экономичнее туннельных печей, обогреваемых продуктами горения топлива.

Наряду с длинными туннельными печами больших размеров все большее распространение получают короткие туннельные печи малых размеров. Длина туннеля этих печей колеблется от 5 до 40 м, ширина $0,3-1,0$ м и высота (до замка свода) — $5-1,0$ м. Площадь поперечного сечения составляет от $0,2$ до 0 м². Эти печи применяются при относительно небольшой производительности завода, служат для обжига кафеля, плитки, моторных свечей, пуговиц и др. изделий и вполне оправдываются как с эксплуатационной, так и с экономической точки зрения. Обжиг в коротких печах производится как при непосредственном воздействии огня, так и по принципу муфеля.

В очень небольших по размеру печах вагонетки заменяются огнеупорными плитками, которые передвигаются по шарикам, изготовленным из высокоогнеупорных материалов. Печи монтируются на высоких фундаментах или подставках, имеют зоны подогрева, обжига и охлаждения, причем продолжительность обжига в них меньше, чем в больших печах.

Так как туннельные печи всегда должны быть обеспечены большим парком дорогостоящих вагонеток, которые часто ремонтируются и неравномерно передвигаются по туннелю, в США и Англии начинают находить применение кольцевые туннельные печи. Эти печи представляют собой кольцевой туннель, под которого непрерывно движется, проходя зоны подогрева, обжига и охлаждения. Основной частью печи является кольцевая вращающаяся платформа, установленная на роликах и непрерывно находящаяся в движении, которое передается мотором с фрикционной передачей. Диаметр печи от 16 до 25 м, сечение туннеля до 4,5 м², скорость движения платформы-транспортера от 30 до 90 см/час. Обжиг в кольцевых печах производится как при непосредственном воздействии огня, так и по муфельному принципу, причем расход топлива незначителен.

Основные элементы туннельных печей

К основным элементам туннельных печей относятся:

- 1) обжигательный канал (туннель),
- 2) топливосжигающие устройства,
- 3) транспортирующие приспособления и уплотнительные устройства,
- 4) воздухоподводящие устройства,
- 5) газоотсасывающие приспособления.

Обжигательный канал-туннель представляет собой геометрически прямую, сильно вытянутую камеру, снабженную рельсовым путем, по которому продвигаются вагонетки с обжигаемыми изделиями. Размеры туннеля зависят от производительности печи, рода обжигаемых изделий, их размеров и чувствительности изделий к обжигу, т. е. в конечном счете от кривой обжига. Длина туннеля зависит от его поперечного сечения, возрастая по мере его увеличения, а также от рода обжигаемых изделий. Так, например, обжиг половых плиток или утильный обжиг стеновых плиток должен производиться в более длинных туннельных печах, чем утильный обжиг фарфора или хозяйственного фаянса, так как материал плиток более чувствителен к изменениям температуры в отдельных зонах, чем тонкостенный фаянс; кроме того, и время пребывания плиток в зоне обжига больше, чем фарфора.

Длина туннеля колеблется от 40 до 150 м и выше. Ширина туннеля (в свету) колеблется от 1,5 до 3,2 м (при однопутном туннеле), высота от головки рельс до замка свода — от 1,5 до 2,8 м.

Общая длина туннеля, а также соотношение основных его размеров определяются на основании установленной кривой об-

жига для данных изделий. При этом сечением туннеля задаются, исходя из количества подлежащих обжигу изделий и условий их садки на вагонетке, и по возможности не выходя из указанных пределов ширины и высоты туннеля. Если задана или известна производительность печи, длина туннеля определяется из формулы:

$$L = \frac{K}{\kappa} \text{ м},$$

где: K — количество изделий или материала, которое должно поместиться в туннеле (в кг),

κ — количество изделий или материала, которое помещается на 1 пог. м длины садки (в кг/м),

Количество изделий или материала K , помещающееся в туннеле, определяется из формулы:

$$K = G Z \text{ кг},$$

где: G — производительность печи по обожженным изделиям (в кг/час),

Z — полное время обжига (в часах).

Величина κ определяется из формулы:

$$\kappa = F \sigma \text{ кг/м},$$

где: F — сечение садки (в м²),

σ — плотность садки изделий или материала (в кг/м³).

Плотность садки выбирается на основании практических данных.

Исходя из найденных величин, определяется скорость продвижения вагонетки по туннелю:

$$W = \frac{G}{\kappa} \text{ м/час},$$

где: W — скорость продвижения вагонетки (в м/час),

G — производительность печи по обожженным изделиям (в кг/час),

κ — количество изделий или материала, которое помещается на 1 пог. м длины садки (в кг/м).

Длина зоны подогрева, обжига и охлаждения определяется, исходя из кривой обжига, причем под зоной обжига обычно понимается часть туннеля, оборудованная горелками, и соответствующая температурам выше 1000°.

Длина зоны подогрева, обжига и охлаждения определяется из формул:

$$l_1 = \frac{L Z_1}{Z} \text{ м},$$

$$l_2 = \frac{L Z_2}{Z} \text{ м},$$

$$l_3 = \frac{L Z_3}{Z} \text{ м},$$

где: L_1 ; L_2 ; L_3 ; — длины зоны подогрева, обжига и охлаждения (в м),

L — общая длина туннеля (в м),

Z_1 ; Z_2 ; Z_3 — время пребывания изделий или материала в зоне подогрева, обжига и охлаждения (в часах);

Z — полное время обжига (в часах).

Так как кривая обжига различных изделий в туннельных печах в большинстве случаев не может быть установлена с достаточной точностью, соотношение между длиной различных зон также устанавливается приближенно, и поэтому туннельная печь должна иметь значительные пределы регулировки. Если, на основании практических данных, кривая обжига изделий в туннельных печах может быть установлена достаточно точно, причем изделия не требуют строгой последовательности температур при нагреве и остывании, туннельная печь может не иметь регулировки и конструкция ее значительно упрощается.

Осуществление в туннельных печах определенного режима обжига огнеупорных, керамических и фарфора-фаянсовых изделий зависит от соотношения длины отдельных зон печи, скорости продвижения изделий по туннелю, а также от скорости движения, количества и температуры газов, обуславливающих теплопередачу в различных зонах печи.

Длина зоны подогрева, кроме прочих условий, должна обеспечивать минимальную температуру отходящих из печи газов, которая колеблется от 120° до 300° ; причем газы, как было указано в схемах различных печей, обычно удаляются из нескольких точек по длине зоны и отсасываются дымососом.

Длина зоны охлаждения, кроме прочих условий, обуславливается температурой выходящих из печи изделий, которая не должна превышать 80° , так как более высокая температура затрудняет разгрузку изделий.

Так как условия теплопередачи в туннельных печах недостаточно изучены, колебания в соотношениях длины отдельных зон печи бывают весьма значительными и вопрос этот до настоящего времени не является достаточно разработанным.

Обжигательный канал (туннель) печи выкладывается на специальном фундаменте из огнеупорных материалов, выбор которых производится в зависимости от температуры обжига данных изделий. В зонах подогрева и остывания обычно употребляется шамотовый и красный кирпич, причем в части высоких температур для изоляции применяют шамотовый легковес, трепельный кирпич или кизельгур. В зоне обжига при высокотемпературном обжиге применяется диас или хромомagneзит. В целях лучшей изоляции, стены туннеля в зоне обжига всегда имеют изоляционные кирпичи и большую толщину, чем в остальных зонах, и несколько выступают из общего наружного габарита печи.

Туннельная печь должна работать без перерывов в течение 2—3 лет, поэтому выбор материала и кладка имеет большое значение и производится весьма тщательно. Ввиду того, что расстояние между стенками туннеля и садкой вагонетки невелико

(обычно от 50 до 100 мм), кладка стен туннеля производится строго по отвесу с применением однородного раствора и минимальных по толщине и количеству швов. При этом размеры и качество кирпичей должны быть строго однородными; кирпичи, применяемые в зоне обжига, должны отличаться как высокой огнеупорностью, так и высокой температурой деформации.

Так как обжигательный канал туннельной печи достигает значительной длины, для его обслуживания в фундаменте туннеля между рельсами оставляется смотровой канал, высотой в рост человека. Над этим каналом движутся вагонетки с материалом. Ходовая часть вагонеток благодаря смотровому каналу всегда доступна для наблюдения и охлаждается циркулирующим по каналу воздухом, так как температура в канале поддерживается на уровне 30 — 40°.

Боковые стенки смотрового канала перекрываются железными шпалами, несущими рельсовый путь, по которому движутся вагонетки.

Ширина рельсового пути зависит от ширины обжигательного канала: в малых печах она не превосходит 400 мм, в печах средних размеров — от 600 до 1200 мм и в печах Отто — соответствует ширине нормальной колеи. Укладка рельс производится особенно тщательно, во избежание всяких уширений пути и толчков, вызывающих сотрясение поезда вагонеток, в результате чего возможен завал изделий на вагонетках или соприкосновение футеровки вагонетки и стенки канала, приводящее к нарушению режима обжига и авариям. Допускаемые боковые смещения вагонеток не должны превышать 2—3 мм, точно так же

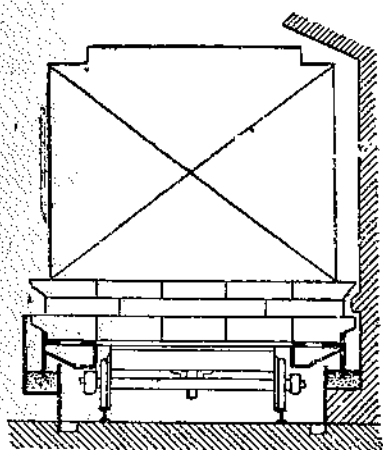


Рис. 67. Садка кирпича-сырца на вагонетке туннельной печи

как и зазор между гребнями колес и головкой рельса. Стыки рельс делаются скошенными с зазором в 3—4 мм. Рельсовые пути должны быть уложены абсолютно параллельно и строго горизонтально.

Ввиду того, что из зоны обжига туннельной печи газы стремятся выбиться в смотровой канал, а в зонах подогрева и охлаждения холодный воздух стремится проникнуть из канала в печь, вдоль стен печи и на вагонетках устраиваются песочные или шамотовые затворы (рис. 67). Для этой цели вдоль продольных стен туннеля, несколько выше головки рельс, укрепляют железные желоба, наполненные просеянным песком или мелко

дробленным шамотом, которые периодически засыпаются через наклонные каналы, проходящие сквозь кладку печи. С другой стороны к продольным брусам рамы каждой вагонетки приклепываются железные фартуки (полосы), входящие на глубину

100—120 мм в насыпанный в желоба песок или шамот. Во время движения вагонеток фартуки движутся в песке, разобщая полость печи от полости смотрового канала и таким образом уплотняют канал печи в нижней его части. В целях уплотнения входной части туннеля, в которую может ворваться холодный воздух, при загрузке новой вагонетки устраивается так называемая фор-камера. Фор-камера представляет собой кирпичную или железную камеру, вмещающую одну или две вагонетки и снабженную двумя дверями. Наружная дверь обычно делается из железа, обслуживается вручную и плотно закрывает конец туннеля. Внутренняя дверь, ведущая в обжигательный канал, устраивается или плоской подъемной, или в виде железной шторы, подъемное приспособление которой соединено с толкателем вагонеток. При загрузке вагонетки сырыми изделиями штора плотно закрыта, во время проталкивания вагонетки из фор-камеры в канал печи штора автоматически открывается и одновременно плотно закрывается входная дверь фор-камеры. Таким образом, одна из двух дверей всегда закрыта и обжигательный канал печи не сообщается с наружным воздухом. В зоне охлаждения фор-камера устраивается в том случае, когда воздух под давлением поступает для непосредственного охлаждения изделий. В печах, засасывающих воздух через открытый конец зоны охлаждения, фор-камеры не устраивают.

Потолок туннеля выполняется или сводчатым или, частично, плоским подвесным. Плоские подвесные своды устраивают в зоне подогрева из фасонных шамотовых кирпичей, подвешенных к поперечным тавровым балкам. При таких сводах зазор между верхом садки и сводом незначителен, что улучшает условия подогрева изделий, тогда как при полуциркульном своде наиболее горячие газы движутся под сводом по пространству, не заполненному садкой изделий. Для передачи воздуха и горячих газов из одной части обжигательного канала в другую, а также для нагревания свода в зоне подогрева и охлаждения его в зонах высоких температур, выкладываются двойные своды с межсводовым пространством высотой от 100 до 300 мм, заполненным воздухом или газами. Межсводовое пространство соединяется с полостью печи рядом отверстий-влетов.

Для того чтобы продольные стенки туннеля не деформировались и выдерживали распор свода, они укрепляются вертикально установленными на расстояние 2—3 м друг от друга рельсами, швеллерами и двутавровыми балками. Эти балки замуровываются в фундамент печи и стягиваются над сводами печи поперечными железными стяжками.

В зоне обжига туннельные печи оборудуются топками для сжигания различных видов топлива. В печах старых систем преобладали пламенные и полугазовые топки для кускового топлива. Так как работа этих топок, вследствие периодической их загрузки, неравномерна, в последнее время они применяются редко и обжиг производится на генераторном газе или нефти.

Топки и газовые горелки располагаются по обе стороны туннеля друг против друга или в шахматном порядке. Количество

их различно и зависит как от характера кривой обжига, так и от длины зоны обжига и колеблется от 2 до 15 пар и больше.

При пламенных топках обжиг изделий производится продуктами полного горения; при отоплении полугазом горение полу-газа переносится в печь, где он сгорает среди садки изделий на вагонетках. Точно так же и сжигание генераторного газа производится или полностью в камере топки, выложенной в кладке стен туннеля, или в большей своей части переносится в полость печи, где газ сгорает в пространстве между вагонетками или среди садки. При обжиге в туннельных печах красного кирпича кусковое топливо, так же как в гофманских печах, подается мелкими порциями через топливные трубочки, устроенные в своде печи, и сгорает среди садки кирпича на вагонетках. Кроме того, в этих случаях возможно применение пылевидного топлива, которое сжигается в топочных камерах, расположенных с обеих сторон туннеля.

При газовом отоплении большое значение имеет правильное газоснабжение печи, заключающееся в бесперебойной работе

газогенераторной станции, подающей равномерный по составу генераторный газ при постоянном его давлении в газопроводе. Кроме того, весьма важное значение имеет конструкция горелок. Газовые горелки туннельных печей должны иметь простую, надежную и в широких пределах регулирующую подачу, как газа, так и воздуха, и достаточно большую скорость вылета газа в полость печи, так как только при этих условиях обеспечиваются достаточно хорошая циркуляция газов и их перемешивание. Обычно газовые горелки применяются двух типов: камерные и инжекционные. В камерных горелках смешение газа с воздухом происходит в специальной камере, в которую

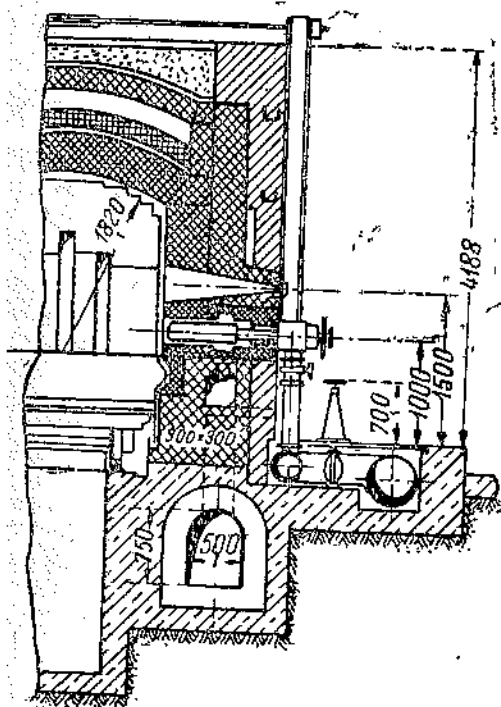


Рис. 68. Инжекционная (телескопическая) горелка туннельной печи

з и воздух подаются раздельно и где происходит частичное или полное их горение. В инжекционных горелках газ инжектирует воздух, или наоборот, причем газ смешивается с возду-

хом в канале горелки и горение переносится целиком в печное пространство.

Инжекционные горелки (рис. 68) применяются в том случае, когда обжигаемые изделия не страдают от непосредственного воздействия острого пламени или когда горение происходит в пространстве между вагонетками. Если же обжигаемые изделия не допускают местных перегревов, печи оборудуются камерными горелками, причем камера (топка) отделяется от печного пространства шамотовой решеткой, разбивающей газовый поток на отдельные струи и способствующей их перемешиванию. Для повышения температуры горения воздух и газ подогреваются. Подвод газа осуществляется по проложенному вдоль печи газопроводу; иногда последний прокладывается над сводами печи, причем газ подогревается до $80-100^{\circ}$ за счет теплоотдачи свода. Воздух подогревается в зависимости от температуры обжига изделий от 200 до 1100° . Подогрев воздуха осуществляется в зоне остывания, откуда воздух подводится к горелкам по каналам, выложенным в фундаменте туннеля. Для более равномерного распределения температуры по высоте туннеля, в зоне обжига всегда поддерживается небольшое положительное давление от $+0,5$ до $+2,0$ мм вод. ст. Избыток воздуха при окислительном пламени и при сжигании генераторного газа колеблется в пределах $20-40$ проц. ($\alpha=1,2-1,4$), понижаясь до теоретически необходимого ($\alpha=1,0$) при восстановительном пламени.

Обжигаемые в туннельных печах изделия садятся на платформы вагонеток или непосредственно, или в капсулах. Вагонетки состоят из металлической рамы, опирающейся при помощи букс на оси с насаженными на них колесами. Для защиты от воздействия температуры обжига металлическая часть вагонетки футеруется огнеупорной футеровкой, толщиной $300-400$ мм (рис. 67). В зависимости от температуры обжига футеровка делается из хромомagneзита, дианаса или шамота. Для уменьшения толщины футеровки и уменьшения веса вагонетки, а также для сокращения потерь тепла через под вагонетки применяется специальный кирпич или легковес; иногда футеровка выполняется полой, так как воздух, заполняющий полое пространство, является плохим проводником тепла. Вагонетки должны иметь строго геометрические формы, соответствующие размерам печи, и должны плавно и легко передвигаться, причем смазка букс должна быть надежной и легко доступной. Фартуки песочного или шамотового затвора вагонеток, приклепанные к продольным брускам рамы, должны равномерно погружаться в заполненный нескром жолоб и не иметь изгибов. Платформа вагонетки всегда шире расстояния между рельсами, причем футеровка ее имеет один или два выступа, соответствующих выемкам в продольных стенках туннеля. Зазор в этих пазах составляет $8-12$ мм в целях наибольшего уплотнения нижней части туннеля. Для создания герметичности между вагонетками, торцы футеровки платформ вагонеток плотно соприкасаются между собой; при этом одна из торцевых сторон футеровки имеет паз, соответствующий вы-

ступу в торцевой части соседней вагонетки; в паз закладываются жгуты из сырой шамотной массы или асбестовый шнур, который зажимается в силу движения вагонеток и заполняет все неплотности.

Подшипники колес вагонеток обычно делаются на шариках и работают в условиях высокой, доходящей в зоне обжига до 150° температуры. Поэтому смазка их должна обладать высокой вязкостью и минимальным содержанием углеродистых соединений. Для того чтобы температура у колес вагонеток не превышала 150°, смотровой канал искусственно вентилируется; при этом охлаждается и под вагонеток.

Поезд вагонеток, состоящий в зависимости от длины печи из 20 — 70 груженных изделиями вагонеток, передвигается вдоль туннеля печи при помощи специального толкателя, который помещается обычно сбоку или впереди туннеля у фор-камеры зоны подогрева. Толкатели, гидравлические или электрические состоят из привода, редуктора и помещающегося под подом вагонеток нажимного приспособления, которое постепенно и равномерно продвигает первую вагонетку в зону подогрева; эта вагонетка нажимает на остальные, причем последняя вагонетка выходит из зоны охлаждения. Проталкивание поезда вагонеток должно производиться плавно, медленно и равномерно, во избежание завала садки. Скорость продвижения вагонеток в туннельных печах составляет от 1 до 2,5 м/час. При этом вагонетки передвигаются периодически, в зависимости от продолжительности обжига изделий. Перерывы в движении колеблются от 20 минут до 1½ часов и более, а период движения вагонеток составляет от 4 до 8 минут. Таким образом, большую часть времени вагонетки находятся без движения.

Воздухоподводящие устройства туннельных печей обычно помещаются в зоне охлаждения, причем воздух или непосредственно омывает обожженные изделия, или поступает в рекуператоры. Рекуператоры (рис. 69) обычно выполняются из отдельных элементов, сделанных из трубчатого шамота, и осложняют эксплуатацию печи тем, что отдельные элементы рекуператоров недостаточно устойчивы при высоких температурах; кроме того, иногда нарушаются соединения между элементами, воздух проникает в обжигательный канал печи и нарушает установленный режим охлаждения изделий. Подогрев воздуха в рекуператорах редко превышает 400°. Вагонетки с обожженными изделиями, температура которых доходит до 1400°, медленно продвигаются вдоль стен зоны охлаждения, в которых установлены рекуператоры, и за счет теплообмена лучеиспусканием и конвекцией передают тепло наружным стенкам рекуператоров. Так как теплообмен при естественной циркуляции воздуха невелик, остывание изделий происходит сравнительно медленно, в силу чего удлиняется период остывания и возрастает длина печи или повышается температура выходящих из печи изделий. Воздух нагнетается в рекуператоры вентилятором и, нагреваясь, поступает в боковые каналы, подводящие его к горелкам печи. Кроме воздушной применяется также водяная рекуперация (печи

ирта). Водяные рекуператоры состоят из ряда ребристых угонных труб, по которым со скоростью $0,5—0,7$ м/сек проходит вода, нагревающаяся до $80—90^{\circ}$. Горячая вода поступает отопительную систему или на производство.

Непосредственное мывание обожженных изделий воздухом упрощает конструкцию туннеля и приводит к более интенсивному охлаждению изделий. При этом, однако, возникает опасность деформации изделий из-за слишком резкого их охлаждения. Охлаждающий воздух подается в конце зоны остывания специальным вентилятором через каналы в своде или в боковых стенках туннеля и движется в направлении встречного движения

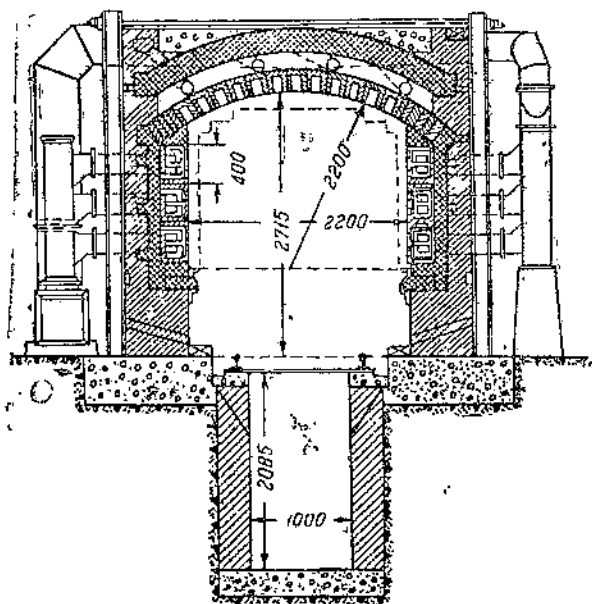


Рис. 69. Воздушная рекуперация туннельной печи

продукта. В этом случае выходной конец туннеля должен быть снабжен герметическим затвором или фор-камерой. Так как скорость охлаждения изделий в различных участках по длине туннеля различна, отбор и подача воздуха осуществляется в нескольких сечениях по длине туннеля. Передача горячего воздуха к горелкам в этом случае производится при помощи инжекции. Отбор нагретого воздуха на сторону, для целей сушки, производится при помощи вентиляторов, причем для понижения температуры воздух по пути (до вентилятора) может быть разбавлен холодным воздухом. Вся система охлаждения изделий должна быть тщательно продумана и увязана с кривой охлаждения.

Каналы для отвода нагретого воздуха обычно располагаются в фундаменте продольных стен туннеля, причем сечение их исчисляется, исходя из скорости воздуха от 2 до 4 м/сек. Отвод воздуха на сушку производится или подземным каналом, или по железному трубопроводу. Количество воздуха, охлаждающего изделия, обычно превышает количество, необходимое для сушки, поэтому избыток воздуха используется для целей сушки.

Зона остывания туннельной печи обычно работает под разрежением, составляющим от 3 до 5 мм вод. ст.

Газоотводящие устройства туннельной печи располагаются в зоне подогрева и соединяются с дымовой трубой. Отвод про-

дуктов горения из туннеля осуществляется газовыми окнами, которые в зависимости от характера кривой нагревания изделий располагаются на большей или меньшей длине зоны подогрева, преимущественно во входной ее части, т. е. ближе к фор-камере. При этом газовые окна помещаются в нижней части туннеля. Сечения газовых окон регулируются шамотовыми задвижками. Продукты горения отводятся через колодцы в сборные дымовые каналы, проложенные в фундаменте продольных стен туннеля. Каналы соединяются со сборным дымовым бором, отводящим продукты горения в дымовую трубу. В большинстве туннельных печей отсос газов осуществляется при помощи дымососа, который обеспечивает разрежение от 20 до 35 мм вод. ст. Температура отходящих газов колеблется от 120 до 300°.

Способы садки и режим обжига

Садка изделий, обжигаемых в туннельных печах, должна соответствовать тем же условиям, что и в других керамических печах, т. е. быть прочной, плотной и проницаемой для газов. Эти три условия при обжиге в туннельных печах должны соблюдаться более строго и отвечать гидравлическим особенностям работы туннельных печей. Прочность и устойчивость садки приобретает особое значение потому, что при завале изделий не только нарушается режим процесса обжига, но фактически расстраивается вся работа печи, так как завалившаяся садка закупоривает канал и нарушает транспорт вагонеток. В этих случаях приходится или пробивать стену канала и через пролом разгружать вагонетку, или разгружать завал снизу через смотровой канал.

Нормальная плотность шамотного кирпича стандартных размеров составляет около 300 штук на 1 м³ садки вагонетки или около 900 кг на 1 м³ печного пространства.

Садка должна быть максимально проницаемой для газов как по длине, так и по ширине и высоте с таким расчетом, чтобы скорости газового потока по сечению печного канала были по возможности равномерны. Так как основная масса горячих газов всегда стремится заполнить верхнюю часть канала, садка в верхней части выполняется более плотной, чем в нижней. При проектировании и пуске туннельной печи обычно выбирается определенный тип садки, в который по мере освоения печи вносятся коррективы.

Так как в туннельной печи, в отличие от периодических и газокамерных печей с горячим подом, газовый поток движется в горизонтальном направлении, температура в нижней части туннеля обычно отстает от температуры в верхней части и с трудом может быть выравнена. На выравнивание температуры по высоте туннеля очень большое влияние оказывает способ садки. На рис. 70 приведена садка, предложенная в проекте Ленинградского динасового завода, в которой по поперечному сечению оставлены три канала для прохода газов и по продольному — два канала. Последние оставлены из соображений, которые диктуются расположением горелок в зоне обжига. При указанном

способе садки кирпича, размером $230 \times 112 \times 65$ мм плотность садки составляет 300 шт/м³ или около 900 кг/м³ печного объема, причем газами омывается 53,8 м² продольных поверхностей кирпича, т. е. всего 114,4 м². Через средние три газовых канала проходит около 44

проц. общего количества газов, через пространство между верхом садки и сводом — около 30 проц., через зазор между садкой и продольными стенами туннеля — около 15 проц., и остальные 11—12 проц. от общего количества газов проходят через мелкие

щели между кирпичами. Чем больше развиты свободные поверхности изделий, активно участвующие в теплообмене, тем лучше условия теплопередачи лучеиспусканием и выше производительность печи.

Загружаемые в туннельную печь изделия должны иметь правильную форму и минимальное количество влаги, т. е. должны быть по возможности хорошо высушены. Габариты садки каждой вагонетки перед поступлением в печь контролируются специальной железной рамой, установленной перед входом вагонеток в фор-камеру зоны подогрева и в точности соответствующей габаритам поперечного сечения туннеля данной печи. Высота и ширина садки колеблется в зависимости от размеров туннеля, причем по весу на одну вагонетку укладывается от 5 до 12 т и более кирпича-сырца. Если горение газа происходит в канале печи, между садкой двух соседних вагонеток оставляется зазор в 300—500 мм; вагонетки передвигаются с таким расчетом, чтобы зазор находился против горелок, образуя как бы камеру сгорания газа.

Режим обжига в туннельной печи устанавливается в зависимости от вида изделий и должен соответствовать характерным особенностям их температурной кривой нагревания, обжига и остывания. Несоблюдение правильного режима обжига понижает качество изделий и вызывает брак.

Режим обжига регулируется количеством проходящих через канал печи воздуха и продуктов горения, работой горелок и скоростью передвижения вагонеток. В этом отношении туннельные печи имеют самые широкие возможности и отличаются от всех других видов печей. При увеличении количества продуктов горения, которое достигается повышением расхода топлива и связанным с ним повышением расхода воздуха для горения, подогрев изделий при прочих равных условиях происходит скорее и равномернее. При этом регулируется избыток воздуха и отбор продуктов горения из различных сечений печного канала.

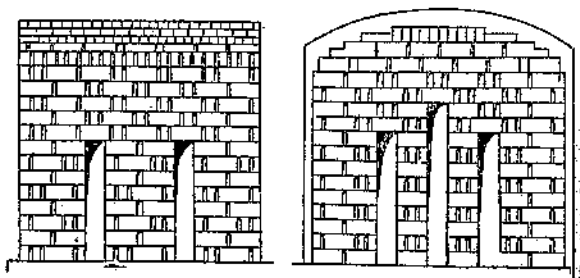


Рис. 70. Садка по проекту Ленинградского динасового завода

Режим охлаждения изделий регулируется подачей воздуха в зону охлаждения, причем с увеличением количества воздуха остывание изделий происходит более интенсивно и равномерно и температура выходящих из печи изделий понижается. При этом регулируется температура и количество воздуха, поступающего в различные сечения зоны остывания, а также количество и температура воздуха, отбираемого из различных сечений.

При определенном количестве проходящих по каналу печи продуктов горения скорость продвижения вагонеток также оказывает значительное влияние на режим обжига: при меньшей скорости прохождения вагонеток кривые нагревания и остывания изделий получаются более плавными, чем при быстром прохождении их через туннель, однако при этом возрастает продолжительность обжига и понижается производительность печи. При большей скорости продвижения вагонеток достижение нормальной кривой обжига всегда связано с увеличением подачи топлива и воздуха как для горения, так и для охлаждения, т. е. в конечном счете с условиями теплообмена. Так как передача тепла от горячих газов к обжигаемым в туннельных печах изделиям в значительной мере происходит за счет конвекции, скорость движения газов вдоль канала печи имеет большое значение и в зоне подогрева, где количество тепла, передаваемое теплопередачей лучеиспусканием, незначительно, должна быть большей, чем в зоне обжига. Скорость движения газов в туннельных печах регулируется разностью давлений в определенных сечениях отдельных зон печи. Зона обжига, как правило, всегда находится под небольшим (от 0,5 до 2,0 мм вод. ст.) давлением; в зоне подогрева поддерживается разрежение, достигающее в начале зоны 10—20 мм вод. ст.

Из сказанного следует, что режим обжига в туннельных печах может регулироваться в весьма широких пределах, и это является большим преимуществом печей. Однако, перемена раз установленного режима обжига всегда связана с длительной регулировкой работы печи, почему туннельные печи наиболее применимы для обжига однотипных изделий, режим которых более или менее постоянен.

Основные характеристики работы туннельных печей

Туннельные печи являются наиболее совершенными для обжига огнеупорных и фарфоро-фаянсовых изделий. Основными их преимуществами по сравнению с другими керамическими печами являются большая экономичность и непрерывность работы, достигающая 1,5—2 лет, сокращение времени обжига, минимальная потребность в рабочей силе и хорошие условия труда по обслуживанию печи, а также доброкачественность обожженных изделий. К недостаткам туннельных печей следует отнести их высокую стоимость, необходимость наличия большого парка вагонеток, большую сложность обслуживания, преимущественный обжиг однородных изделий и неравномерность температуры по высоте обжигательного канала.

Сравнительные характеристики работы туннельных печей

Наименование изделий	Изделия				
	Шамотовые	Шамотовые	Хоз. фарфор	Хоз. фарфор	Фарфор
Температура обжига (в градусах Ц)	1360	1350	1380	1180	1327
Система печи	Хирта	Отто	Проект-стекло-фарфор	Дресслер Муфельная	Прямого действия
Длина туннеля (в м)	124,0	150,0	106,0	135,0	121,0
Ширина туннеля (в м)	2,2	3,25	1,85	1,2	2,3
Высота туннеля (от головки рельс до замка свода) (в м)	2,71	2,8	2,67	1,85 ¹	1,925 ¹
Длина зоны подогрева (в м)	44,3	45,5	31,4	62,0	43,0
„ „ обжига (в м)	9,2	35,75	23,35	14,0	32,0
„ „ остывания (в м)	67,8	68,75	50,7	58,0	46,0
Продолжительность обжига в часах	175,0	—	40,0	27,0	90,0
Длина вагонетки (в м)	—	3,25	2,3	2,0	2,0
Средняя производительность печи (в т/сутки)	20—25	150—200	—	24,5	10—12
Топливо	Очищенный газ	(Нефть) газ	(Нефть) газ	Очищенный газ	Очищенный газ
Теплотворная способность (в кал/м³)	1220	1200	1380	1350	1350
Расход условного топлива (проц. от веса изделий)	14—15	12,0	103 11,9 ²	33,7	49,7
Удельный расход тепла (в кал/кг)	1000	840	7200 835 ²	28,60	3430
Средняя температура отходящих газов (в градусах Ц)	250—200	150—200	200—250	500	—
Средняя температура воздуха для горения (в градусах Ц)	400—500	—	400—500	—	—
Средняя температура выходящих из печи изделий (в градусах Ц)	80—100	80—100	80—100	—	80
Количество вагонеток в печи (в шт.)	74	46	45	—	56

¹ До пяти свода² Числитель относится к обожженной продукции, знаменатель к общей грузке в печи (изделия и капсулы).

Таблица 37

Сравнительные характеристики туннельных печей для обжига фарфора

Данные	Печи Дресслера			Печи Гаррона		
	Обжиг бисквита. Хоз. фарфор	Политой обжиг. Хоз. фарфор	Политой обжиг. Электро- фарфор	Обжиг бискви- та. Хоз. фарфор	Политой обжиг. Хоз. фарфор	Политой обжиг. Электро- фарфор
Длина туннеля (в м) . . .	141	141	119	125	125	125
Ширина туннеля (в м) . . .	1,7	1,7	1,85	1,8	1,8	1,8
Высота туннеля (от плат- формы вагонеток до пя- ты свода) (в м)	1,85	1,85	1,85	1,8	1,8	1,8
Продолжительность обжи- га (в часах)	30	52	93	41	41	88
Температура обжига (в ° Ц)	900	1375	1375	900	1375	1375
Производительность печи (в т/сутки)	34,0	11,32	12,0	33,5	11,1	15,0
Расход условного топлива (в проц. от веса обож- женных изделий)	35	93	49	16	72	44
Удельный расход тепла (в кал/кг)	2450	6510	3440	1120	5040	3080

Таблица 38

Сравнительные характеристики туннельных печей для обжига фаянса

Данные	Печь Дресслера		Печь Фужерона для полнотого обжига хоз. фаянса		Печь Керабе- дарф для одно- кратного обжи- га сан. фаянса	Печь Гар- рона для однократ- ного обжи- га сан. фаянса
	для полнотого обжи- га хоз. фаянса	для полнотого обжи- га сан. фаянса	старая	реконстр.		
Тип печи	Муфельная	Муфельная	Прямого действия огня			
Длина туннеля (в м)	130	130	66	94	106	119,5
Ширина туннеля (в м)	1,32	1,32	1,3	1,3	1,75	1,3
Высота туннеля (от платформы вагонет- ок до пяти свода) (в м)	2,2	2,2	1,45	1,45	1,4	0,93
Продолжительность обжига (в часах)	47,5	47,5	15,0	21,3	56,0	81,0
Температура обжи- га (в ° Ц)	—	1200	1200	1200	—	1200
Производительность печи (в т/сутки)	18,0	18,0	18,0	22,0	12,0	5,0
Расход условного топлива (в проц. от веса обожженных изделий)	37	37	37	31	—	65
Удельный расход тепла (кал/кг)	2600	2600	2600	2170	—	4550

Расход условного топлива в процентах от веса обожженных изделий в туннельных печах ниже, чем в печах других типов и составляет:

при обжиге динаса	—20—25	% условного топлива или	1400—1750	кал/кг
„ „ шамотовых изделий	—11—16	„ „ „ „	770—1120	„
„ „ красного кирпича	—4—5	„ „ „ „	280—350	„
„ „ „ фарфора	—16—90	„ „ „ „	1120—6300	„
„ „ „ фаянса	—30—37	„ „ „ „	2100—2590	„

Основные характеристики работы туннельных печей для обжига шамотовых изделий и хозяйственного фарфора сведены в табл. 36. В табл. 37 и 38 приведены сравнительные характеристики туннельных печей для обжига фарфора и фаянса.

Расчет туннельной печи состоит из определения основных размеров туннеля и длины отдельных технологических зон, после чего составляются тепловые балансы; общий для зоны подогрева и обжига и отдельный для зоны охлаждения. При этом в целях более точного расчета потерь тепла через наружные поверхности и под вагонетки туннель разбивается на участки, характеризующиеся равномерным подъемом и спаданием температуры.

Регулирование процесса обжига производится в результате эксплуатационного контроля печи. Теплотехнический контроль складывается из непрерывных замеров температуры воздуха и продуктов горения как по длине, так и по высоте туннеля, замеров давлений и разрежений в отдельных технологических зонах печи, замера давления газа в газопроводе и газового анализа в зонах обжига и подогрева. Все замеры выводятся на общий щит, расположенный сбоку печи около зоны обжига и результаты замеров непрерывно регистрируются.

Глава VI

КОНТРОЛЬ РАБОТЫ ПЕЧЕЙ

1. Измерительная аппаратура

Измерительные приборы являются наиболее совершенным средством, при помощи которого производятся наблюдения над режимом обжига и сушки, а также получается цифровой материал, характеризующий как работу тепловых установок в целом, так и отдельных деталей этих установок.

Основные определения, осуществляющие тепловой контроль печных установок, сводятся к замерам температуры, количества, состава, давления и разрежения газов и воздуха, наряду с определениями расхода топлива и количества получаемой продукции.

Все эти замеры производятся при помощи соответствующих приборов.

Приборы для измерения температуры

Для измерения температур до 550° употребляются ртутные и азотно-ртутные термометры; температуры до 800° могут замеряться графитовыми пирометрами. Более точные замеры этих и более высоких температур производятся при помощи термоэлектрических пирометров, состоящих из термопары и гальванометра.

Термопара состоит из двух тонких, спаянных на концах, проволок различных металлов. Место спая называется горячим концом термопары и вводится в точку замера температуры.

На проволоки надеваются фарфоровые или кварцевые колечки, изолирующие одну проволоку от другой, после чего обе проволоки вставляются в железную трубку, закрытую с одного конца и имеющую на другом конце головку с контактами, к которым присоединяются свободные концы проволок. К этим же контактам присоединяются провода от гальванометра — прибора, измеряющего напряжение тока.

Принцип действия термопары основан на следующем физическом явлении: если две спаянных на одном конце проволочки разнородных металлов подвергнуть нагреванию в спаянном конце их, оставляя холодными другие концы, то в проволоках возникает электрический ток, который отклоняет стрелку измери-

теля — гальванометра от нулевой точки. Чем выше температура горячего конца термопары, тем больше напряжение тока. Замеряя напряжение тока, по отклонению стрелки гальванометра определяют температуру в точке замера.

Наиболее употребительными являются железо-константановые и платино-платинородиевые термопары. Первые состоят из железной проволоки и проволоки из сплава, называемого константаном; во вторых термопарах одна проволока — платиновая, а другая состоит из сплава платины с 10 проц. родия. Железо-константановые термопары употребляются для замера температур в пределах 600—800°, платино-платинородиевые для температур от 300° до 1500°. Холодный спай (клеммы термопары) должны находиться в среде с температурой 20° или 0°; в последнем случае они обкладываются льдом.

В том случае, когда измеряется температура пламени, употребляются радиационные и оптические пирометры. Оптический пирометр типа Кольборн имеет зрительную трубку, которую направляют на точку замера температуры; в поле зрения трубки помещается нить накала, соединенная с аккумулятором. Повышая или уменьшая сопротивление, подгоняют и совмещают цвет нити с цветом раскаленной поверхности и определяют температуру по нанесенной на пирометре шкале. Кроме указанного, имеются и другие оптические пирометры, по принципу действия более или менее похожие на описанный выше.

Для измерения температуры в керамических печах служат конуса или кегли Зегера, представляющие собой тетраэдры со стороной основания в 15 мм и высотой 30—50 мм. Они изготовляются из смеси каолина, полевого шпата, кварца, буры и др. веществ в различных пропорциях и имеют температуру плавления от 600° до 2000° Ц. Номерация конусов Зегера или, как их принято называть пироскопов, стандартизована и установлена в зависимости от их плавления через интервалы температур 18—20°. В табл. 39 приведена номерация пироскопов и соответствующая каждому номеру температура плавления.

Конусы Зегера ставятся на шамотовые дощечки или кирпичи, которые помещаются среди обжигаемого материала, причем температурой плавления конуса условно считается та температура, при которой конус сгибается вдвое. Обычно устанавливается три конуса: один, соответствующий данной температуре обжига, второй с ближайшей низшей температурой плавления и третий — с ближайшей высшей температурой плавления.

Пироскопы фиксируют только предельную температуру, не позволяя измерять температурные колебания.

Приборы для измерения количества газов и определения их состава

Измерение количества газа или воздуха производится при помощи анемометра, если газ или воздух засасывается или нагнетается снаружи, или трубкой Пито и диафрагмами, если газы протекают по газопроводу.

**Номерация пироскопов
(ОСТ 7665)**

Норма пироскопов по ОСТ (в скобках номерация конусов Зегера)	Температура в ° Ц (по ОСТ)	Номера пироскопов по ОСТ (в скобках номерация конусов Зегера)	Температура в ° Ц (по ОСТ)
60 (022)	600	128 (9)	1280
63 (021)	635	130 (10)	1300
66 (020)	665	132 (11)	1320
69 (019)	690	135 (12)	1350
71 (018)	710	138 (13)	1380
74 (017)	740	141 (14)	1410
76 (016)	760	143 (15)	1430
79 (015)	790	146 (16)	1460
81 (014)	815	148 (17)	1480
83 (013)	835	150 (18)	1500
85 (012)	855	152 (19)	1520
88 (011)	880	154 (20)	1540
90 (010)	900	158 (26)	1580
92 (09)	920	161 (27)	1610
93 (08)	935	163 (28)	1630
96 (07)	960	165 (29)	1650
98 (06)	980	167 (30)	1670
100 (05)	1000	169 (31)	1690
102 (04)	1020	171 (32)	1710
104 (03)	1040	173 (33)	1730
106 (02)	1060	175 (34)	1750
108 (01)	1080	177 (35)	1770
110 (1)	1100	179 (36)	1790
112 (2)	1120	182 (37)	1820
114 (3)	1140	185 (38)	1850
116 (4)	1160	188 (39)	1880
118 (5)	1180	192 (40)	1920
120 (6)	1200	196 (41)	1960
123 (7)	1230	200 (42)	2000
125 (8)	1250	—	—

Анемометр представляет собой крыльчатку (вертушку), состоящую из нескольких слюдяных плоскостей или легких чашечек, вращающихся на оси, соединенной с указателем количества оборотов.

Под действием воздушной струи крыльчатка анемометра вращается, причем количество оборотов регистрируется стрелками циферблата.

Замеряя по секундомеру количество оборотов анемометра в минуту, определяют по таблицам скорость воздушного или газового потока, а зная диаметр отверстия, определяют расход воздуха или газа.

Определение трубкой Пито производится при помощи замеров статического и динамического напора воздуха или газов в трубопроводе.

Трубка Пито состоит из двух согнутых под прямым углом, вставленных одна в другую трубок, причем одна из них соединяется с верхним концом тягомера, а другая — с нижним его концом. Внешняя трубка имеет отверстия, направленные перпендикулярно к оси трубки; внутренняя трубка имеет свободный выход в атмосферу в обе стороны.

По наружной трубке замеряется статический напор, который, как известно, направлен во все стороны одинаково. По внутренней трубке измеряется сумма статического и динамического на-

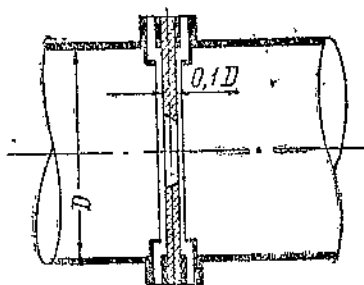


Рис. 71. Установка диафрагмы с острыми краями

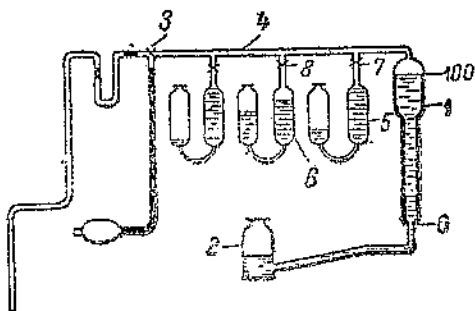


Рис. 72. Схема газоанализатора Орса

пора. Так как обе трубки соединяются с противоположными концами тягомера, статический и динамический напор передвигают жидкость на величину динамического напора, который таким образом и определяется.

Трубка Пито располагается по оси воздухопровода, навстречу газовому или воздушному потоку.

Скорость газов определяется по формуле:

$$W = \sqrt{\frac{2gh_g}{\gamma}} \text{ м/сек,}$$

где: W — искомая скорость (в м/сек),
 g — ускорение силы тяжести в см/сек²,
 h_g — динамический напор (мм вод. ст.),
 γ — удельный вес воздуха или газа при данной температуре (в кг/м³).

Зная скорость газов и сечение трубопровода, определяют расход воздуха или газа.

Диафрагма представляет собой шайбу (кольцо), имеющее в центре отверстие с острыми или закругленными краями (рис. 71). Для определения расхода воздуха, газ или пара замеряют пе-

репад давлений перед и за диафрагмой, после чего пользуются расчетными формулами. Диафрагма устанавливается на прямом участке трубопровода и диаметр ее отверстия предварительно подбирается по таблицам.

Состав газа определяется при помощи газоанализатора. Наибольшее распространение получил газоанализатор Орса. Он имеет следующее устройство (рис. 72). Стеклянный сосуд (бюретка) 1, разделенный на 100 равных частей, нижним концом соединен с помощью резиновой трубки со склянкой 2, в которую налита вода. Если склянку 2 поднять при открытом кране 3, то вода перельется в бюретку 1.

Бюретка соединена с краном 3 стеклянной трубкой 4, свободный конец которой в свою очередь соединен с газозаборной трубкой; к трубке 4 присоединены стеклянные сосуды 5 и 6, имеющие свои запорные краны 7 и 8.

В склянку 5 наливается едкая щелочь (KOH), которая поглощает углекислоту (CO_2) отходящих газов и не реагирует с остальными составными частями газов. В склянку 6 наливается жидкость, состоящая из раствора пирогаллола в воде, который поглощает кислород.

Действие прибора заключается в следующем.

Подняв склянку 2, доводят уровень воды в бюретке 1 до черты 100, после чего закрывают кран 3 и засасывают резиновой грушей 100 см^3 газа. После этого отпирают кран 3, причем забранный газ устремляется по трубке 4 и вытесняет воду из бюретки 1 в склянку 2. Если кран 3 запереть в тот момент, когда вода дойдет до деления 0, то в бюретке окажется ровно 100 частей газа (100 проц.). Затем открыв кран 7 и подняв склянку 2, наполняют бюретку 1 водой, которая вытесняет находящийся в бюретке газ в склянку 5 с едкой щелочью. Едкая щелочь поглотит находящуюся в газе CO_2 , и при возвращении газа в бюретку 1 путем опускания склянки 2 объем газа будет меньше на величину поглощенной едкой щелочью CO_2 .

Для того чтобы поглощение газа шло полнее и скорее, в склянки 5 и 6 помещают тонкие стеклянные трубки, которые увеличивают поверхность поглощения; кроме того, прокачивание газа и жидкости повторяют несколько раз.

Уменьшение объема газа определяется путем отсчета делений бюретке 1, который дает содержание CO_2 в отходящих газах процентах. Таким же путем, пропуская газ через склянку 6 поглотителем кислорода, определяют процентное содержание газов O_2 .

Уменьшение объема газа замечается при доведении уровня воды в склянке до черты 0, вода же в бюретке пойдет при этом не до 0, а поднимется несколько выше.

В большинстве приборов Орса помимо склянок 5 и 6 имеется еще третья склянка с жидкостью для поглощения CO .

Автоматические газоанализаторы устроены значительно сложнее; принцип действия некоторых из них подобен рассмотренному.

Приборы для измерения давления и разрежения.

Давление и разрежение в печи, вернее разность давлений в печи по отношению к окружающему печь воздуху, замеряется при помощи тягомеров.

Самым простым тягомером является стеклянная трубка, согнутая в виде буквы U и снабженная миллиметровой шкалой, посредине которой отмечена нулевая линия. В трубку до нулевой линии наливается подкрашенная вода. Один конец стеклянной трубки соединяют с металлической заборной трубкой, вставленной в печь; другой конец трубки оставляют открытым. Под влиянием разности давлений вода в колене, соединенном с печью, поднимается (если в печи давление меньше атмосферного) или опустится (если давление в печи выше атмосферного).¹ По разности уровней воды от нулевой линии отсчитывается давление или разрежение (в мм вод. ст.).

Недостатком простого тягомера является весьма малая величина делений, вследствие чего возможны ошибки в отсчетах.

К более точным относятся тягомеры Креля, в которых одно из колен трубки наклонено под углом таким образом, что разность давлений в 1 мм вод. ст. соответствует столбику жидкости длиной 10 мм. Над наклонной трубкой расположена разделенная на деления шкала. В трубку наливается до нулевой отметки керосин, спирт или ртуть. Если налита ртуть, результат замера делится на 13,6 (удельный вес ртути).

2. Организация теплотехнического контроля

Для рационального ведения теплового хозяйства заводов, вырабатывающих стройматериалы, необходима правильная организация теплотехнического контроля всех тепловых установок завода, как-то: котельных и силовых установок, печей, сушилок и т. д. При этом следует различать:

- а) эксплуатационный контроль установок и
- б) специальные теплотехнические испытания установок.

Рассматривая организацию контроля эксплуатации печей, можно наметить три основных контрольных группы: 1) контроль качества, расхода и процессов горения топлива, 2) контроль использования тепла в печах и 3) контроль качества продукции.

Контроль качества поступающего на печи топлива состоит в систематическом анализе проб топлива, отбираемых как из прибывающих вагонов, так и со склада. При этом различают технический анализ топлива, когда определяется его влажность, зольность, количество летучих и теплотворная способность, и элементарный анализ, когда определяются все элементы топлива (C, H, O, N, S, а также A, W, Q_p, H, и V). При газовом отоплении определяются химический состав газа, его теплотворная способность, давление газа в газопроводе и температура газа.

¹ Соответственно опустится или поднимется вода в открытом колене трубки.

Контроль расхода топлива производится непрерывно по весу израсходованного твердого или жидкого топлива или по объему израсходованного газа, определяемому по счетчикам газа или при помощи диафрагм. Расход топлива по печам и цехам сверяется с расходом его на складе, где периодически выявляются остатки топлива.

Контроль процессов горения сводится к анализу отходящих из печей газов и замеру температур в разных точках печи. Анализ газов производится автоматическим газоанализатором, а при отсутствии такового должен периодически производиться ручным газоанализатором ОРС. Показания газоанализатора позволяют определить по соотношениям между содержанием в отходящих газах CO , CO_2 и O_2 неполноту горения и избыток воздуха.

Контроль использования тепла сводится к регистрации температуры в отдельных сечениях печи, температуры отходящих из печи газов, а также температуры обожженного материала.

Замер температур производится при помощи пироскопов или саморегистрирующих пиromетров, установленных в различных точках печи. Так, например, в туннельных печах непрерывно регистрируются температуры в конце зоны подогрева, в различных сечениях зоны обжига и в зоне охлаждения. Кроме того, по показаниям тягомеров регистрируются давления и разрежения в различных сечениях печи.

Полученные в результате непрерывных замеров данные обрабатываются статистически и графически и в сопоставлении с результатами выхода продукции позволяют выработать нормы ведения обжига и расхода топлива. В дальнейшем эти данные используются плановыми отделами заводов для калькуляции себестоимости продукции.

Наряду с перечисленным производится контроль качества продукции, инспектирование обжигал, а также выверка регистрирующих приборов.

Специальные теплотехнические испытания печей производятся для выявления основных характеристик их работы в различных производственных условиях, а также с целью выявить методы улучшения работы, проверить новые способы и режимы обжига и новые конструкции печей. Исходя из этого, испытания подразделяются на приемочные, эксплуатационные и научно-экспериментальные.

Приемочные испытания производятся при приемке новых печей для выявления характеристик, которые были заданы при их проектировании или заказе, а также для установления режима обжига. Обычно к основным характеристикам работы относятся производительность печи, расход топлива, выход и качество продукции, а также осуществление заданной кривой обжига.

Эксплуатационные испытания обычно ставятся с целью выявления самых разнообразных вопросов, связанных с эксплуатацией печи или группы печей, а также группы установок. К ним относится, например, выявление потерь с отходящими газами в целях утилизации тепла отходящих газов, установление ре-

жима обжига в связи с изменением ассортимента изделий или в связи с переводом печей на другое топливо, установки дымо-соса и т. д. К ним же относятся испытания отдельных элементов печного агрегата, например холодильника, рекуператоров, фбрсунок и т. д.

Научно-экспериментальные работы ставят целью разрешение более углубленных и более общих задач, необходимых для проектирования и рационализации существующих установок и разработки новых методов обжига. Однако они в конечном счете должны всегда преследовать производственные цели и отвечать практическим задачам.

Испытание периодических печей охватывает или отдельные периоды, или весь цикл обжига и сводится к периодическим замерам величин при помощи измерительных приборов, установленных в определенных точках печи. При эксплуатационном испытании круглого периодического горна точки или посты замеров распределяются следующим образом:

Пост I — располагается на высоте 1—1,5 м от уровня пода печи у отверстия, оставленного в садиве печи. Здесь: 1) замеряется температура в печи при помощи железо-константановой термопары (до 800°) и при помощи оптического пирометра (свыше 800°); 2) производится анализ газов газоанализатором Орса, снабженным заборной трубкой и 3) замеряется разрежение при помощи тягомера Креля.

Пост II — располагается у отверстия, пробитого около печи в дымовом борове. Здесь: 1) замеряется при помощи платино-платинородиевой термопары температура отходящих из печи газов, 2) производится газовый анализ при помощи газоанализатора Орса и 3) замеряется разрежение тягомером Креля.

Пост III передвижной — наружные стены и свод печи. Здесь производится замер температуры наружной поверхности кладки и свода печи.

Пост IV — располагается на расстоянии от 3 до 5 м от стен печи. Здесь производится замер температуры окружающего печь воздуха.

Пост V — топки печи. Здесь производится: 1) взвешивание идущего в топку топлива при помощи десятичных весов; 2) отбор проб топлива; 3) взвешивание золы и шлаков из топки и 4) отбор проб золы и шлаков для определения содержания несгоревшего углерода.

Пост VI — учитывает температуру, вес, количество и ассортимент обожженных изделий.

Все замеры производятся каждые полчаса или каждый час, кроме анализа газов, который производится каждые 20—30 минут.

По окончании испытания данные замеров обрабатываются и определяются средние результаты замеров, которые затем вносятся в сводную таблицу испытаний и наносятся на графики. Сводная таблица должна содержать также основные характеристики печи, топок, топлива и обжигаемых изделий.

Если испытание печи производится по отдельным периодам обжига, составляются сводные таблицы результатов работы

горна за каждый период и общая таблица за весь цикл обжига (табл. 40).

Таблица 40

Сводная таблица испытаний периодической печи для обжига
фарфоровых изделий

Данные	Результаты	
	до рекон- струкции	после рекон- струкции
Объем камеры обжига (в м³)	95,0	95,0
Продолжительность обжига (в час)	33,0	22,0
Загрузка камеры обжига бисквита (в кг):		
вес фарфоровых изделий	4200	5000
вес капселей	20 000	25 000
Загрузка камер окончательного обжига (в кг):		
вес фарфоровых изделий	4190	5 600
вес капселей	29 500	33 500
Загруженный изделиями объем печи (в м³) . .	55,0	65,5
Те же в проц. от общего объема	58,0	70,0
Теплотворная способность топлива (в кал/кг) .	4675	4423
Расход топлива на 1 кг обожженного фарфо- ра (в кг)	6,13	3,0
То же, в условном топливе (в кг)	4,10	1,9
Расход условного топлива на 1 м³ камеры окон- чательного обжига (в кг)	252,0	165,5
Средний состав дымовых газов в начальный период обжига (в проц.) CO ₂	10,0	12,0
O ₂	9,0	7,0
CO	1,0	1,0
То же, в период большого огня (в проц.):		
CO ₂	14,0	14,5
O ₂	1,0	1,0
CO	6,0	6,0
Средняя температура газов в дымовой трубе (в °C):		
в начальный период обжига	200	100
в период большого огня	700	500

На основании этих данных составляется материальный и теп-
ловой балансы печи как по отдельным периодам, так и за весь
цикл обжига.

Испытание непрерывно действующих печей производится по
достижении ими установившегося теплового состояния, при кото-
ром вся печь равномерно прогрета, аккумуляция тепла кладкой
ли футеровкой не происходит и потери в окружающее печь
пространство постоянны по величине. Это состояние достигается

после нескольких суток работы печи (для вращающихся печей через 2—4 суток, для шахтных — через 5—10 суток). Продолжительность испытаний составляет от 24 часов до нескольких суток, в зависимости от рода печи и режима ее работы.

Основными замерами и наблюдениями при испытаниях непрерывно действующих печей являются:

- 1) замер расхода топлива,
- 2) хронометраж работы печи,
- 3) замер температуры воздуха, газового потока и материала,
- 4) замер выхода готовой продукции,
- 5) анализ отходящих из печи газов,
- 6) замер количества поступающего в печь воздуха,
- 7) замер давлений и разрежений воздуха и газового потока.

Все замеры также группируются в определенных точках, обслуживаемых специальными наблюдателями, записывающими результаты наблюдений и замеров через каждые полчаса или час. Места замеров и наблюдений также определяются отдельными наблюдательными постами.

В качестве примера ниже приводится схема испытания вращающейся трубо-печи.

Основными наблюдательными постами в данном случае являются:

Пост I — определение расхода топлива.

При отоплении печей пылевидным топливом расход последнего измеряется перед его поступлением в форсунку печи. В этом случае наилучшим способом является непосредственное взвешивание топливной пыли в ящиках или в мешках перед поступлением в пылеугольный бункер.

Определение объемного веса сырого топлива или топлива-порошка всегда бывает недостаточно точно, так как объемный вес в кучах или бункерах различен по высоте бункера. Точно также недостаточно точным является замер расхода топлива-порошка автоматическими весами.

При учете веса кускового топлива необходимо тщательно определять его начальную и конечную влажность, а также учитывать распыл и унос топлива. При этом кусковое топливо взвешивается на десятичных весах. На всем протяжении испытаний отбираются пробы топлива и замеряется температура топливной пыли.

При отоплении печей мазутом, последний замеряется по уровню в мерных баках, которых должно быть не меньше двух, причем каждый бак должен быть точно отградуирован при определенной температуре мазута. Количество израсходованного топлива замеряется по рейке с делениями, а температура подогрева мазута — термометром, вставленным в стенку бака.

Для производства анализа отбираются пробы как сырого топлива, так и топлива, поступающего в печь.

Пост II — располагается у головки вращающейся печи. Здесь производятся: 1) хронометраж работы печи, 2) замер температуры факела горения топлива и 3) замер температуры выходящего из печи материала.

Хронометраж работы печи заключается в записях (с точностью до 1 мин.) начала и конца изменения режима обжига, также полных ходов и остановок печи. На основании этих записей в дальнейшем определяется процент остановок, тихих полных ходов по отношению к общей продолжительности испытаний, а также строится график работы печи.

Определение температуры факела горения топлива в топке печи и выходящего из печи материала производится при помощи оптического пирометра. При пылеугольном и нефтяном горении температура горения факела часто получается пониженной, так как факел замеряется с тыльной его части.

Замер температуры материала, струящегося из печи в холодильник, более точен и производится через дверцы в головки печи или гляделки.

Пост III—помещается также перед головкой печи. Здесь измеряется количество поступающего в печь воздуха и его температура.

Необходимый для горения воздух поступает во вращающуюся печь обычно в трех точках: 1) через форсунку, 2) непосредственно из холодильника в головку печи и 3) через неютиности, головки печи. При этом обычно возможен непосредственный замер только воздуха, поступающего через форсунку. Для этой цели перед пылеугольной воронкой, через которую угольная пыль попадает в воздухопровод, на расстоянии около 2 м просверливается отверстие, через которое вставляется державка трубки Пито.

В том случае, когда всасывающий патрубок напорного вентилятора не соединен с холодильником, замер воздуха производится с помощью анемометра, устанавливаемого перед всасывающей решеткой вентилятора.

Температура форсуночного воздуха определяется термометром, который вставляется в то же отверстие, что и трубка Пито.

Пост IV—помещается у выходного конца холодильника. Здесь производится замер выхода обожженного материала и его температуры, а также отбираются пробы материала. Этот пост, как и пост для определения расхода топлива, является наиболее сложным, нередко требующим большой подготовки. Как правило, производительность печи должна определяться по весу фактически обожженного материала; определение количества обожженного материала по объему или определение производительности вращающихся цементных печей по расходу топлива приводят к большим ошибкам и поэтому не практикуется.

Наиболее удобным способом замера является учет материала вагонетками узкой колеи, проложенной при выходе материала из печи, или носилками, причем каждая вагонетка или носилки проходят через весы.

Замер температуры материала производится термометром в выбранной из печи пробе, причем термометр оставляют в материале до тех пор, пока температура не установится.

Пост V — помещается на пыльной камере. Здесь производятся: 1) анализ отходящих из печи газов, 2) замер их температуры и 3) замер разрежения за печью.

Для осуществления газового анализа в дымовой боров или в пыльную камеру печи вводится медная трубка, по которой газы отсасываются грушей газоанализатора. Заборная трубка должна располагаться примерно на оси несущегося газового потока.

Газовый анализ производится прибором Орса. Во избежание засорения пылью капиллярных трубок, а также для охлаждения газов, они просасываются через стеклянную вату заборной трубки. При этом краны должны тщательно смазываться вазелином и не пропускать воздух. Газовый анализ производится каждые полчаса.

Замер температуры отходящих газов производится при помощи железо-константановой или платино-платинородиевой термопары. Термопара опускается в пыльную камеру с таким расчетом, чтобы газовый поток ее омывал.

Замер разрежения производится с помощью тягомера Креля, который соединяется с заборной трубкой прибора Орса.

После проведения испытаний, результаты замеров, записанные в соответствующих журналах, обрабатываются, при этом вычисляются средние значения газового анализа, температур, разрежений и т. д. Кроме того, определяется валовой за все время испытания и средний часовой расход топлива, производительность печи и прочие основные характеристики работы печи, которые, подобно предыдущим, сводятся в общую таблицу, содержащую также основные характеристики печи, топлива и обжигаемого материала (табл 41).

3. Составление тепловых балансов печей

На основании результатов испытания составляется тепловой баланс печи, который состоит из прихода и расхода тепла. Тепловой баланс дает представление о величине отдельных статей расхода тепла и имеет большое значение при оценке потерь, а также для работ по использованию отработанного тепла. Однако по данным одного только баланса нельзя разрешить вопросов повышения производительности печи, как и вопросов, связанных с регулированием газовой среды, процессов горения и пр. Для всестороннего освещения этих вопросов нужно анализировать сводные результаты испытаний печи; которые позволяют всесторонне охарактеризовать ее работу и выработать те или иные мероприятия.

Баланс тепла может быть составлен как для всей печной установки в целом, так и для отдельных ее деталей; кроме того, он может охватить как весь цикл обжига, так и отдельные его периоды. Учет отдельных составных статей теплового баланса является общим для всех печей, методика его составления для печей периодических и непрерывно действующих различна.

Сводная таблица

основных результатов испытания цементнообжигательной вращающейся печи

Д а н н ы е	Результаты
Продолжительность испытания (в час)	20,66
Остановки (в проц. ко времени испытания)	1,28
Тихий ход " "	69,9
Полный ход " "	29,68
Длина печи (в м)	70
Диаметр печи (в м)	3,05 2,70
Содержание $MgCO_3$ и $CaCO_3$ в шламе (в проц.)	77,89
Влажность шлама (в проц.)	35,5
Потери при прокаливании шлама (в проц.)	36,08
Средняя часовая производительность печи (в кг/час)	7591
Характеристика помола топлива (в проц.):	
остаток на сите R_{90} (900)	2,7
" " сите R_{70} (4900)	18,2
Технический анализ топлива (в проц.):	
влажность сырого угля	—
то же угля, поступающего в печь	2,7
зольность угля	21,5
содержание летучих веществ	21,1
Низшая теплотворная способность топлива (в кал/кг)	5607
Расход топлива-порошка на 1 т клинкера (в кг/т)	350
Удельный расход тепла (в кал/кг)	1962
Состав отходящих газов (в проц.):	
$CO_2 + SO_2$	27,4
O_2	0,4
CO	0,59
N_2	71,61
Температура газов в конце печи (в ° Ц)	818
Разрежение газов в конце печи (в мм вод. ст.)	3,5
Температура клинкера из печи (в ° Ц)	925
То же из холодильника (в ° Ц)	354
То же воздуха, вдуваемого в печь (в ° Ц)	160
То же наружного воздуха (в ° Ц)	27

Тепловой баланс обычно сводится на единицу готовой продукции (1 кг, 1 т или 1 м³.) Однако встречается также сведение баланса тепла на единицу времени (1 час), на весь цикл обжига (в периодических печах) и на 1 кг топлива. При этом для большей наглядности отдельные статьи исчисляются в процентах от общей затраты тепла.

В общем случае баланс тепла складывается из следующих статей:

I. Приход тепла

1. Тепло от сгорания топлива.
2. Физическое тепло, вносимое топливом в печь.
3. Тепло, вносимое в печь воздухом.
4. Тепло, вносимое в печь материалом или изделиями.

II. Расход тепла

А. Полезный расход тепла:

1. На испарение влаги из материала или изделий.
2. На нагревание материала до температуры обжига.
3. На физические и химические процессы, происходящие при обжиге материала или изделий.

Б. Потери тепла:

4. С уходящими из печи газами.
5. От химической и механической неполноты горения топлива.
6. С выходящим из печи материалом или изделиями.
7. В окружающее печь пространство.
8. Неучитываемые потери тепла.

При наличии экзотермических реакций в процессе обжига материала, т. е. выделения тепла материалом, тепло вносится в приход.

В периодических камерных и кольцевых печах к потерям приобщаются также аккумуляция тепла стенами и сводом печи.

При сведении теплового баланса на 1 кг обожженной продукции определение величины каждой статьи прихода и расхода тепла производится по формулам и в общем случае может быть выражено уравнением:

$$Q = Kc(t_1 - t_2) \text{ кал/кг}$$

где: Q — количество тепла на 1 кг обожженного материала или изделий (в кал/кг),

K — количество вещества материала (влаги, газов, воздуха) (в кг или м³)

c — весовое или объемное теплосодержание 1 кг вещества при данной температуре (в кал/кг или в кал/м³),

t_1 — температура вещества (в °Ц),

t_2 — температура окружающего печь воздуха (в °Ц).

I. Приход тепла

1. Тепло от сгорания топлива:

$$Q_1 = v Q^p_{\text{н}} \text{ кал/кг},$$

- е: Q_1 — количество тепла от сгорания топлива (в кал/кг),
 v — расход топлива на 1 кг обожженного материала (в кг или м^3),
 $Q^p_{\text{н}}$ — теплотворная способность 1 кг или 1 м^3 топлива (в кал/кг или кал/ м^3),

2. Физическое тепло, вносимое топливом в печь:

$$Q_2 = b C_t t_t \text{ кал/кг},$$

- е: Q_2 — количество тепла, вносимого топливом в печь (в кал/кг),
 C_t — теплоемкость 1 кг или 1 м^3 топлива (в кал/кг или кал/ м^3),
 t_t — температура поступающего в печь топлива (в ° Ц).

3. Тепло, вносимое в печь воздухом:

$$Q_3 = L b C_v t_v \text{ кал/кг},$$

- е: Q_3 — количество тепла, вносимого в печь воздухом (в кал/кг),
 L — количество воздуха, расходуемого на горение 1 кг или 1 м^3 топлива (в м^3) (определяется из расчета горения топлива),
 C_v — теплоемкость воздуха (в кал/ м^3),
 t_v — температура поступающего в печь воздуха (в ° Ц).

Если баланс тепла составляется общий для всех зон непрерывно действующей печи, температура воздуха принимается вной температуре помещения.

4. Тепло, вносимое в печь материалом или изделиями:

$$Q_4 = G C_m t_m \text{ кал/кг},$$

- е: Q_4 — количество тепла, вносимого в печь материалом (в кал/кг),
 G — вес поступающего в печь сырого материала или изделий, отнесенный к 1 кг обожженного материала (в кг),
 C_m — теплоемкость материала или изделий (в кал/кг),
 t_m — температура материала или изделий (в ° Ц).

Если задана производительность печи по обожженному материалу, физическое его тепло учитывается по формуле:

$$Q_4 = \frac{K_m C_m t_m}{1 - \text{п. п. п.}} + \frac{K_m W C_v t_m}{(1 - \varphi)(1 - \text{п. п. п.})} \text{ кал/кг},$$

- е: K_m — количество обожженного материала = 1 кг,
п. п. п. — потеря при прокаливании, отнесенная к абсолютному сухому весу (в долях единицы);

W — влажность сырого материала (в долях единицы).
Остальные обозначения прежние.

Т. Расход тепла

А. Полезный расход тепла

Под полезным понимается расход тепла на испарение влаги, нагревание материала до температуры обжига и на происхождение при обжиге физико-химические реакции.

• Тепло на испарение влаги:

$$Q_1 = \frac{K}{(1-\varphi)(1-p \cdot p \cdot p \cdot)} W [595 + 0,47 t_{yx}] \text{ кал/кг},$$

Q_1 — расход тепла на испарение влаги (в кал/кг),

K — количество обожженного материала = 1 кг,

t_{yx} — температура отходящих из печи газов (в °C).

Остальные обозначения прежние.

Если перегрев паров воды до температуры отходящих газов учитывается в статье потерь с отходящими газами, последний член, т. е. $0,47 t_{yx}$, отбрасывается.

• Тепло на нагревание материала или изделий:

$$Q_2 = K C_m t_m \text{ кал/кг},$$

Q_2 — расход тепла на нагревание материала или изделий (в кал/кг),

K — количество обожженного материала = 1 кг,

C_m — теплоемкость материала (в кал/кг) (может быть определена из табл. 42),

t_m — температура нагревания материала (в °C).

Если баланс тепла составляется общий для всех зон непрерывно действующей печи, из которой материал выходит охлажденным (отдает сообщенное ему тепло), данная статья не учитывается.

Тепло, затрачиваемое на происходящие в материале физико-химические процессы. Этот расход тепла учитывается в теплоте, расходуемой на единицу разложения материала, и зависит от рода материала.

Например, на разложение 1 кг углекислого магния ($MgCO_3$) требуется 344 кал; на разложение 1 кг углекислого кальция ($CaCO_3$) — 500 кал; на разложение 1 кг Al_2O_3 — 500 кал, скрытая теплота плавления глазури — 80 кал/кг.

При определении этого расхода тепла учитывают содержание указанных элементов в сырьевой смеси, исходя из данных химического анализа сырья.

Потери тепла.

Потери с уходящими из печи газами:

$$Q_3 = V_T C_T t_{yx} \text{ кал/кг}.$$

Средние удельные теплоемкости различных материалов

Наименование материала	Температура (в °C)										
	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1400
Глинозем и глиноземистые огнеупорные материалы	0,201	0,213	0,224	0,233	0,241	0,251	0,264	0,269	0,274	0,279	0,304
Кремнезем и диоксидные изделия	0,186	0,203	0,217	0,227	0,234	0,238	0,240	0,264	0,272	0,277	0,288
Магнезит и магнезитовые изделия	0,218	0,229	0,240	0,250	0,262	0,264	0,264	0,264	0,264	0,264	—
Портланд-цементный клинкер	0,188	0,195	0,205	0,209	0,216	0,223	0,237	0,237	0,244	0,251	0,279

где: Q_4 — потеря тепла с отходящими газами (в кал/кг),

V_r — сумма продуктов горения, отнесенная к 1 кг обожженного материала (в m^3),

C_r — объемная теплоемкость продуктов горения (в кал/ m^3),

t_{yx} — температура отходящих из печи газов (в °C).

В данном случае определяется сумма продуктов горения топлива и их теплоемкость, которая может быть определена из формул на стр. 32.

Если к продуктам горения топлива присоединяются газы, выделившиеся в результате разложения материала (например водяные пары и углекислота при обжиге известняка), при определении потерь с отходящими газами следует определять количество каждого газа в отдельности, умножая его на соответствующую теплоемкость при t_{yx} по табл. 14 и 15.

5. Потери от химической неполноты горения топлива:

$$Q_5 = VQ_1 \text{ кал/кг,}$$

где: Q_5 — количество тепла, потерянного в результате неполного горения топлива (в кал/кг),

V — объем продуктов неполного горения, например окиси углерода (CO) или метана (CH_4) на 1 кг обожженного материала (в m^3),

Q_1 — теплотворная способность продуктов неполного горения, составляющая для CO — 3050 кал/ m^3

и $\text{CH}_4 - 8940 \text{ кал/м}^3$.

Если имеется элементарный анализ топлива и анализ отходящих газов, потеря тепла от химического недожога на 1 кг оплива может быть определена из формулы:

$$Q_6 = 56,5 C^p \frac{\text{CO}}{\text{CO}_2 + \text{CO}} \text{ кал/кг топлива,}$$

где: C^p — содержание углерода в рабочей массе топлива (в проц.).

CO — содержание окиси углерода в отходящих газах (в проц.).

CO_2 — содержание углекислоты в отходящих газах (в проц.).

К потерям от механической неполноты горения топлива относятся потери с несгоревшим углеродом топлива как оставшимся в золе и шлаках, так и провалившимся через колосниковую решетку или вынесенным газовым потоком из печи.

Эти потери определяют, исходя из теплотворной способности шлака, провала и уноса или на основании определения в их процента несгоревшего углерода. При этом величина потерь должна быть отнесена к 1 кг обожженного материала.

6. Потери тепла, уносимого выходящим из печи материалом или изделиями:

$$Q_6 = K C_m t_m \text{ кал/кг,}$$

где Q_6 — количество тепла, вынесенного из печи 1 кг остывшего материала или изделий (в кал/кг),

K — количество обожженного материала или изделий = 1 кг,

C_m — средняя теплоемкость обожженного материала или изделий (в кал/кг),

t_m — температура остывшего материала или изделий ($^\circ\text{C}$).

7. Потери в окружающее печь пространство. Этот вид потерь наиболее трудно поддается учету и часто определяется, как разность между приходом и расходом тепла. В этом случае к ней присоединяются все неучтенные потери и невязка теплового баланса, которые по своей величине могут превзойти погрешность в окружающее печь пространство.

Если в процессе испытания замерялась температура наружных поверхностей печи, потеря в окружающее печь пространство определяется из формулы:

$$Q_7 = \frac{KF(t_1 - t_2)}{K_m} \text{ кал/кг}$$

где: Q_7 — количество тепла, теряемого в окружающее пространство всей поверхностью печи, отнесенное к 1 кг обожженного материала или изделий (в кал/кг),

K — суммарный коэффициент теплопередачи от наружных поверхностей стен печи к окружающему их воздуху (в кал/м² час),

F — суммарная поверхность стен печи (в м^2).

t_1 — средняя температура наружной поверхности печи ($^{\circ}\text{Ц}$),

t_2 — средняя температура окружающего печь воздуха ($^{\circ}\text{Ц}$),

K_m — средняя производительность печи (в кг/час).

В непрерывно действующих печах с неподвижными зонами (вращающихся, туннельных, шахтных) потеря тепла в окружающее печь пространство может быть найдена путем подразделения печи на отдельные участки и определения теплопотери каждого участка по формуле:

$$Q_7 = \frac{F}{K_m} \frac{T_1 - T_2}{\sum \frac{\sigma}{\lambda} + 0,06} \text{ кал/кг},$$

где: F — поверхность теплоотдачи участка (в м^2),

T_1 — средняя температура газового потока внутри печи ($^{\circ}\text{Ц}$),

T_2 — средняя температура окружающего печь воздуха ($^{\circ}\text{Ц}$),

K_m — средняя производительность печи (в кг/час),

σ — толщина отдельных слоев материала, из которого сложена кладка печи (в м),

λ — теплопроводность этих слоев (в $\text{кал/м}^2 \text{ } ^{\circ}\text{Ц час}$).

К неучитываемым потерям тепла относятся потери тепла через неплотности печи, потери на диссоциацию CO_2 и H_2O при высоких температурах и др.

Если материал или изделия поступают в печь на вагонетках, в приходе следует учитывать количество тепла, вносимое вагонетками в печь, а в расходе — тепло, уносимое выходящими из печи вагонетками, и потерю тепла через подвагонеток.

Примеры тепловых балансов различных печей сведены в табл. 43.

При составлении баланса тепла периодических печей весь цикл испытаний разбивается на отдельные периоды, соответствующие промежуткам времени, в течение которых режим обжига более или менее постоянен, так же как более или менее постоянен и расход топлива. Для каждого выбранного промежутка времени составляется свой тепловой баланс. При этом значения отдельных статей баланса складываются, если баланс отнесен к общему количеству тепла, или относятся к соответствующим значениям топлива, или единице продукции (табл. 44).

Большой расход тепла при обжиге в периодических печах составляет аккумуляция тепла стенами печи, которые в период обжига насыщаются теплом, а в период охлаждения изделий частично возвращают его обратно.

Расход тепла на прогрев 1 м^2 стены периодического горна может быть определен по данным, составленным в результате испытаний печей на Боровичских заводах (рис. 25).

Т а б л и ц а 43

Примеры тепловых балансов различных печей для обжига стройматериалов

Статус баланса	Газокамерная печь (обжиг магнезита)		Гофманская печь (обжиг красного кирпича)		Туннельная печь (обжиг шамотовых изделий)		Шахтная печь (обжиг извести)		Вращающаяся печь (обжиг поргидат-цементного клинкера)	
	кг/кг	проц.	кг/кг	проц.	кг/кг	проц.	кг/кг	проц.	кг/кг	проц.
I. Приход тепла										
Тепло от сгорания топлива	1972	88,24	262,4	99,0	866,5	98,8	1023	98,0	2046	95,3
Физическое тепло топлива, воздуха и материала	263	11,76	12,6	1,0	10,5	1,2	20	2,0	10,0	0,5
Тепло экзотермических реакций	—	—	—	—	—	—	—	—	90,0	4,2
Всего	2235	100,0	265	100,0	877,0	100,0	1043	100,0	2146	100,0
II. Расход тепла										
На испарение влаги	14 384	0,64	37,0	14,0	214	24,4	69,0	6,55	523,0	24,36
На химические реакции		16,3	43,0	16,0	52,7	6,0	734	70,45	524,0	24,41
На нагрев избыточного воздуха			53,0	20,0	150	17,0	—	—	—	—
Потери										
С уходящими газами	1047	46,8	79,5	30,0	249	28,4	137,0	13,15	482,0	22,46
От химической и механической неполноты горения	204	9,1	16,0	6,0	—	—	21,0	2,0	—	—
С уходящим из печи материалом	15,0	0,67	5,2	2,0	93,0	10,6	22,0	2,1	65,0	3,03
В окружающее печь пространство	451	20,2	18,3	7,0	96,4	11,0	60,0	5,75	552,0	25,74
Неучтенные и невязка баланса	140	6,13	13,0	5,0	21,9	2,6	—	—	—	—
Всего	2235	100,0	265	100,0	877,0	100,0	1043	100,0	2146	100,0

Тепловой баланс периоды

(По данным исследования ВИТГЭО) Обжиг канали

Статьи баланса	Период обжига	I		II		
		Т-ра газа в боросе до 70°С. Продолжит 26 часов		Т-ра газа в боросе 70—400°С. Продолжит. 21 час		
		кал × 10 ³	проц.	кал × 10 ³	проц.	
Приход тепла						
Внесено топливом		3050,0	82,0	6470,0	99,65	
Расход тепла						
С уходящими газами		262,3	3,3	2015,3	31,0	
На испарение гигроскопической влаги		439,5	11,86	439,5	6,76	
На нагрев материала		474,0	12,80	1445,0	22,2	
На химические реакции		218,0	5,9	740,0	11,35	
На аккумуляцию	{ стены	—662,01	—18,0	—23,5	—0,35	
		сводом	21,93	0,60	229,94	3,45
		грунтом	—	—	350,0	5,40
		уравнительной камерой	82,2	2,47	114,0	1,72
		подом	9,7	0,3	41,5	0,64
На теплоотдачу в наружную среду	{	сводом	397	10,95	131,0	2,02
		топками	—	—	—	—
		садивом	0,28	0,01	0,46	0,01
Неучтенный		—	—	882,0	13,6	
Отнесенный к неучтенному химический недожог		1707,09	46,8	986,8	15,1	
Всего ²		3712,0	100,0	6493,6	100	

¹ Аккумуляция кладки в периоды I и II входит со знаком минус, так

² За 100 проц. принято тепло, внесенное топливом, плюс тепло, отдан-

Таблица 44.

ческого горна

зационных труб (емкость горна 80 м³)

III		IV		Весь цикл обжига	
Т-ра газа в борове 400—800 °C. Продолжит. 33,5 часа		Т-ра газа в борове 800—1200 °C. Продолжит. 12 часов		Продолжит. 92,5 часа	
кал × 10³	проц.	кал × 10³	проц.	кал × 10³	проц.
31350,0	100	38000	100	78870	100
13660	43,55	14750	38,85	30677,6	38,9
—	—	—	—	879,0	1,11
2250	7,09	3140	8,45	7300,0	9,14
1340	4,37	2550	6,72	4848,0	6,08
4603	14,70	5477,4	13,52	9395,3	11,32
1537,5	4,90	1275,3	3,65	3064,6	3,85
580,0	1,85	156,0	0,41	1086,0	1,36
445,0	1,42	2400	6,62	3041,2	3,82
247,0	0,79	255,0	0,67	553,2	0,7
575,0	1,84	532,0	1,4	1635,0	2,08
186,0	0,59	960,0	2,61	1146,0	1,45
11,4	0,00	9,2	0,00	21,34	0,03
4465,0	14,21	1620,0	4,26	6956,0	8,8
5925,1	18,9	6495,1	17,1	15908,6	19,98
31350	100	38000	100	79555,5	100

как стены отдают тепло материалу.

ное материалу стенами.

Глава VII

СУШКА

1. Основы теории сушки

Сушильные установки служат для сушки кусковых и сыпучих материалов, употребляемых при обжиге вяжущих веществ, и также для сушки керамического сырья и керамических изделий.

Сушка всех этих материалов производится при помощи подогретого чистого воздуха или воздуха, смешанного с продуктами горения топлива, которое сжигается в специальных топках. Иногда для сушки употребляются отходящие из печей газы или воздух, подогретый в печах в период охлаждения материала.

Поступающий в сушилки атмосферный воздух всегда содержит небольшое количество водяного пара (влаги), который находится в ненасыщенном состоянии. В сушилках воздух насыщается водяными парами, которые выделяются влажным материалом или изделиями, и влагосодержание его возрастает. При определенной температуре наступает предел его насыщения влагой, т. е. воздух перестает поглощать водяные пары. В этот момент вес пара, содержащегося в 1 м^3 воздуха, равен весу 1 м^3 насыщенного водяного пара при той же температуре.

При возрастании температуры способность воздуха поглощать влагу увеличивается, а при понижении температуры — уменьшается (роса „высыхает“, т. е. вновь поглощается воздухом). Если содержание водяного пара в воздухе больше, чем это соответствует насыщению воздуха при данной температуре, влага становится видимой и начинает выделяться из воздуха: наступает состояние тумана и влага в виде росы оседает на поверхностях, т. е. на траве, на крышах зданий и т. д.

В смеси с воздухом водяной пар всегда обладает известным давлением. Это давление называется парциальным давлением водяного пара; оно достигает наибольшей величины в тот момент, когда воздух насыщен влагой. При температурах до 200° , которые являются обычными в керамических сушилках, теплоемкость 1 кг воздуха (весовую теплоемкость) можно принимать постоянной и равной $0,24 \text{ кал/кг}^\circ \text{ Ц}$. При тех же температурах и малых парциальных давлениях водяной пар по своим свой-

ствам близко подходит к идеальным газам, почему весовую его теплоемкость можно также принимать постоянной и равной $0,47 \text{ кал/кг}^\circ \text{Ц}$. Принимая теплоемкость перегретого пара в указанных пределах равной теплоемкости насыщенного пара, теплосодержание 1 кг перегретого пара можно определить из формулы:

$$I_n = 595 + 0,47 t_n \text{ кал/кг},$$

где t_n — температура перегретого пара ($^\circ \text{Ц}$).

Так как воздух всегда содержит некоторое количество влаги, весьма важно знать его влагосодержание, т. е. количество водяных паров в g , приходящееся на 1 кг сухого воздуха ($d \text{ г/кг}$).

Если количество водяных паров (влаги) относится к 1 м^3 влажного воздуха (т. е. смеси воздуха и водяного пара), то это содержание называется абсолютной влажностью.

Относительной влажностью называется отношение веса влаги, содержащейся в 1 м^3 воздуха при данной температуре, к максимальному весу влаги, которая может содержаться в 1 м^3 того же воздуха при той же температуре. Влагосодержание и относительная влажность при данной температуре определяется из таблиц.

При расчете сушилок все расчеты с влажным воздухом принято относить к 1 кг сухой его части, так как вес сухого воздуха на всем протяжении процесса сушки остается постоянным, в то время как его объем меняется по мере изменения температуры; температура же воздуха непрерывно понижается по мере поглощения им влаги изделий.

Так как аналитические определения тепло- и влагосодержания воздуха, равно как и определения парциального давления водяного пара с изменением температуры довольно громоздки, их удобнее всего определять, пользуясь $I-d$ диаграммой (рис. 73).

$I-d$ диаграмма построена в косоугольной системе координат с углом между осями в 135° для значений, охватывающих область температур до 200° , и углом в 120° — для значений, охватывающих область более высоких температур. Диаграмма составлена для барометрического давления 754 мм рт. ст. , являющегося преимущественным давлением средней полосы СССР. Наклонные линии, проведенные параллельно оси абсцисс, являются линиями постоянного теплосодержания (адиабата); на оси абсцисс отложена шкала постоянных влагосодержаний d , спроектированная на вспомогательную горизонтальную ось со шкалой от 0 до 80 г. Вторая система прямых является изотермами — линиями постоянной температуры, значения которой помечены на концах изотерм. В правой части диаграммы (рис. 73, б) помещен расходящийся веером пучок кривых постоянного коэффициента относительной влажности в пределах от 5 до 100 проц. По достижении температуры кипения воды при данном барометрическом давлении, т. е. температуры около 100° , кривые дают резкий перелом и идут почти вертикально

верх. Наконец, линии парциальных давлений водяного пара мм рт. ст. позволяют определить парциальное давление водяных паров, как отрезок между кривыми парциальных давлений и данной точкой, определяющей состояние влажного воздуха.

Пользование $I-d$ диаграммой видно из прилагаемого примера определения параметров воздуха (рис. 73). Воздух имеет

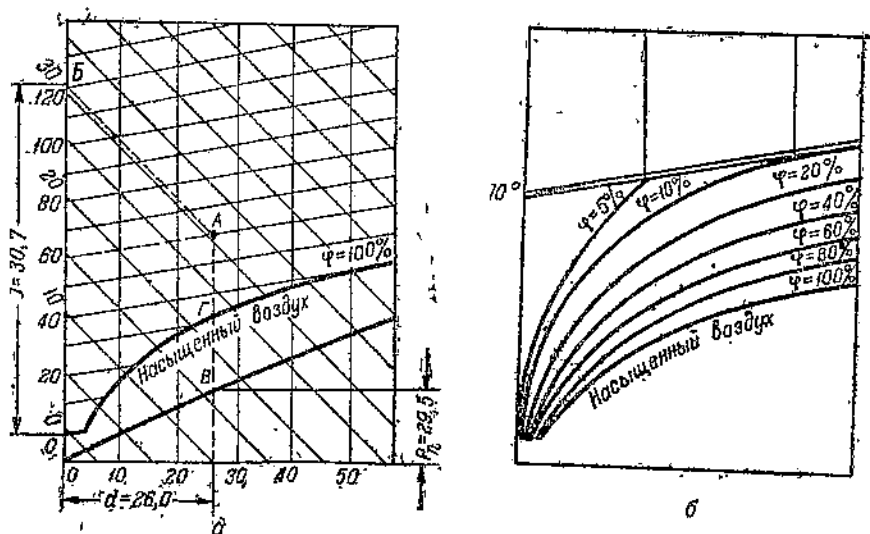


Рис. 73. Определение параметров воздуха по $I-d$ диаграмме

температуру $t=60^\circ$ и влагосодержание $d=26 \text{ г/кг}$ (точка А). Для определения теплосодержания этого воздуха из точки А проводится линия, параллельная линиям $I=\text{const}$, до пересечения с осью ординат (точка Б) и по масштабу (для диаграммы о 200° масштаб влагосодержаний — 0,2 и теплосодержаний — 1, и для диаграммы свыше 200 масштаб влагосодержаний 2,0 теплосодержаний 2,0) определяется отрезок $OB=I=30,7 \text{ кал.}$

Вертикаль из точки А до пересечения с кривой парциальных давлений в точке В определяет парциальное давление водяных паров. $p_n=29,5 \text{ мм рт. ст.}$ При этом давление сухого воздуха будет составлять $p_{с. в.}=745-29,5=715,5 \text{ мм рт. ст.}$

Точка Г (пересечение вертикали с кривой $\phi=100 \text{ проц.}$) соответствует температуре насыщения воздуха при заданном влагосодержании ($d=26 \text{ г/кг}$) и лежит на изотерме $t_n \approx 28,8^\circ \text{Ц.}$

$I-d$ диаграмма позволяет легко и быстро определить основные параметры сушки в предположении, что процесс сушки происходит адиабатически, т. е. при постоянном теплосодержании. Однако неизбежные в сушилках тепловые потери отклоняют процесс от идеального, внося ряд поправок.

Влага (вода) переходит из жидкого состояния в газообразное двумя способами: или путем парообразования, сопровождающегося процессом кипения, или путем испарения жидкости

Парообразование происходит одновременно во всей массе жидкости при достижении ею определенной температуры, испарение же происходит с поверхности жидкости при любых температурах. Количество влаги в г, испаряющееся в час с 1 м² открытой поверхности (при разности парциальных давлений, равной 1 мм рт. ст. и нормальном барометрическом давлении) называется коэффициентом испарения.

В твердом теле влага находится в промежутках между твердыми частицами, совокупность которых и составляет твердое тело. Распределение влаги в толще материала всегда неравномерно, причем движение влаги происходит за счет разной влажности в различных точках материала по капиллярам — волосным канальцам, образующимся между твердыми частицами. При длительном пребывании влажного материала на воздухе и при постоянной температуре и влажности последнего, материал перестает испарять влагу, причем оставшаяся в материале влага называется устойчивой влажностью материала, а состояние материала — гигроскопическим.

Сумма свободно выделяющейся и устойчивой влаги называется общей или рабочей влажностью материала. Количество общей влаги, отнесенное к начальному весу влажного материала, называется относительной его влажностью. То же количество влаги, отнесенное к весу сухой массы материала — абсолютной влажностью.

Гигроскопическая влажность материала зависит от относительной влажности воздуха. Так как относительная влажность воздуха в пределах средней полосы СССР составляет 70—80 проц., гигроскопическая влажность различных материалов колеблется не так сильно. Значения гигроскопической влажности сведены в табл. 45 и позволяют судить о том, до какой влажности, следует сушить различные материалы при их хранении на воздухе после сушки.

Т а б л и ц а 45

Значения гигроскопической влажности для различных материалов при ϕ воздуха = 70 проц.

Название материала	Гигроскопическая влажность (в проц.)
Каолин	1,06
Инфузорная земля	2,0
Кокс	1,48
Дерево	14,0
Глина (латинская, при температуре воздуха 20° Ц)	8,0
Торф	10,5
Сланец (кашпирский)	4,3
Подмосковный уголь	8,0
Донецкий длиннопламенный уголь	5,2
Антрацитовый штыб	2,0
Челябинский уголь	9,0
Кузнецкий уголь	1,0

2. Определение основных параметров сушки

Для облегчения расчета сушилок обычно рассматривается так называемая „идеальная сушилка“, т. е. сушилка без потерь, которой тепло затрачивается только на испарение влаги: начальная температурой 0°Ц и учитывается одна неизбежная потеря — с отработавшим и выходящим из сушилки воздухом. При этом количество абсолютно сухого вещества не изменяется; меняется лишь вес материала G , его влажность w и температура t .

Принимаем следующие обозначения:

G_1 — количество сырого материала (до сушки), поступающего в сушилку (в кг/час),

G_2 — количество сухого материала (после сушки), выходящего из сушилки (в кг/час),

w_1 — начальная влажность материала, отнесенная к весу сырого материала (в проц.),

w_2 — конечная влажность, отнесенная к весу сухого материала (в проц.),

w — часовое количество испаренной влаги (в кг/час).

Количество испаренной из материала влаги составляет:

$$w = G_1 - G_2 = \frac{Gw_1 - G_2w_2}{100} \text{ кг/час}$$

$$\text{или } w = G_1 \frac{w_1 - w_2}{100 - w_2} = G_2 \frac{w_1 - w_2}{100 - w_1} \text{ кг/час.}$$

Количество абсолютно сухого материала до и после сушки равно:

$$G_c = G_1 \frac{100 - w_1}{100} = G_2 \frac{100 - w_2}{100} \text{ кг/час.}$$

Количество сырого материала составляет:

$$G_1 = w \frac{100 - w_2}{w_1 - w_2} \text{ кг/час.}$$

Количество сухого материала составляет:

$$G_2 = w \frac{100 - w_1}{w_1 - w_2} \text{ кг/час.}$$

Обозначим далее:

l — расход воздуха на 1 кг влаги (в кг/кг),

t — температуру воздуха (в $^{\circ} \text{Ц}$),

I — теплосодержание воздуха (в кал/кг),

d — влагосодержание воздуха (в г/кг),

φ — коэффициент относительной влажности (в проц.),

q — расход тепла на 1 кг влаги (удельный расход тепла) (в кал/кг).

Для холодного воздуха все эти параметры снабжаются индексом нуля (t_0 ; I_0 ; d_0 ; φ_0).

для подогретого (поступающего в сушилку) воздуха — индексом единица (t_1 ; I_1 ; d_1 ; φ_1).
 для отработавшего (выходящего из сушилки) воздуха — индексом два (t_2 ; I_2 ; d_2 ; φ_2).

Тогда расход воздуха составит:

$$l = \frac{1000}{d_2 - d_1} = \frac{1000}{d_2 - d_0} \text{ кг/кг,}$$

как влагосодержание горячего и холодного воздуха не меняется, т. е. $d_0 = d_1$.

Удельный расход тепла в калорифере (q_k) на испарение 1 кг аги будет равен:

$$q_k = l(0,24 + 0,00047d_0)(t_1 - t_0) \text{ кал/кг.}$$

и так как в теоретической (идеальной) сушилке теплосодержание сырого и сухого материала постоянно ($I_1 = I_2$), удельный расход тепла составит:

$$q = l(I_2 - I_0) - \tau_1 \text{ кал/кг}$$

где τ_1 — температура влаги, равная начальной температуре сырого изделия (в ° Ц).

Аналитический расчет сушилки сводится к решению этих уравнений, при этом пользуются таблицами влаго- и теплосодержаний воздуха.

Практическая (действительная) сушилка отличается от идеальной наличием тепловых потерь, состоящих из:

- 1) потерь тепла на нагревание сухого материала или изделия и остаточной влаги,
- 2) потерь тепла на нагревание транспортных приспособлений (вагонеток, рам, полок и т. д.),
- 3) потерь тепла в окружающий сушилку воздух через ограждения (потолок, стены, пол и двери).

Все эти потери обычно определяются на 1 кг испаренной аги.

Потеря тепла на нагревание материала и остаточной влаги определяется по температуре выходящего из сушилки материала и его теплосодержанию, так же как и потери тепла, уносимого транспортными приспособлениями:

$$q_1 = \frac{G_m}{w} C_m (t_1 - t_2) \text{ кал/кг,}$$

где q_1 — потеря тепла с выходящим из сушилки материалом, эжектирами или вагонетками на 1 кг испаренной влаги, (в кал),
 — вес выходящего в час из сушилки материала, изделий или вагонеток (в кг),

— их теплоемкость (в кал/кг).

— их конечная температура (в ° Ц),

— их начальная температура (в ° Ц),

— среднее количество испаренной влаги (в кг/час).

Потеря тепла в окружающее сушилку пространство определяется по формуле:

$$q_3 = \frac{K}{w} F (t_1 - t_2) \text{ кал/кг},$$

где: K — коэффициент теплопередачи составных стенок, из которых состоят стены и потолок сушилки (в $\text{кал/м}^2 \text{ } ^\circ\text{C час}$),
 F — поверхность стен и потолка сушилки (в м^2),
 t_1 — средняя температура в сушилке (в $^\circ\text{C}$),
 t_2 — средняя температура окружающего сушилку воздуха (в $^\circ\text{C}$),
 w — среднее количество испаренной влаги (в кг/час).

Обозначая сумму потерь тепла через εq_1 для аналитического расчета практической сушилки остаются три предыдущих уравнения, приведенные к 1 кг испаренной в сушилке влаги, с поправкой на потери тепла:

$$1) l = \frac{1000}{d_2 - d_1} = \frac{1000}{d_2 - d_0} \text{ кг/кг},$$

$$2) q_k = l(0,24 + 0,00047 d_0)(t_1 - t_0) \text{ кал/кг},$$

$$3) q = l(I_1 - I_2) - \tau_1 + \varepsilon q \text{ кал/кг}.$$

Совместное решение этих трех уравнений определяет основные параметры работы действительной сушилки, причем уравнения решаются методом последовательных приближений, задаваясь конечной влажностью воздуха.

Более просто основные параметры работы сушилок могут быть определены по $I-d$ диаграмме.

Изменения основных параметров, характеризующих состояние воздуха, сильно влияют на экономичность процесса сушки.

С повышением начальной температуры воздуха (t_1), уменьшается расход тепла и количество необходимого для сушки воздуха; однако, так как при этом значения коэффициента относительной влажности (φ_2) понижаются, возрастает также и неравномерность сушки.

Если значения коэффициентов относительной влажности отработавшего воздуха (φ_2) выше 60 проц., т. е. выше относительной влажности наружного воздуха, расход тепла с повышением температуры сначала увеличивается, а потом медленно падает. Расход воздуха на сушку всегда резко уменьшается с повышением температуры подогрева воздуха при любых значениях относительной влажности.

Когда сушилка имеет собственную топку или работает на отходящих из печей газах, теплосодержание газов всегда больше, чем у сушилки, работающей на горячем воздухе, точно так же, как объем 1 кг сухого воздуха. Однако расхождения обычно незначительны, почему при температурах дымовых газов в пределах $80-800^\circ\text{C}$ можно пользоваться данными теплосодержаний для сухого воздуха.

Влагосодержание дымовых газов всегда выше d_0 воздуха и при полном сгорании топлива определяется по формуле:

$$d_{д.г.} = \frac{\left(\frac{9H^p + w^p}{100} + w_\phi + \frac{\alpha L_0 d_0}{1000} \right) 1000}{1 + \alpha L_0 - \frac{A^p + 9H^p + w^p}{100}} \text{ г/кг сухих газов,}$$

где: $d_{д.г.}$ — влагосодержание дымовых газов на 1 кг сухих газов (в г).

H^p — содержание водорода в рабочем топливе (в проц.),

w^p — " " влаги " " " (в проц.),

A^p — " " золы " " " (в проц.),

w_ϕ — вес водяных паров (в кг/кг топлива), вносимых паровым дутьем, если таковое имеется (обычно в промышленности стройматериалов применяется воздушное дутье, в силу чего этот член отпадает),

α — избыток воздуха в топке,

L_0 — теоретическое количество воздуха, необходимого для сгорания 1 кг топлива (в кг).

d_0 — влагосодержание этого воздуха (в г/кг).

Так как в сушилках, работающих на дымовых газах, обычно бывает задана только начальная температура сушки, необходимо найти общий коэффициент избытка воздуха, который обеспечивает эту температуру. Так, например, при сушке глины в сушильных барабанах начальная температура сушки обычно принимается равной 800°, причем газы поступают из топки и разбавляются воздухом в смесительной камере. Тогда общий избыток воздуха находится по формуле:

$$\alpha = \frac{Q_b^p \eta_T + C_T t_T - \left(1 - \frac{9H^p + w^p + A^p}{100} \right) C_{с.г.} t_T - \frac{9H^p + w^p}{100} i_n}{L_0 \left(C_{с.г.} t_T + \frac{i_n d_0}{1000} - I_0 \right)}$$

где: Q_b^p — высшая теплотворная способность топлива (кал/кг),

η_T — коэффициент полезного действия топки,

C_T — теплоемкость топлива (в кал/кг),

t_T — температура поступающего в топку топлива (в °Ц),

$C_{с.г.}$ — теплоемкость сухих продуктов сгорания топлива (в кал/кг),

t_T — температура горячих газов (в °Ц), поступающих из топки в смесительную камеру (для топок сушильных барабанов 1050—1150°),

i_n — теплосодержание водяного пара при t_T (в кал/кг),

d_0 — влагосодержание поступающего в топку воздуха (в г/кг)

I_0 — его теплосодержание (в кал/кг).

Остальные обозначения остаются прежними. При расчете сушилок определяют, исходя из заданных характеристик, рас-

ед воздуха и тепла на сушку, определяют потери тепла и оставляют баланс тепла сушильной установки.

Проектирование и расчет сушилки связаны с вопросом динамики сушки, т. е. с анализом явлений, происходящих при испарении влаги из материала или изделий. Наиболее важным вопросом в данном случае является определение длительности сушки, которая решает выбор типа и размеров сушилки. Длительность сушки материалов и изделий зависит от многих условий, не всегда может быть принята, исходя из эксплуатационных данных. Во многих случаях вопрос этот решается путем постановки опытов в условиях, приближающихся к намеченным в проекте условиям.

Длительность сушки зависит от природы материала или изделий, их формы и размеров, количества подлежащей удалению влаги, интенсивности перемешивания материала с воздухом, достижимой температуры материала или изделий, их укладки и значения, а также от намечаемой или уже имеющейся конструкции сушилки и степени равномерности сушки. Структура материала или изделий в процессе сушки может изменяться под влиянием температуры, скорости сушки и качества газов или воздуха, что всегда необходимо учитывать. При этом в промышленности стройматериалов следует различать сушку кусковых сыпучих материалов и сушку изделий строительной керамики.

При сушке кусковых и сыпучих материалов вопрос сохранения формы не имеет решающего значения, что весьма облегчает ловия сушки. Большое значение, однако, имеет температура гревания материала в конце сушки. Так, например, при сушке плив конечная их температура на должна превышать 100° , во бежание потери летучих веществ.

При сушке формованных изделий основным является вопрос хранения целости изделий и их формы, что всегда осложняет ловия сушки и повышает ее длительность по сравнению с ительностью сушки кусковых материалов.

Согласно теории Люиса процесс сушки твердых тел схематически представляется в следующем виде: влажный материал ывается ненасыщенным водяными парами воздухом, который парят влагу с поверхности материала, вызывая тем самым зность концентраций влаги внутри куска и на его поверхности. В силу разности концентраций, влага под действием капилрных сил устремляется (диффундирует) изнутри куска наружу тех пор, пока не наступит равновесие влажности материала омывающего его воздуха. Дальнейшее удаление влаги, кото я в данном случае является устойчивой влагой, возможно ько при условии ее парообразования, т. е. при поднятии ее мпературы несколько выше температуры кипения. Таким обра м, процесс сушки как бы распадается на две стадии, обуслов ваясь достижением равновесия между внешней и внутренней ффузией.

Высушенный материал обладает гигроскопичностью, т. е. ьспособностью вновь поглощать до известного предела испарен о влагу.

Целью сушки строительных материалов и керамических изделий является полное или частичное удаление свободной влаги, в силу чего повышается крепость керамических изделий и масса материала подготавливается к обжигу.

При сушке как кусковых материалов, так и керамических изделий происходит испарение свободной влаги с открытых поверхностей, вызывающее подъем влаги по капиллярным сосудам из внутренних слоев куска или изделия. Скорость испарения влаги с поверхности, обуславливаемая внешней диффузией, по мере высыхания куска или изделия постепенно падает и доходит до нуля при удалении всей свободной влаги, после чего температуру куска или изделия необходимо поднять выше температуры парообразования, чтобы обеспечить удаление остаточной влаги за счет внутренней диффузии. Критическая точка влаготдачи различных материалов и изделий (например глины) колеблется в значительных пределах. Удаление влаги изменяет структуру материала и вызывает сокращение объема и веса керамических изделий (усадку изделий). При этом силы поверхностного натяжения, обуславливающие усадку (а также усадка при дальнейшем обжиге изделий), вызывают значительные внутренние напряжения в изделиях, приводящие к образованию трещин и торце изделий.

Если материал поступает в сушилку в жидком виде (например шлам при получении портланд-цемента по мокрому способу), испарение внешней влаги при высоких температурах сушки (200—500°) происходит очень интенсивно, скорость сушки превосходит скорость подачи влаги изнутри материала наружу, вследствие чего образуется корка, которая должна быть механически разрушена, во избежание торможения процесса сушки. Отчасти для этой цели во вращающихся цементнообжигательных печах навешиваются цепи, разбивающие подсохший шлам.

Основными условиями сушки являются: равномерность сушки; максимальная ее экономичность.

Сушка строительных материалов и керамических изделий должна производиться с оптимальной скоростью, которая в зависимости от предмета сушки колеблется в широких пределах, обуславливая тот или иной режим сушки. Практический режим сушки должен быть таким, чтобы количество влаги, удаляемой единицы поверхности изделия или материала в единицу времени, соответствовало количеству влаги, подаваемой капиллярами изнутри к наружным поверхностям, т. е. должна быть достигнута определенная скорость сушки. Если внешняя диффузия будет превосходить внутреннюю, образуется корка, резко понижающая скорость сушки.

Уменьшение усадки при сушке в керамических изделиях достигается добавлением отошающих глину веществ, каковыми являются шамот, кварцевый песок, древесные опилки и т. д. Количество шамота, как отошающего вещества, при изготовлении неупорного кирпича доходит до 80 проц. и выше. При изготовлении красного кирпича широко употребляется песок и в значительной степени — древесные опилки.

В целях более равномерной сушки практикуется предварительный прогрев изделий и материалов, который осуществляется горячим воздухом с высоким коэффициентом относительной влажности. При этом всегда избегают конденсации влаги на поверхности материала или изделий. В случае первоначального прогрева глины при температурах выше определенного предела и при условии полного насыщения воздуха водяными парами, глина теряет связывающие свойства и распаривается (раскисает), почему предварительный подогрев горячим воздухом, полностью насыщенным водяными парами, и производится весьма осторожно.

3. Классификация и конструкция сушилок

Существующие типы сушилок по основному принципу работы разбиваются на две группы: 1) сушилки периодического действия и 2) сушилки непрерывного действия. Первые в свою очередь подразделяются на сушилки открытого действия и камерные сушилки. Те и другие сушилки могут быть подразделены на группы в зависимости от схемы омыwania материалов или изделий горячим воздухом. Так сушилки периодического действия классифицируются по направлению движения, способу подачи и отдачи воздуха, по краткости его циркуляции, по взаимной связи между камерами и по месту подогрева воздуха. Сушилки непрерывного действия классифицируются по взаимному направлению движения воздуха и материала (прямоточные и противоточные), по направлению движения воздуха, по способу его подвода и отвода, краткости циркуляции воздуха и связи между зонами сушки. Кроме того, сушилки непрерывного действия в зависимости от движения материала делятся на барабанные, туннельные, камерные, шахтные, пневматические и др.

Основные требования, предъявляемые к обоим основным группам сушилок, сводятся к минимальному сроку сушки данного материала или изделия и максимальному использованию топлива (тепла) на испарение влаги.

Основное требование, предъявляемое к периодической сушилке, заключается в максимальной равномерности сушки в отдельных сечениях камеры. Так как температура и влажность омывающего сырой материал воздуха непрерывно меняются, это обстоятельство приводит к неравномерности сушки. Чем равномернее сушка, тем рациональнее конструкция камеры периодической сушилки. Вторым требованием является рациональное использование воздуха, который должен выходить из сушилки с максимальным влагосодержанием.

Основными показателями экономичности работы сушилок являются: 1) удельный расход воздуха на 1 кг испаренной влаги и 2) удельный расход тепла на 1 кг испаренной влаги. Первый показатель меняется в весьма широких пределах, в зависимости от конструкции сушилки и рода изделий, второй—всегда выше теоретического, составляющего 600 кал на 1 кг влаги, и колеблется в пределах 800—1400 кал/кг влаги.

Сушилки периодического действия

Сушилки периодического действия главным образом служат для сушки изделий строительной керамики и устанавливаются на заводах, где обжиг изделий в печах производится с небольшой начальной влажностью, тогда как свежесформованные изделия обладают значительно более высокой влажностью, например на кирпичных и черепичных заводах.

Сушилки открытого типа. Эти сушилки (рис. 74), являясь наиболее примитивными и строятся по бокам или над печами (надпечные сушилки). Они состоят из де-

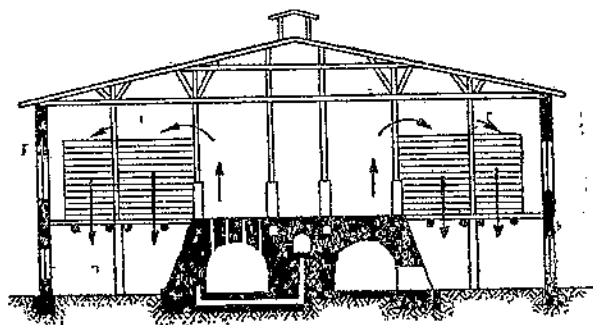


Рис. 74. Надпечная сушилка

ревянных стеллажей, на которых укладываются сырые изделия. Источником тепла обычно являются гофманские печи или периодические горны, в которых в период остывания материала открываются топливные трубочки или отбирается горячий воздух, устремляющийся вверх и омывающий сырые изделия.

В открытых сушилках сушка не поддается регулированию, отчего неравномерность сушки в них весьма значительна, весь процесс не организован и потери горячего воздуха достигают больших размеров. Если тепла из печей недостаточно для сушки, устраивают топливники для подогрева чистого воздуха. Кроме того, в целях лучшей организации воздушного хозяйства воздух иногда распределяется по сушилке специальным вентиляционным устройством.

Камерные сушилки. Наиболее примитивная камерная сушилка представлена на рис. 75. В ней горячий воздух поступает из

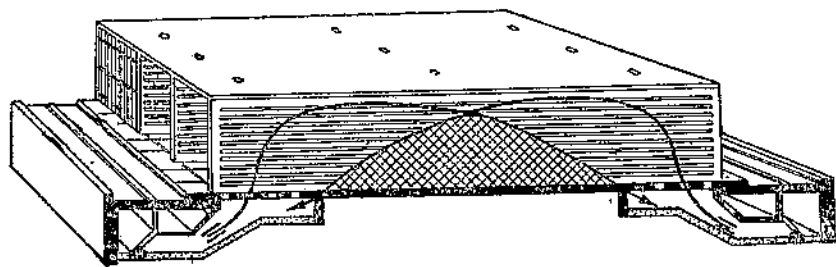


Рис. 75. Простейшая камерная сушилка

распределительного канала, проходящего в одном конце под камерой сушилки, и удаляется снизу камеры в канал, проходящий в другом ее конце. Благодаря такому подводу в камере соз-

дается мертвое пространство (на рис. 75 заштриховано), что приводит к значительной неравномерности сушки изделий. Указанная сушилка применяется для сушки изделий строительной керамики и является сушилкой однократного насыщения с сосредоточенным в одном месте подводом и отводом воздуха. Возможна блокировка камер, т. е. камеры устанавливаются друг с другом рядом и соединяются общими каналами.

В сушилке типа завода Крафт (рис. 76) горячий воздух подводится через два верхних канала и, двигаясь в обе стороны по камере, отводится расположенными по сторонам нижними

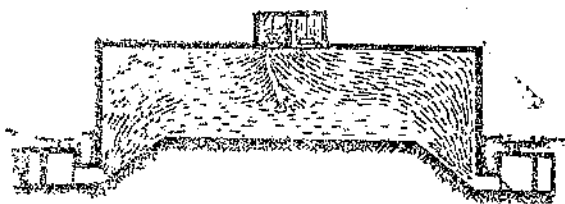


Рис. 76 Сушилка типа завода Крафт

каналами. Эти каналы соединены со всеми камерами, так как камеры располагаются в один ряд. Переключая клапаны, можно пропускать через камеру отработавший в предыдущих камерах

воздух снизу вверх, и осуществлять сушку кирпича-сырца после его загрузки в камеру на влажном режиме, т. е. на теплом влажном воздухе, после чего каналы переключаются на сухой режим сушки, т. е. на сушку свежим, сухим воздухом.

Таким образом используется воздух, отработавший в камерах досушки кирпича. В этой сушилке неравномерность сушки меньше, чем в предыдущей, но также имеет место.

В сушилке системы Бюрера воздух подводится и удаляется в горизонтальном направлении через стенки сушилки, снабженные большим количеством щелей, что весьма удобно при сушке плоских изделий.

Сушилка системы Ростромпроекта (рис. 77) имеет три канала, расположенных на уровне пола, из которых два крайние канала служат для подвода горячего, воздуха, а средний канал — для отвода отработанного. Каналы по всей длине перекрыты плитами с распределенными отверстиями. Горячий воздух, устремляясь вверх, увлекает за собой часть опускающихся струй охлажденного воздуха и, подогревая их вновь, заставляет многократно циркулировать в камере; при этом в средний канал через щели попадают лишь наиболее тяжелые струи остывшего воздуха. Для большей равномерности сушки сечения отводящих воздух щелей должны регулироваться.

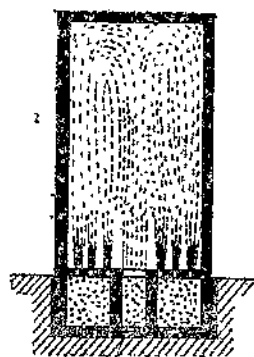


Рис. 77. Сушилка типа Ростромпроекта

В сушилке Н. В. Соколова расположение каналов аналогично предыдущей сушилке, но боковые каналы для горячего воздуха соединены с бороздами, выложенными в стенках камеры. Часть горячего воздуха поступает в камеру через борозды, ос-

новая же масса подымается по бороздам в верхнюю часть камеры, заполняет подпотолочное пространство и нисходящим потоком опускается в отводящий сборный канал. При этом более легкие и горячие струи вновь подхватываются и нагреваются восходящими из нижней части борозд горячими струями воздуха, создавая многократную циркуляцию.

Кроме указанных конструкций, имеется большое разнообразие других видов камерных сушилок, различающихся между собой по направлению движения воздуха, краткости его циркуляции и пр. Все они представляют собой изолированные камеры с одной двумя или тремя колеями, по которым вкатываются вагонетки с сырыми изделиями и после сушки выкатываются. Режим сушки устанавливается в зависимости от физико-технических особенностей изделий и типа камерной сушилки и колеблется в значительных пределах. Теплоносителем является нагретый от 50° до 200° воздух, поступающий или из зон охлаждения печей, или из калориферов.

В США сушка изделий производится в сушилках при постоянной температуре порядка $40-50^{\circ}$. Для этой цели употребляются камерные сушилки.

Сушилки непрерывного действия

Барабанные сушилки получили весьма широкое распространение для сушки различных топлив, глины, известняков, добавок и пр. Сушильный барабан состоит из клепаного железного цилиндра длиной от 10 до 24 м и диаметром от 0,6 до 2,8 м (рис. 78). Для продвижения материала цилиндр слегка наклонен

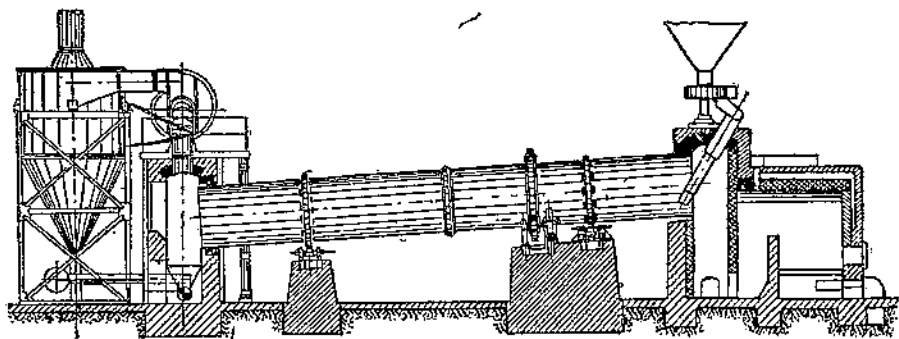


Рис. 78: Схема сушильного барабана

и медленно вращается. Угол наклона к горизонту обычно составляет от 4° до 6° при 0,7—6 об/мин. В случае горизонтального расположения барабан снабжается винтовыми направляющими лопастями, с помощью которых передвигается материал. При наклоне барабана сырой материал поступает из бункера, передвигается вдоль барабана по винтовой линии и высыпается через специальную точку — в шнек, транспортирующий сухой материал на склады или в мельничные бункера.

По принципу действия барабанные сушилки разделяются на прямоточные, противоточные и смешанного принципа действия. В прямоточных барабанах материал и горячие газы движутся в одном направлении (параллельно друг другу); в противоточных навстречу друг другу, а в барабанах смешанного действия — сначала прямотоком, затем противотоком, или наоборот.

Прямотоком сушат материалы с большой начальной влажностью, которые в силу своих физико-технических свойств не допускают перегрева при выходе из барабана, например топлива с большим содержанием летучих, шлак и т. д. Противотоком можно сушить топливо с малым содержанием летучих (антрациты), а также материалы, не боящиеся перегрева, например известняк.

Сушильные барабаны снабжаются топкой, состоящей из ручной колосниковой или цепной решетки, снабженной искусственным дутьем; а также шахтной или пылевидной топкой. Горячие газы, пройдя через порог топки, поступают в смесительную камеру, где разбавляются холодным воздухом до необходимой температуры и затем поступают во внутреннюю полость барабана по ходу материала или против его хода. Материал ссыпается в барабан из бункера через питательную тарелку, регулируемую слой материала, и питательную трубу.

Внутри железного барабана наклепаны швеллерные балки, полочки и ячейки (рис. 79), которые в силу вращения барабана

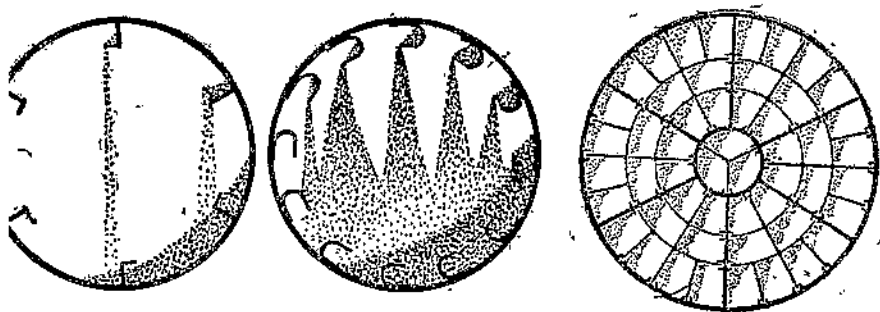


Рис. 79. Перемешивающие устройства сушильного барабана

одымают и сбрасывают материал, смываемый при падении вижущимися горячими газами. Чем лучше происходит перемешивание материала с газовым потоком, тем скорее происходит ушка и тем выше производительность барабана.

Охлажденные в барабане дымовые газы и воздух вместе с одыными парами и пылью отсасываются дымососом, который направляет их в пылеотделительные бункеры или камеры, откуда, после осаждения пыли, они выходят в атмосферу. В качестве пылеотделителей употребляются также циклоны и электрофилтры, устанавливаемые перед дымовой трубой.

Сушильные барабаны при помощи двух бандарей опираются на две пары роликов, установленных на фелезоберных фундаментах. Каждый барабан снабжается приводом, передающим барабану вращение от мотора или трансмиссии, причем последняя (венцовая) шестерня насаживается непосредственно на корпус барабана. Конструкция опорных приспособлений почти не отличается от таковых во вращающихся печах.

Основными характеристиками работы сушильных барабанов являются следующие:

1) производительность сушильных барабанов по сырому или сухому материалу (в кг/час),

2) напряжение сушильного объема барабана по влаге, т. е. количество влаги, испаряемое в час с 1 м^3 просветного объема барабана (в $\text{кг/м}^3 \text{ час}$),

3) удельный расход тепла на сушку, т. е. расход тепла на 1 кг выпаренной влаги (в кал).

В зависимости от размеров и начальной влажности материала, сушильные барабаны проектируются на производительность от 2,0 до 15,0 т/час по сухому материалу.

Напряжение сушильного объема барабана по влаге характеризует скорость сушки материала и зависит от начальной и конечной влажности материала, начальной и конечной температуры сушки, степени заполнения барабана материалом и др. факторов и колеблется от 10 до 100 $\text{кг/м}^3 \text{ час}$.

Условный расход тепла на сушку колеблется от 900 до 1200 кал/кг .

Основные характеристики сушки различных материалов в сушильных барабанах сведены в табл. 46.

Таблица 46.

Основные характеристики сушки различных материалов в прямоточных лопастных сушильных барабанах

Материал	Влажность материала (в проц.)		Температура сушки (в °С)		Напряжение по влаге (в $\text{кг/м}^3 \text{ час}$)
	начальная	конечная	начальная	конечная	
Подмосковный уголь . . .	30	10	430	120-150	40
" " " " . . .	30	15	430	125	60
" " " " . . .	30	25	430	60	100
Каменный уголь	15	1	750	80-100	60
Антрацитовый штыб . . .	11,5	3,2	400	88	23,6
Сланцы	28	7	376	105	39
Торф (фрезерный)	45,5	12,5	450	100	67
Глина	24,5	2,7	800-1000	60	68
Мергель ¹	10-15	1,5	10°0	80	45
" " " " . . .	8-10	0,5	1000	120	30
Инфузорная земля	41,0	16,0	550	120	50
Фосфориты	6	0,5	600	140	54

¹ Противоток.

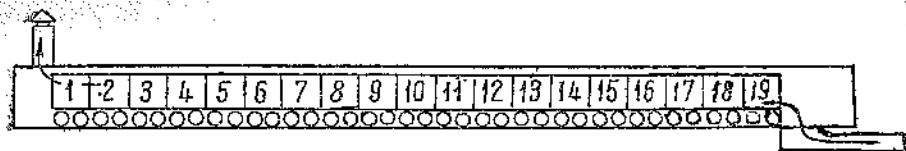


Рис. 80. Противоточная туннельная сушилка

В СССР в настоящее время строятся почти исключительно прямоточные ячейковые сушильные барабаны длиной от 8,0 до 14,0 м и диаметром от 1,5 до 2,8 м, при этом толщина наружных стенок барабана колеблется от 10 до 14 мм. Объем сушильного пространства — от 14,1 до 86, 2 м³ при общем количестве ячеек от 25 до 51. Число оборотов барабана составляет 5 в мин. Общий вес барабана — от 13,6 до 70,0 т и расход мощности — от 8 до 35 ЛС.

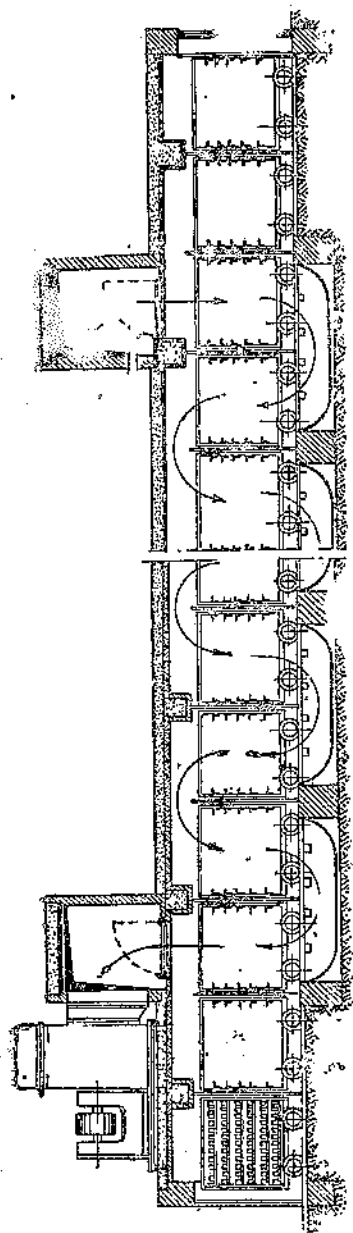
Туннельные сушилки. К туннельным сушилкам относятся противоточные и прямоточные сушилки с зависимыми и независимыми зонами сушки.

На рис. 80 изображена простая противоточная туннельная сушилка, загруженная вагонетками с сырыми изделиями, движущимися навстречу горячему воздуху. Последний подается снизу в одном конце туннеля и отводится в верхней его части в противоположном конце. Длина туннеля около 30 м, ширина 1—1,2 м и высота 1,8—2,0 м.

Сушилка фирмы Меллер и Пфайфер представляет собой противоточный туннель, аналогичный вышеописанному, с распределенным подводом и отводом воздуха, который подводится и отводится на длине, составляющей около $\frac{2}{3}$ длины туннеля. Длина туннеля обычно не превышает 30—35 м, ширина достигает до 5—5,5 м.

В сушилке системы Артемкина (рис. 81) туннель снабжен

Рис. 81. Сушилка системы Артемкина



выступами, расположенными поперек перекрытия и приямками под вагонетками, причем вагонетки разделены деревянными щитами. Благодаря этому создается вертикальное движение воздуха, который в процессе передвижения вагонеток смывает материал снизу вверх или сверху вниз, чем достигается большая равномерность сушки. Сушилки системы Артемкина хорошо работают, но сложны в выполнении.

При сушке керамических изделий находят применение цепные сушилки, в которых движется бесконечная лента с полочками, несущими изделия от формовочного станка до выхода из сушилки. При этом лента проходит извилистый длинный путь, по которому в различных местах поступает горячий воздух с различной температурой и различной влажностью.

К прямооточным сушилкам относится сушилка системы Меллер и Пфейфер (рис. 82), работа которой основана на следую-

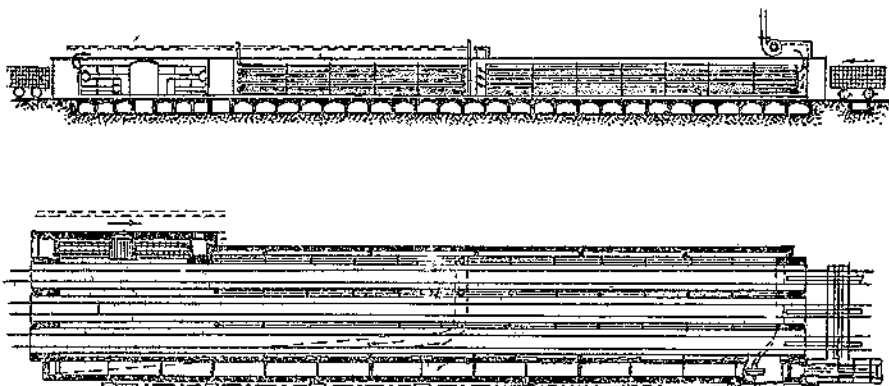


Рис. 82. Сушилка системы Меллер и Пфейфер

щем принципе. Так как при сушке керамических изделий воздух требует постепенного подогрева, в туннеле обычно предусматриваются три различных зоны подогрева. В первой со стороны загрузки зоне, занимающей около половины длины туннеля, между путями устанавливаются калориферы из гладких или ребристых труб, обогреваемые горячим воздухом, отработавшим в третьей зоне сушилки; во второй зоне калориферы обогреваются паром и в третьей зоне, где температура воздуха доходит до $120-140^{\circ}$, калориферы обогреваются продуктами горения из специальной топки. Воздух поступает в туннель со стороны его разгрузки и постепенно нагревается, причем для создания поперечного движения воздуха через каждые 5 м по длине туннеля устанавливаются винтовые вентиляторы и устраиваются подподовые каналы. Через окна в канале отработавший воздух отсасывается вентилятором.

Длина туннеля Меллер и Пфейфер колеблется от 30 до 52 м, ширина от 6,5 до 10,5 м, при высоте туннеля 2,0 м и числе путей от 2 до 5.

К туннельным сушилкам с независимыми зонами следует отнести сушилку системы В. Е. Грум-Гржимайло (рис. 83).

В этой сушилке поток воздуха равномерно поступает в камеру через щели каналов, нагревается ребристыми трубами и поднимается в верхнюю часть камеры, часть опускается вниз и отводится через щели другого канала. При этом часть воздуха вновь подсасывается восходящими потоками, создавая многократную циркуляцию, уменьшающую температурный перепад по высоте туннеля.

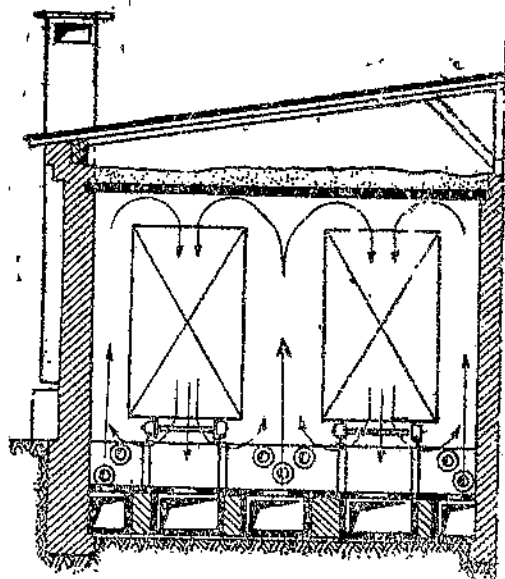


Рис. 83. Сушилка системы В. Е. Грум-Гржимайло

В эжекционных сушилках Керьера принудительно осуществляется принцип многократной циркуляции при помощи вентилятора, нагнетающего подогретый трубами воздух в короб с коническими насадками. Часть отработавшего воздуха удаляется, часть возвращается обратно, вторично нагреваясь тру-

бами. При этом каждая камера регулируется самостоятельно. В сушилке американской системы Проктор каждая зона имеет самостоятельную отопительно-вентиляционную систему, отделяясь от смежных зон специальными шторами.

Пневматические сушилки

В пневматических сушилках сушка материалов производится в процессе их транспортирования по вертикальным трубам, т. е. в взвешенном состоянии. Для этой цели материалы предварительно дробятся и, сыпаясь в трубу-сушилку, подхватываются мощным потоком горячего воздуха, который с большой скоростью движется по трубе. Процесс сушки заканчивается в течение 1—5 секунд, пока материал движется по трубе-сушилке потоке горячего воздуха. В последнее время таким образом сушатся каменные угли, торф, сланцы, причем возможен также жиг гипса и глины.

Принципиальная схема пневматической сушилки для сушки взвешенном состоянии сырого угля приведена на рис. 84. Сырой уголь поступает по течке 1 в вертикальную трубу-сушилку 2, в нижней части которой подводится смесь воздуха и почных газов. Высушенный уголь выносится газо-воздушным током в сепаратор 3, из которого крупные частицы сырого

угля возвращаются через дробилку 4 обратно в трубу для вторичной их подсушки.

Сушка дробленых и сыпучих материалов во взвешенном состоянии является наиболее экономичной, причем напряжение сушильного объема трубы по влаге достигает 350 кг/час . Высокая производительность труб-сушилок в соединении с мельницами, которые также вентилируются горячим воздухом для окончательной досушки материала, позволяют применять этот способ при сушке высоковлажных углей в крупных котельных электростанциях. Так, например, на Сталиногорской электростанции средняя часовая производительность трубы-сушилки составляет 25 т/час по сырому подмосковному углю; температура газозвдушного потока перед трубой-сушилкой около 540° , понижаясь до $100-130^\circ$ у входа в сушильный вентилятор; начальная влажность угля — 34 проц., конечная его влажность при выходе из трубы-сушилки — 24 проц.; расход энергии на 1 т высушенного угля — $6,5 \text{ квт-ч}$.

Расход тепла на сушку во взвешенном состоянии составляет от 1000 до 1200 кал/кг испаренной влаги.

В мельнице в процессе размола происходит дальнейшая сушка угля до влажности 12 — 14 проц.

Обезвоживание гипса также производится в процессе его размола с последующей досушкой перемолотого продукта в вертикальной трубе. Такой способ подсушки очень экономичен и получает все большее распространение.

В настоящее время на Московском алебастровом заводе находится в эксплуатации установка для обезвоживания гипса сист. Б. А. Козлова. Схема установки приведена на рис. 85.

Схема работы установки сводится к следующему: сырой гипсовый камень, предварительно раздробленный в дробилке 1 до $0-15 \text{ мм}$ при помощи элеватора 2 и питателя подается в быстроходную мельницу 3, в которую из смесительной камеры специальной топки 4 подается газозвдушная смесь с температурой $300-450^\circ$. В процессе размола гипс обезвоживается и выносятся из мельницы сильной струей воздуха в сепаратор 5, где происходит отделение крупных фракций гипса, возвращающихся по трубе 6 обратно в мельницу. Из сепаратора 5 измельченный гипс поступает в обжигательную трубу 7 для окончательного обезвоживания (до содержания остаточной влаги 6,5%), и в циклон 8, в котором происходит осаждение крупных фракций алебаstra, транспортируемых шнеком 9 в силосы 13. Мелкие фракции осаждаются в специальном фильтре 10,

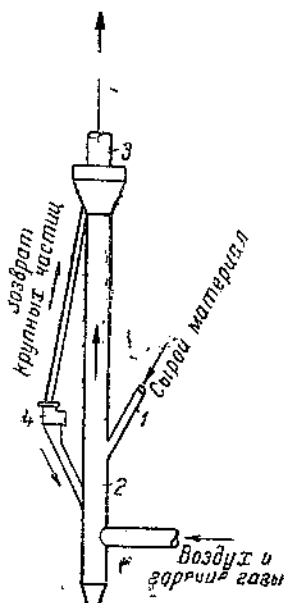
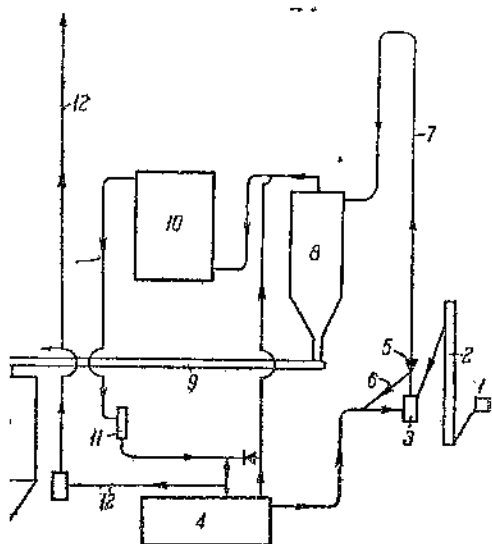


Рис. 84. Схема сушилки во взвешенном состоянии

которого очищенный газовоздушный поток отсасывается тилатором 11 и подается последним частично в смесительную камеру толки, частично же выбрасывается через камеру и выхлопную трубу 12 — наружу.



85. Схема установки для обезвоживания гипса

тиляторными установками, через которые проходит газовый ток. Употребляются главным образом для сушки руды, поваренной соли и материалов, содержащих только поверхностную

4. Вентиляционная система сушилок

Для перемещения воздуха и газов в сушильной установке необходимо создание разности напоров по пути движения газов. Как создаваемый напор затрачивается на преодоление сопротивлений, возникающих по пути движения газов, эти сопротивления должны быть замерены или определены расчетом. Сопротивления складываются из сопротивлений на входе газового потока в поверхности каналов, сопротивления в трубах сушилки и местных сопротивлений, возникающих вследствие изменений скорости движения газов или их направления. Сопротивления на трение находятся из таблиц в зависимости от диаметра трубы и скорости движения, причем прямоугольного сечения предварительно сводятся к условному (эквивалентному в отношении трения) каналу круглого сечения, а скорость делается при действительной температуре воздуха или газов. Сопротивления камер сушилок обычно незначительны; согласно К. А. Нохратян их можно принимать при скоростях движения воздуха в туннеле $1-1,5 \text{ м/сек}$ в 1 мм вод. ст. на каждые 10 м длины туннеля. Сумма сопротивлений соответствует требуемому вентилятором статическому напору.

Для преодоления сопротивлений и перемещения газов в сушильной системе применяются центробежные и осевые вентиляторы.

Центробежные вентиляторы строятся с максимальной производительностью до 150 000 м³/час и делятся на вентиляторы высокого давления, (свыше 200 мм вод. ст.), среднего давления (от 100 до 200 мм вод. ст.) и низкого давления (до 100 мм вод. ст.). Коэффициент полезного действия их колеблется от 0,4 до 0,5, причем обычные вентиляторы применяются при температуре воздуха до 200°С. При более высоких температурах применяются вентиляторы дымососного типа. Размеры вентиляторов подбираются по каталогам.

Осевые вентиляторы создают горизонтальное движение воздуха и чаще всего применяются для создания в сушилках внутренней циркуляции воздуха при небольших сопротивлениях. В осевых вентиляторах ЦАГИ напор до 30 мм вод. ст. обычно достигим при расходах воздуха меньше 10 000 м³/час; при расходах от 10 000 до 100 000 м³/час напор достигает 60 мм вод. ст. и при больших расходах — 100 мм вод. ст. Коэффициент полезного действия вентиляторов ЦАГИ—0,6, причем эти вентиляторы могут работать реверсивно.

Расход мощности на валу вентилятора составляет:

$$Q = \frac{Q_{\text{сек.}} h_{\text{ст.}}}{75 \eta_v} \text{ ЛС}$$

или в киловаттах

$$N = \frac{Q_{\text{сек.}} h_{\text{ст.}}}{75 \eta_v} \cdot 0,736 \text{ кВт},$$

где: $Q_{\text{сек.}}$ — секундный расход воздуха (м³/сек),
 $h_{\text{ст.}}$ — статическое сопротивление системы (в мм вод. ст.),
 η_v — коэффициент полезного действия вентилятора.

В барабанных сушилках напор расходуется на преодоление сопротивления слоя топлива в топке, сопротивления барабана, сушилки и обеспыливающего устройства и составляет от 20 до 40 мм вод. ст. Во избежание уноса большого количества высушенного материала, средняя скорость газо-воздушного потока в барабане не превосходит 1,5 м/сек. При этом разрежение в топке бывает недостаточным для преодоления сопротивления слоя топлива, почему воздух подается в топку барабана специальным вентилятором поднапором 30—70 мм вод. ст.

Для улавливания уноса пыли из сушильных барабанов применяются всевозможные пылеотделительные устройства, из которых наибольшее распространение имеют циклоны, пылеотделительные камеры, матерчатые фильтры и электрофильтры. Уловленная пыль транспортируется шнеками и смешивается с высушенным материалом.

В пневматических сушилках общая сумма сопротивлений достигает значительных величин и требует оборудования системы мощными вентиляторами, напор которых колеблется в пределах 350—400 мм вод. ст. (при вентиляции мельниц) и доходит

о 700—900 мм вод. ст. В качестве пылеотделительных устройств также применяются циклоны, матерчатые фильтры и электро-
 фильтры.

5. Основные расчетные и эксплуатационные данные сушильных установок

Расчет сушильных установок производится, исходя из основ-
 ых характеристик сушки, к которым относятся:

- 1) производительность сушильной установки,
- 2) вес сырого материала или вес изделий после формовки,
- 3) начальная влажность материала или изделий,
- 4) конечная их влажность после сушки,
- 5) продолжительность и режим сушки,
- 6) расход тепла и топлива на сушку.

Срок и режим сушки до настоящего времени теоретически
 не могут быть рассчитаны и определяются на основании лабо-
 раторных или экспериментальных данных. Средние величины
 начальной и конечной влажности различных материалов приво-
 дятся в табл. 47; вес сырых изделий и количества влаги в них—
 табл. 48.

Т а б л и ц а 47

Материал	Влажность (в проц.)	
	начальная	конечная
Глина	16,0—25,0	5,0—8,0
Известняк	5—10,0	0,5—2,0
Мергель	8—20,0	1,0—2,0
Металлургический шлак	23—22,0	1,0—3,0
Инфузорная земля	40,0	2,0—10,0
Подмосковный уголь	30—32,0	5,0—10,0
Каменные угли	10,0—15,0	1,0—2,0
Антрацитовый штыб	7,0—12,0	1,0—3,0
Фрезерный торф	35,0—45,0	10,0—14,0
Горючие сланцы	10,0—25,0	5,0—7,0

Т а б л и ц а 48

Изделия	Размеры (в мм)	Вес после формовки (в кг)	Влажность (в кг)	
			после формовки	после сушки
Кирпич шамотный	230 × 112 × 65	4,0	0,8	0,1
Кирпич красный	250 × 120 × 65	4,5—4,6	0,9—1,0	0,1—0,2
Черепица	280 × 420 × 20	3,0—3,2	0,6—0,7	0,1—0,2

При заданных условиях определяется количество и расход воздуха и тепла, составляется тепловой баланс сушилки и рассчитывается вентиляционная сеть.

Ориентировочные величины удельного расхода воздуха и тепла приводятся в табл. 49.

Таблица 49

Тип сушилки	Расход тепла (в кал/кг)	Расход воздуха (в кг/кг)
Камерные сушилки		
Система Керьера	1000—1100	40—45
„ Росстромпроекта	1100—1200	45—50
„ Грум-Гржимайло	1100—1200	45—50
„ Соколова	1300—1400	55—60
„ Завода Крафт	1600—1800	65—70
Туннельные сушилки		
Противоточный туннель	1000—1100	—
Прямоточный туннель системы Меллер и Пфейфер	1000—1100	—
Барабанные сушилки	900—1300	3,0—12,0
Пневматические сушилки (сушка во взвешенном состоянии)	1000—1200	3,0—5,0
Сушка в процессе размола	700—1000	2,5—4,0

Тепловой баланс составляется или на основании данных испытаний сушилки, или на основании расчетных данных, причем ввиду колебаний основных параметров сушки, он составляется для зимнего и летнего периодов работы сушилки.

В табл. 50 приведены примерный тепловой баланс для камерной сушилки системы Росстромпроекта, запроектированной для сушки красного кирпича, причем срок сушки принят 95 часов и температура поступающего в сушилку воздуха 120°, а также тепловые балансы барабанной сушилки и трубы-сушилки для сушки во взвешенном состоянии. Балансы тепла приводятся по эксплуатационным данным.

Новая сушилка по окончании монтажа всех ее деталей вступает в пусковой период, в течение которого производится:

1) проверка выполнения всех деталей установки и исправление выявленных недостатков,

2) изучение эксплуатационных особенностей всех деталей установки и всей установки в целом,

3) установка эксплуатационного режима сушки данных материалов или изделий и регулировка всей системы в целом,

4) подготовка обслуживающего персонала и ознакомление его как с работой сушилки, так и установленным режимом сушки.

Балансы тепла сушильных установок

	Типы сушилок					
	Камерная		Барабанная		Пневматическая	
	кал/кг	проц.	кал/кг	проц.	кал/кг	проц.
Приход тепла						
1. Тепло, вносимое в сушилку	1588	100	1149	100	1350	100
Расход тепла						
1. На испарение влаги	618	38,9	614	53,5	676	50,0
Потери тепла;						
2. С отходящими газами	735	46,4	166	14,5	491	36,4
3. С выходящим из сушилки материалом	61	3,8	42	3,5	177	13,1
4. В окружающее сушилку пространство, уносимого транспортом в камерной сушилке и в топке барабанной сушилки	174	10,9	327	28,5	6	0,5
Всего	1588	100	1149	100	1350	100

После пускового периода производится приемно-сдаточное (генеральное) испытание сушильной установки в целом и отдельных ее деталей.

Эксплуатация сушилок сводится к поддержанию нормальных условий работы сушилки, устранению возникающих недостатков и периодическому ремонту отдельных деталей установки. Особенное внимание должно быть обращено на герметичность системы, во избежание возможных подсосов или выбиваний воздуха, а также на регулирование системы. Сушильная установка должна быть снабжена контрольно-измерительной аппаратурой, способствующей поддержанию установленного режима сушки, причем режим и работа должны периодически полностью проверяться.

