



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
УПРАВЛЕНИЕ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ
КВАЛИФИКАЦИИ

Кафедра «Технология вяжущих веществ, бетонов и
строительной керамики»

Учебное пособие

«Теплотехническое оборудование промышленности строительных материалов и изделий»

Авторы
Халюшев А.К.,
Стельмах С.А.,
Щербань Е.М.,

Ростов-на-Дону, 2017

Аннотация

Содержатся основные понятия, определения, теоретические основы теплотехнического оборудования промышленности строительных материалов и изделий. Представлены и описаны основные процессы, аппараты, технологии, оборудование, установки.

Предназначено для обучающихся по направлению подготовки «Строительство», профилям «Производство строительных материалов, изделий и конструкций», «Механическое оборудование и технологические комплексы предприятий строительных материалов, изделий и конструкций»

Авторы

к.т.н., доцент кафедры «ТВВБиСК» Халюшев А.К.,

к.т.н., доцент кафедры «ТВВБиСК» Стельмах С.А.,

к.т.н., старший преподаватель кафедры «ТВВБиСК» Щербань Е.М.

Оглавление

Введение	6
ОСНОВЫ ТЕПЛОТЕХНИКИ	8
Основные понятия технической термодинамики.....	8
Основные понятия состояния газа	8
Уравнение состояния идеального газа.....	10
Теплоемкость газов и газовых смесей	10
Законы термодинамики.....	12
ВОДЯНОЙ ПАР. ВЛАЖНЫЙ ВОЗДУХ	14
Уравнение состояния идеальных газов	14
Процесс парообразования	14
Параметры водяного пара	16
Влажный воздух	17
Параметры влажного воздуха.....	18
ОСНОВЫ ТЕОРИИ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ	19
Виды передачи теплоты	19
Теплопроводность	21
Конвективный теплообмен	23
Теплообмен излучением	24
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕПЛОВЛАЖНОСТНОЙ	
ОБРАБОТКИ	26
Физико-химические процессы, проходящие в бетоне при теповлажностной обработке	26
Режимы тепловлажностной обработки	29
Классификация установок для тепловлажностной обработки	33
УСТАНОВКИ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ ДЛЯ	
ТЕПЛОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ БЕТОННЫХ И	
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ.....	36
Ямные камеры	36
Стенды формования и паропрогрева	41

Термоформы.....	45
Кассетные установки	50
Автоклавные установки	54
УСТАНОВКИ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ.....	57
Горизонтальные пропарочные камеры щелевого типа.....	57
Полигональные пропарочные камеры щелевого типа.....	60
Пропарочные камеры с разным уровнем зон	62
Вертикальные пропарочные камеры.....	63
Вибропрокатные станы	65
ЭЛЕКТРОТЕРМООБРАБОТКА БЕТОНА	68
Общие положения	68
Электродный прогрев бетона	69
Контактный электрообогрев	71
Инфракрасный прогрев	73
Индукционный прогрев.....	75
ТОПЛИВО И ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ	79
Классификация топлива	79
Процесс горения топлива и принципы его сжигания	81
Виды теплоносителей.....	82
Получение теплоносителей	85
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СУШКИ	92
Влагосодержание материала	92
Тепло- и массообмен в процессе сушки	93
Периоды процесса сушки.....	94
Напряжения и деформации в процессе сушки	97
Основные принципы расчета сушильного процесса.....	99
Влияние режимов сушки на качество материала	102
Классификация сушильных установок	102
СУШИЛКИ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ	104
Шахтные и газослоевые сушилки	104
Барабанные сушилки	107
Контактные сушилки	109
Конвейерные сушилки	110
Пневматические сушилки	111

УСТАНОВКИ ДЛЯ СУШКИ ИЗДЕЛИЙ 113

Камерные сушилки	113
Тоннельные сушилки	114
Сушилки для листовых изделий	116
Сушилки с использованием электроэнергии, перегретого пара и жидкостей	118

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ 123

Общие сведения	123
Обжиг вяжущих веществ	125
Обжиг керамических изделий	128
Процессы вспучивания и спекания	129
Процессы плавления	132

КОНСТРУКЦИИ УСТАНОВОК ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ 134

Классификация печей	134
Вращающиеся печи	136
Шахтные печи	140
Агломерационные машины	147
Печи для обжига керамических изделий	149

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 154

ВВЕДЕНИЕ

Основными задачами, стоящими перед специалистами строительной индустрии, являются: внедрение новых ресурсо- и энергосберегающих технологий, применение экономичных материалов и конструкций, использование современных методов организации производства и труда.

В строительной индустрии приоритетным направлением является реконструкция и модернизация существующих технологических линий с целью повышения их экономической эффективности.

Наиболее распространенным способом сокращения длительности изготовления железобетонных изделий и конструкций является их тепловая обработка. Тепловая обработка составляет в среднем треть стоимости изготовления материалов и изделий и занимает более 80% длительности технологического цикла.

Сокращение времени тепловой обработки на 10% приведет к сокращению времени изготовления железобетонных изделий на 1...2 часа. В тоже время сокращение времени формовки изделия на 10% даст экономию времени только 2...3 мин.

Тепловая обработка сырья при производстве строительных материалов позволяет придать ему новые, качественно отличные свойства.

Спектр используемых строительных материалов чрезвычайно широк. Каждый из видов материалов обладает специфическими свойствами и характеристиками.

Вид применяемой тепловой обработки, ее температурно-влажностный режим зависят от: химического состава сырья, особенностей строения, требований предъявляемым к материалам и конструкциям.

Например, для ускорения процесса твердения изделий из бетона на портландцементе производят тепловлажностную обработку при температуре около 100°C. Сохранение влаги необходимо для гидратации цемента. В силикатных бетонах взаимодействие кремнезема с известью начинает идти с заметной скоростью только при температуре 170...200°C.

Совмещение каменных материалов с вяжущим при производстве дегтебетонных смесей ведут при 110...120°C, укладку при температуре смеси 60...90°C. Для асфальтобетонной смеси, в зависимости от марки битума 130...150°C и 80...110°C соответственно.

Некоторые изделия в процессе производства подверга-

ются только сушке. Например, гипсовые блоки, гипсовая сухая штукатурка.

Часть материалов получают путем первоначальной сушки и последующей высокотемпературной обработки, например, керамзит, клинкер цементов.

Для проектирования тепловых установок и расчета режимов ТВО вы должны знать основные законы термодинамики.

Теплотехника – область науки и техники, занимающаяся вопросами получения и использования теплоты. Различают два вида использования теплоты – энергетическое и технологическое. Энергетическое использование теплоты основывается на процессах, преобразующих теплоту в механическую работу. Эти процессы изучаются технической термодинамикой. Энергетические устройства, в которых осуществляется преобразование теплоты в работу, называют тепловыми двигателями.

Технологическое использование теплоты основывается на реализации теплоты для целенаправленного изменения физико-химических свойств при осуществлении различных технологических процессов. К устройствам, в которых непосредственный подвод теплоты используется для технологических целей, относятся различные печи, сушилки, отопительные приборы, установки тепловлажностной обработки изделий и т.д.

Наука, изучающая закономерности теплообмена между телами, называется теорией теплопередачи. Техническая термодинамика и теория теплопередачи составляют теоретическую часть теплотехнической науки.

Одним из основоположников теплотехники был М. В. Ломоносов. Его классические труды, опубликованные в 1740–1750 гг., лежат в основе последующего развития теплотехники.

ОСНОВЫ ТЕПЛОТЕХНИКИ

Основные понятия технической термодинамики

Технической термодинамикой называется наука о свойствах тепловой энергии и законах взаимопреобразования тепловой и механической энергии. Техническая термодинамика положена в основу изучения и усовершенствования всех тепловых двигателей.

Как известно из практики, во взаимопреобразовании тепловой и механической энергии участвует рабочее тело. Как правило, это газообразные тела – газы и пары. Использование в качестве рабочего тела газов и паров объясняется тем, что они, обладая большим коэффициентом теплового расширения, могут при нагревании совершать гораздо большую работу, чем жидкости и твердые тела.

В термодинамике приняты два понятия о газе.

Реальными газами называют газы, молекулы которых обладают силами взаимодействия и имеют конечные, хотя и весьма малые, геометрические размеры.

Идеальными газами называют газы, молекулы которых не обладают силами взаимодействия, а сами молекулы представляют собой материальные точки с ничтожно малыми объемами.

Понятие об идеальном газе введено для упрощения изучения термодинамических процессов и получения более простых расчетных формул.

Водяной пар рассматривают как реальный газ, к которому нельзя применять законы, установленные для идеальных газов. Все реальные газы являются парами тех или иных жидкостей; при этом чем ближе газ к переходу в жидкое состояние, тем больше его свойства отклоняются от свойств идеального газа.

Основные параметры состояния газа

К основным параметрам состояния газов относятся: давление, температура и удельный объем.

Давление – сила, действующая на единицу площади поверхности тела перпендикулярно последней. Единица измерения $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н} / 1 \text{ м}^2$. Давление газа – это средний результат силового воздействия большого числа молекул газа на внутреннюю поверхность сосуда, в котором заключен газ.

В технике различают *абсолютное давление* $p_{\text{абс}}$, *избыточное давление* $p_{\text{изб}}$ и разрежение $p_{\text{в}}$. Под абсолютным давлением под-

разумеается полное давление, под которым находится газ. Под избыточным давлением понимают разность между абсолютным давлением, большим, чем атмосферное, и атмосферным давлением. Разрежение (вакуум) характеризуется разностью между атмосферным давлением и абсолютным давлением, меньшим, чем атмосферное.

Взаимосвязь между данными видами давления газа выражается формулами (1.1, 1.2).

$$p_{абс} = p_б + p_{изб} \quad (1.1)$$

$$p_{абс} = p_б - p_в \quad (1.2)$$

где $p_б$ – атмосферное давление по барометру.

Приборы, служащие для измерения давления газа больше атмосферного, называются манометрами и показывают избыточное давление газа над атмосферным. В практике избыточное давление называют манометрическим давлением. Для измерения давления меньше атмосферного применяются вакуумметры, показывающие насколько давление газа ниже атмосферного.

Температура – параметр, характеризующий тепловое состояние тела. Температура тела, являясь мерой хаотического движения его молекул, определяет направление возможного самопроизвольного перехода теплоты от тела с большей температурой к телу с меньшей температурой.

В СНГ для измерения температур согласно ГОСТ 8.417–81 принята термодинамическая температура Кельвина (обозначение - T), используемая в системе СИ. Кроме температуры Кельвина, согласно СИ допускается применять также температуру Цельсия (обозначение - t).

Связь между температурой Цельсия и термодинамической температурой определяется выражениями:

$$t = T - 273,15K \quad (1.3)$$

Удельный объем. Молекулярно-кинетическая теория устанавливает понятие объема, занимаемого газом, как пространства, в котором перемещаются его молекулы. Объем газа измеряется в кубических метрах. Количество газа определяется его массой, выраженной в килограммах.

Удельный объем – объем единицы массы газа (v , м³/кг).

Плотность – масса газа заключенного в 1 м³ (ρ , кг/м³).

$$v = V/G = 1/\rho \quad (1.4)$$

Кроме рассмотренных основных параметров газа существуют и другие параметры состояния: энтропия S , внутренняя энергия U и энтальпия i .

Уравнение состояния идеального газа

Уравнение, полученное Клапейроном, описывает состояние 1кг газа.

$$p \cdot v = R \cdot T \quad (1.5)$$

где: p – абсолютное давление газа, Па;
 v – удельный объем, м³/кг;
 R – газовая постоянная для 1 кг газа, Дж/(кг·К) (своя для каждого газа берется по таблице);
 T – термодинамическая температура, К.

Уравнение полученное Д.И. Менделеевым:

$$\mu \cdot R = \frac{p \cdot V_m}{T} \quad (1.6)$$

где: V_m – объем занимаемый одним молекул газа, м³;
 μ – молекулярная масса газа.

Исходя из данной формулы можно получить газовую постоянную, отнесенную к 1 кг любого газа.

$$R = 8314,9 / \mu \quad (1.7)$$

Газовая постоянная (R) определяется по таблице или расчетным путем. Для практических расчетов используют формулу:

$$p = \frac{R \cdot T}{v} = \rho \cdot R \cdot T \quad (1.8)$$

Газовые смеси.

Вводится понятие кажущейся молекулярной массы смеси газов.

$$\mu_{см} = \sum_{i=1}^n r_i \cdot \mu_i \quad (1.9)$$

где: r_i – объемная доля i -го газа.

Пример воздух:

$$\mu_{см} = 28,97 \text{ кг/кмоль}$$

$$R_{см} = 287,7 \text{ Дж/(кг·К)}$$

Для любого количества газа его состояние может быть описано формулой:

$$p \cdot V = G \cdot R_{см} \cdot T \quad (1.10)$$

Теплоемкость газов и газовых смесей

Понятие теплоты близко к понятию работы. Различие

между теплотой и работой состоит лишь в том, что они являются разными формами передачи энергии.

Теплота – форма передачи энергии, которая определяется либо непосредственным контактом между телами (теплопроводность, конвекция), либо лучистым переносом энергии. Теплота не может полностью превращаться в работу в тепловом двигателе, так как часть ее передается окружающей среде. Особенность перехода теплоты состоит в том, что этот процесс носит односторонний характер – теплота переходит самопроизвольно только от тела с более высокой температурой к телу с меньшей температурой. Обратный переход теплоты от тела с меньшей температурой к телу с большей температурой может быть лишь принудительным.

Работа – макрофизически упорядоченная форма передачи энергии путем взаимного механического воздействия тел.

Теплоемкостью тела – количество теплоты, необходимое для нагрева тела на 1° . Теплоемкость измеряется энергетическими единицами – джоулем (Дж) на градус термодинамической температуры – Дж/К, допускается единица Дж/°С; в технических расчетах чаще применяется более крупная единица – кДж/К.

Удельная теплоемкость – теплоемкость, отнесенная к единице количества вещества.

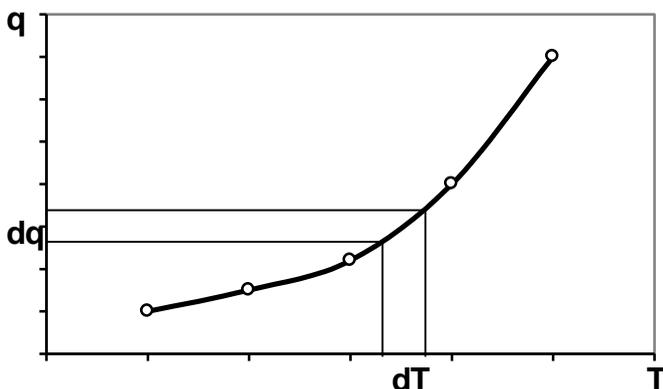


Рис. 1.1. Схема определения удельной теплоемкости тела.

Различают три вида удельной теплоемкости:

№	Вид удельной теплоемкости	Условное обозначение	Единица измерения
1.	Массовая	c	кДж/(кг·К)
2.	Объемная	c'	кДж/(м ³ ·К)
3.	Киломолярная теплоемкость	μc	кДж/(кмоль·К)

Формулы перехода:

$$c = \mu c / 22,41 \quad (1.11)$$

$$c' = \rho \cdot c \quad (1.12)$$

$$c = dq/dT \quad (1.13)$$

Теплоемкость вещества зависит от температуры и его состояния (пример: калориметрические исследования).

Количество теплоты, сообщенное 1 кг при изменении температуры от t_1 к t_2 определяется по формуле.

$$q = c_m \cdot (t_2 - t_1) \quad (1.14)$$

Для любого количества газа можно найти теплоту необходимую для подъема температуры от t_1 к t_2 :

$$Q = G \cdot c_m \cdot (t_2 - t_1) \quad (1.15)$$

$$Q = V \cdot c_m' \cdot (t_2 - t_1) \quad (1.16)$$

Теплоемкость зависит от условий подвода теплоты. Различают:

Изохорная теплоемкость (c_v) – теплоемкость при нагревании (или охлаждении) при постоянном объеме.

Изобарная теплоемкость (c_p) – теплоемкость при нагревании (или охлаждении) при постоянном давлении.

Переход от изобарной теплоемкости к изохорной осуществляется по уравнению Майнера.

$$c_p - c_v = R \quad (1.17)$$

Для газовых смесей теплоемкость определяется аналогично кажущейся молекулярной массы смеси газов.

$$c_{cm} = \sum_{i=1}^n g_i \cdot c_i \quad (1.18)$$

$$c'_{cm} = \sum_{i=1}^n r_i \cdot c'_i \quad (1.19)$$

где: g_i – массовая доля i -го газа.

Законы термодинамики

Первый закон термодинамики является частной формулировкой всеобщего закона сохранения энергии.

Первый закон термодинамики: подведенная к газу теплота расходуется на изменение его внутренней энергии и на работу расширения газа.

$$dq = du + dl \quad (1.20)$$

где: q – теплота; u – внутренняя энергия; l – работа по изменению объема.

$$dq = di + v \cdot dp \quad (1.21)$$

где: q – теплота; i – энтальпия; p – давление; v – объем.

Второй закон термодинамики. Теплота сама собой переходит лишь от тела с более высокой температурой к телу с более низкой температурой. Некомпенсированный переход теплоты от тела с меньшей температурой к телу с большей температурой невозможен.

ВОДЯНОЙ ПАР. ВЛАЖНЫЙ ВОЗДУХ

Уравнение состояния реальных газов

Водяной пар, получаемый в паровых котлах, очень широко используется в теплотехнике, как рабочее тело и теплоноситель. Его состояние близко к насыщению и поэтому он не подчиняется закону для идеальных газов.

Из уравнений состояний реального газа наиболее простым является уравнение Ван-дер-Ваальса, предложенное им в 1873 г.:

$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right) \cdot (v - b) = R \cdot T \quad (2.1)$$

где a – коэффициент, зависящий от сил сцепления; b – величина учитывающая собственный объем молекул.

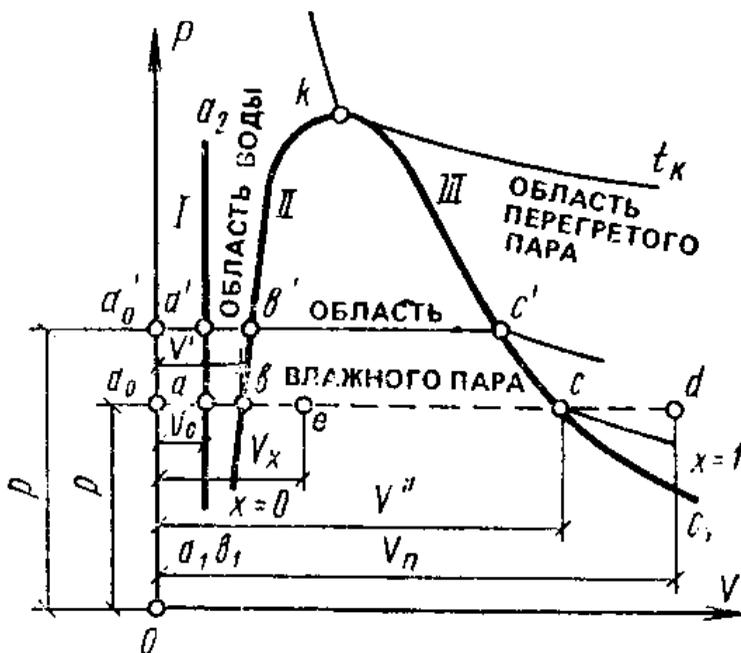
Из уравнения (2.1) видно, что состояние реального газа будет тем ближе к состоянию идеального, чем больше v . На этом основании при больших удельных объемах реального газа можно пользоваться уравнением Клапейрона, например, для пара, находящегося во влажном воздухе.

Процесс парообразования

Рассмотрим процесс парообразования при постоянном давлении в координатах $p-v$ (рис. 1.13). Поместим 1 кг воды при температуре 0°C в цилиндр с поршнем. Для некоторого значения $p = \text{const}$ это начальное состояние воды изобразится на диаграмме точкой a . При этом его удельный объем $v = 0,001 \text{ м}^3/\text{кг}$.

Если подогреть воду при постоянном давлении, то объем ее увеличивается и при температуре, которая соответствует состоянию кипения воды, достигает величины, отмеченной на диаграмме точкой b . Удельный объем кипящей воды принято обозначать v' . При дальнейшем подводе теплоты к кипящей воде последняя начнет превращаться в пар, причем давление и температура смеси воды с паром остаются неизменными.

Когда в процессе парообразования последняя частица воды превратится в пар, весь объем окажется заполненным паром. Такой пар как бы «насыщает» объем, в котором он находится, и потому называется насыщенным паром, а его температура, равная температуре кипения, называется температурой насыщения. Она обозначается t_n и зависит от давления: при $p_{\text{абс}} = 0,1 \text{ МПа}$ $t_n = 99,09^\circ\text{C}$, при $p_{\text{абс}} = 0,2 \text{ МПа}$ $t_n = 119,62^\circ\text{C}$, а при $p_{\text{абс}} = 10 \text{ МПа}$ $t_n = 309,53^\circ\text{C}$.


 Рис. 2.1. Процесс парообразования в координатах $p-v$

На участке $b - c$ пар называется влажным насыщенным паром (или просто влажным), так как он состоит из смеси воды и пара. После полного испарения воды (точка c) пар называют сухим насыщенным (или просто сухим).

Влажный пар характеризуется степенью сухости x . Степенью сухости называют массовую долю сухого насыщенного пара, находящегося в 1 кг влажного пара. Например, в 1 кг пара содержится 0,85 кг сухого насыщенного пара и 0,15 кг кипящей воды. Следовательно, степень сухости пара $x = 0,85$. Величина $1-x$ называется степенью влажности. Она показывает массовую долю кипящей воды, находящейся в 1 кг влажного пара. Для сухого насыщенного пара $x=1$.

Рассмотрим теперь процесс парообразования при более высоком давлении (см. рис. 2.1). Удельный объем воды при 0°C с повышением давления практически не изменяется (a'). Удельный объем кипящей воды несколько увеличится, так как с увеличением давления возрастает температура кипения (точка b'). Точка c' , соответствующая сухому насыщенному пару, будет находиться

левее точки c , так как давление возрастает более интенсивно, чем температура сухого насыщенного пара, и удельный объем его уменьшается.

Если точки, обозначающие в p - v диаграмме процессы при постоянном давлении, соединить, то получатся линии I, II, III. Линия I характеризует состояние воды при 0°C и является прямой, почти параллельной оси ординат. Линия II – кривая, соединяющая точки b и b' соответствует состоянию кипящей воды. Линия III – кривая, соединяющая точки c и c' соответствует состоянию сухого насыщенного пара. Линии II и III пересекаются в точке k , которая называется критической точкой. В этой точке исчезает различие в свойствах жидкости и пара. Параметры, отвечающие точке k , называются критическими. Для воды они имеют следующие значения: $p_{кр}=22,5$ МПа, $t_{кр}=374,15^\circ\text{C}$ ($T=647,3\text{K}$); $v=0,00307$ м³/кг. Линия II называется нижней пограничной, а линия III – верхней пограничной кривой.

Процесс парообразования графически изображается линией b - c (рис. 2.1). Теплота парообразования – количество теплоты, затрачиваемой на превращение 1 кг кипящей воды в сухой насыщенный пар, обозначается буквой r . С увеличением давления теплота парообразования уменьшается. В критическом состоянии $r = 0$.

В котельном агрегате сухой насыщенный пар обычно продолжает нагреваться при $p=\text{const}$. Этот процесс в p - v -диаграмме изображается линией c - d . При состоянии, отвечающем точке d , пар уже не насыщает пространство и имеет температуру более высокую, чем температура насыщения при данном давлении. Такой пар называется перегретым паром.

Параметры водяного пара

Для обозначения величин, относящихся к различным состояниям воды и пара, установлена следующая индексация: величины с индексом 0 относятся к начальному состоянию воды; с индексом ' – к воде, нагретой до температуры кипения; с индексом '' – к сухому насыщенному пару; с индексом x – к влажному насыщенному пару, с индексом p – к перегретому пару.

На практике необходимые для технических расчетов параметры состояния водяного пара удобно определить с помощью специальных таблиц, приведенных в справочной литературе. В таблицах приводятся параметры состояния кипящей воды (v', i', s') и сухого насыщенного пара (v'', i'', s''), а также величины теплоты парообразования r .

Для определения параметров состояния влажного насыщенного пара дополнительно должна быть известна степень сухости пара. Удельный объем v_x , м³/кг, влажного насыщенного пара определяется по формуле (2.2 или 2.3).

$$v_x = x \cdot v'' + (1-x) \cdot v' \quad (2.2)$$

$$v_x = v' + x \cdot (v'' - v') \quad (2.3)$$

Аналогичные соотношения можно написать для величин энтальпии i_x , Дж/кг, и энтропии s_x , Дж/(кг·К):

$$i_x = i' + x \cdot (i'' - i') = i' + x \cdot r \quad (2.4)$$

$$s_x = s' - x \cdot (s'' - s') = s' + x \cdot \frac{r}{T_n} \quad (2.5)$$

Энтальпия перегретого пара i_n , Дж/кг, получается, как сумма энтальпии сухого насыщенного пара i'' и теплоты, затраченной на перегрев пара q_n при $p = \text{const}$, т.е.

$$i_n = i'' + q_n \quad (2.6)$$

Влажный воздух

Влажным воздухом называется парогазовая смесь, состоящая из сухого воздуха и водяных паров. Знание его свойств инженеру-строителю необходимо для понимания и расчета таких технических устройств, как сушилки, системы вентиляции и т.п.

Влажный воздух, содержащий максимальное количество водяного пара при данной температуре, называется насыщенным. Воздух, в котором не содержится максимально возможное при данной температуре количество водяного пара, называется ненасыщенным. Ненасыщенный влажный воздух состоит из смеси сухого воздуха и перегретого водяного пара. Насыщенный влажный воздух состоит из сухого воздуха и насыщенного водяного пара. Водяной пар содержится в воздухе обычно в небольших количествах и в большинстве случаев в перегретом состоянии, поэтому к нему с достаточной для технических расчетов точностью могут быть применены законы идеальных газов.

Давление влажного воздуха p_6 , согласно закону Дальтона, равно

$$p_6 = p_v + p_n \quad (2.7)$$

где p_v , p_n – парциальные давления соответственно сухого воздуха и водяного пара, Па.

Парциальное давление p_n можно определить из таблиц

насыщенного пара по температуре точки росы, т.е. по той температуре, до которой нужно охладить ненасыщенный воздух при постоянном влагосодержании, чтобы он стал насыщенным. Таким образом, если охлаждать ненасыщенный воздух с температурой t , то при некоторой температуре $t_n < t_b$ он станет насыщенным. Эта температура и является температурой точки росы.

Параметры влажного воздуха

Основными характеристиками влажного воздуха являются следующие.

1. Относительная влажность φ , которая определяет степень насыщения воздуха водяным паром:

$$\varphi = \frac{p_n}{p_n} \quad (2.8)$$

т. е. отношение действительной абсолютной влажности к максимально возможной абсолютной влажности в насыщенном воздухе при той же температуре.

Для насыщенного воздуха $\varphi = 1$, или 100 %, а для ненасыщенного влажного воздуха $\varphi < 1$.

Относительную влажность воздуха определяют с помощью прибора, называемого психрометром.

2. Абсолютная влажность D , которая определяет массу водяного пара, содержащегося в 1 м^3 влажного воздуха.

3. Влагосодержание воздуха d , г/кг сухого воздуха, т.е. отношение массы водяного пара к единице массы сухого воздуха, содержащегося во влажном воздухе:

$$d = \frac{G_n}{G_b} \cdot 1000 \quad (2.9)$$

где G_n , G_b – соответственно масса водяного пара и сухого воздуха во влажном воздухе.

4. Энтальпия. Энтальпия i влажного воздуха является одним из основных его параметров и широко используется при расчетах сушильных установок, систем вентиляции и кондиционирования воздуха. Энтальпию влажного воздуха обычно относят к единице массы сухого воздуха, т.е. к 1 кг, и определяют как сумму сухого воздуха и водяного пара, кДж/кг сухого воздуха.

Вопросы, относящиеся к влажному воздуху, удобно и легко решаются с помощью i - d -диаграммы, предложенной в 1918 г. проф. Л. К. Рамзиным.

ВОДЯНОЙ ПАР. ВЛАЖНЫЙ ВОЗДУХ

Виды передачи теплоты

Теория теплообмена – это наука о процессах переноса теплоты.

Теплообмен представляет собой сложный процесс, который можно расчленить на ряд простых процессов. Различают три принципиально отличных один от другого процесса теплообмена:

1. теплопроводность;
2. конвекция;
3. тепловое излучение.

Процесс теплопроводности происходит при непосредственном соприкосновении (соударении) частиц вещества (молекул, атомов и свободных электронов), сопровождающемся обменом энергии и их тепловым движением. Такой процесс теплообмена может происходить в любых телах, но механизм переноса теплоты зависит от агрегатного состояния тела. Теплопроводность жидких и в особенности газообразных тел незначительна. Твердые тела обладают различной теплопроводностью. Тела с малой теплопроводностью называют теплоизоляционными.

Процесс конвекции происходит лишь в жидкостях и газах и представляет собой перенос теплоты в результате перемещения и перемешивания частиц жидкости ли газа. Конвекция всегда сопровождается теплопроводностью.

Если перемещение частиц жидкости или газа обусловливается разностью их плотностей, то такое перемещение называют естественной конвекцией. Если жидкость или газ перемещается с помощью насоса, вентилятора, эжектора и других устройств, то такое перемещение называют вынужденной конвекцией. Теплообмен происходит в этом случае значительно интенсивнее, чем при естественной конвекции.

Процесс теплового излучения состоит в переносе теплоты от одного тела к другому электромагнитными волнами, возникающими в результате сложных молекулярных и атомных возмущений. Лучистая энергия возникает в телах за счет других видов энергии, главным образом тепловой. Электромагнитные волны распространяются от поверхности тела во все стороны. Встречая на своем пути другие тела, лучистая энергия может ими частично поглощаться, превращаясь снова в теплоту (повышая их температуру).

При изучении отдельных видов теплообмена используют

следующие общие понятия и определения.

1. Перенос теплоты от одного тела к другому, а также между частицами данного тела происходит только при наличии разности температур и направлен всегда в сторону более низкой температуры.

2. Количество теплоты, переносимой в единицу времени, называется тепловым потоком Q . Отношение Q к единице площади F , m^2 , называется поверхностной плотностью теплового потока q , $Вт/м^2$:

$$q = Q/F \quad (3.1)$$

3. Температурное состояние тела или системы тел можно охарактеризовать с помощью температурного поля. *Температурное поле* – совокупность мгновенных значений температур во всех точках изучаемого пространства. Температура различных точек тела определяется координатами x , y , z и временем τ . Поэтому в общем случае

$$t = f(x, y, z, \tau) \quad (3.2)$$

Температурное поле, которое изменяется с течением времени, называется *нестационарным*. При этом тепловой режим и тепловой поток будут тоже нестационарными. Наглядным примером нестационарного температурного поля может служить температурное состояние стенок отопительной печи. Если температура в любой точке тела с течением времени не изменяется, то температурное поле называется *стационарным*. В этом случае тепловой режим и тепловой поток будут также стационарными.

Стационарное температурное поле можно охарактеризовать зависимостью

$$t = f(x, y, z) \quad (3.3)$$

Простейшим температурным полем является одномерное стационарное поле, которое характеризуется изменением температуры в направлении одной координатной оси. Такое температурное поле можно выразить уравнением

$$t = f(x) \quad (3.4)$$

Примером одномерного температурного поля может служить распределение температуры в наружных строительных конструкциях, толщина которых по сравнению с прочими размерами невелика.

В дальнейшем мы ограничимся рассмотрением лишь стационарных и одномерных температурных полей как наиболее простых, но имеющих большое практическое значение в строительстве зданий.

4. Температурное поле в рассматриваемом теле или си-

стеме тел удобно характеризовать с помощью изотермических поверхностей, под которыми понимается геометрическое место точек с одинаковой температурой. Такие поверхности могут быть замкнутыми или выходить на границы тела, но между собой никогда не пересекаются.

Если изотермические поверхности пересечь плоскостью, то на плоскости сечения получим изотермические линии, называемые изотермами (рис. 3.1). Взаимное расположение изотерм наглядно характеризует распределение температур в теле и интенсивность изменения температуры в различных направлениях: чем чаще расположены изотермы, тем интенсивнее изменяется температура.

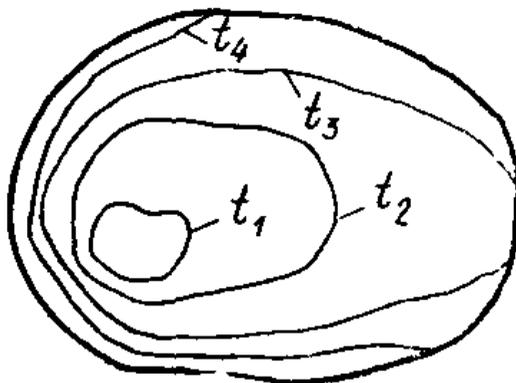


Рис. 3.1. Линии изотерм

Наибольшее изменение температуры на единицу длины получается в направлении нормали к изотермическим поверхностям. Производная температуры по нормали к изотермической поверхности называется температурным градиентом и обозначается $grad\ t$, его размерность – град/м.

Теплопроводность

Закон Фурье (1822 г.) является основным законом теплопроводности, устанавливающим прямую пропорциональность между поверхностной плотностью теплового потока и температурным градиентом:

$$q = -\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial n} = -\lambda \cdot grad(t) \quad (3.5)$$

где λ – множитель пропорциональности, который называется

ся коэффициентом теплопроводности, Вт/(м·К).

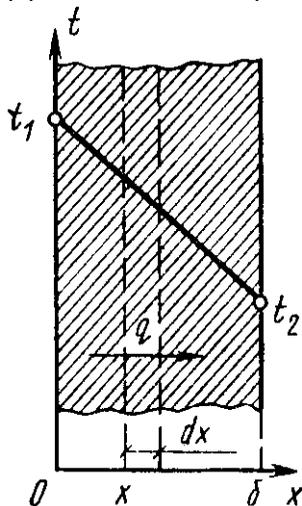


Рис. 3.2. Распределение температур в однослойной плоской стенке

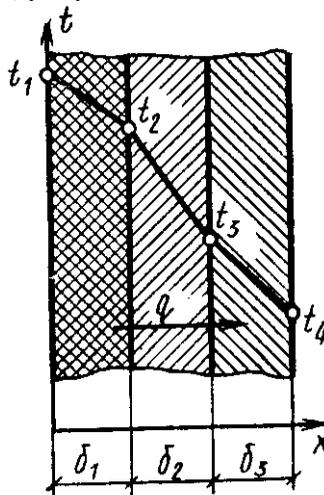


Рис. 3.3. Распределение температур в многослойной плоской стенке

Знак минус указывает, что вектор теплового потока направлен в сторону, противоположную температурному градиенту. Из уравнения (3.5) видно, что коэффициент теплопроводности количественно равен удельному тепловому потоку при температурном градиенте, равном единице (изменение температуры в 1°С на 1 м).

Коэффициент теплопроводности является важной теплофизической характеристикой вещества: чем больше λ , тем большей теплопроводностью обладает вещество. Коэффициент теплопроводности зависит от природы вещества, его структуры, влажности, наличия примесей, температуры и других факторов.

В практических расчетах коэффициент теплопроводности строительных материалов надлежит принимать по СНиП II-3-79** «Строительная теплотехника».

Рассмотрим однослойную плоскую стенку толщиной δ (рис. 3.2), коэффициент теплопроводности которой постоянен и равен λ . Температуры на границах стенки t_1 и t_2 , причем $t_1 > t_2$. Теплота распространяется только вдоль оси x . При этих условиях температурное поле в стенке будет одномерным, изотермическими поверхностями будут плоскости, параллельные поверхностям стенки.

Для слоя толщиной dx на основании закона Фурье (3.5)

можно написать следующие уравнения теплопроводности:

$$q = -\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial x} \quad (3.6)$$

Проинтегрируем данное уравнение. После преобразования получаем:

$$q = \frac{\Delta t}{\delta / \lambda} = \frac{\Delta t}{R} \quad (3.7)$$

$$R = \delta / \lambda \quad (3.8)$$

Из уравнения видно, что поверхностная плотность теплового потока зависит от температурного перепада.

Отношение $R = \delta / \lambda$ называется термическим сопротивлением стенки. Зная поверхностную плотность теплового потока q , можно определить общее количество теплоты, переданной за 1 ч через стенки поверхности F , по формуле:

$$Q = qF \quad (3.9)$$

Из формулы (3.9) видно, что общее количество теплоты, переданной через однослойную плоскую стенку, пропорционально поверхностной плотности теплового потока и площади поверхности стенки.

Рассмотрим теплопроводность плоской многослойной стенки, состоящей из n материальных слоев, плотно прилегающих один к другому (рис. 3.3). Каждый слой имеет заданную толщину δ , и коэффициент теплопроводности λ . Многослойными являются, например, стены и перекрытия крупнопанельных и кирпичных зданий.

При стационарном тепловом режиме тепловые потоки, проходящие через каждый из слоев стенки, одинаковы. Тепловой поток можно определить по формуле (3.10).

$$q = \frac{t_1 - t_4}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}} = \frac{\Delta t}{R} \quad (3.10)$$

Конвективный теплообмен

Тепловой поток Q , Вт, передаваемый при конвективном теплообмене, определяется по формуле Ньютона

$$Q = \alpha_k \cdot F \cdot (t_{mc} - t_c) \quad (3.11)$$

где α_k – коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом теплоотдачи; F – поверхность соприкосновения

теплоносителя со стенкой, m^2 ; $t_{ж}$ – температура теплоносителя, $^{\circ}C$; t_c – температура поверхности стенки, $^{\circ}C$.

Приняв $F = 1 m^2$, получим поверхностную плотность теплового потока q , $Вт/м^2$:

$$q = \alpha_k \cdot (t_{ж} - t_c) \quad (3.12)$$

Коэффициент теплоотдачи (α) представляет собой количество теплоты, проходящей в единицу времени от жидкости (газа) к стенке (или наоборот) через $1 m^2$ поверхности при разности температур жидкости и стенки 1° . Единица измерения $Вт/(м^2 \cdot K)$. В отличие от коэффициента теплопроводности коэффициент теплоотдачи – очень сложная величина, которой учитываются следующие факторы, обуславливающие протекание конвективного теплообмена: характер движения жидкости или газа (ламинарное или турбулентное) и природа его возникновения; скорость движения жидкости или газа, физические параметры жидкости или газа (коэффициент теплопроводности, вязкость; плотность, теплоемкость, коэффициент объемного расширения), температура жидкости или газа и поверхности; форма и линейные размеры омываемой жидкостью или газом поверхности.

Для определения величины α для различных случаев конвективного теплообмена предложено несколько эмпирических формул, имеющих, однако, ограниченную область применения. Значительно лучшие результаты дает определение величины α на основе эксперимента с использованием критериев подобия – безразмерных соотношений параметров, характеризующих физический процесс.

Теплообмен излучением

Теплообмен излучением может происходить между телами, находящимися на больших расстояниях одно от другого. Отличным примером этого явления служит излучение Солнца на Землю. В технике теплообмен излучением имеет место в котлах, в системе отопления зданий, сушильных агрегатах и т.п. При высоких температурах теплообмен излучением преобладает над остальными видами теплообмена и имеет в связи с этим важное значение. Лучеиспускание тела в пространство может быть равномерным или направленным.

Лучистая энергия, испускаемая на какое-либо тело, в зависимости от его физических свойств, формы и состояния поверхности частично поглощается этим телом и переходит в тепловую (а иногда и другие формы энергии), а остальная часть отражается и

частично проходит через него.

Обозначим через Q_0 общее количество лучистой энергии, падающей на тело, а через Q_A , Q_R , и Q_D —соответственно количество лучистой энергии, поглощенной, отраженной и прошедшей через него:

$$Q_0 = Q_A + Q_R + Q_D \quad (3.13)$$

Разделив обе части равенства на Q_0 , получим:

$$1 = A + R + D \quad (3.14)$$

где A – поглощательная способность тела; R - отражательная способность тела; D - пропускная способность тела.

Из приведенного рассмотрения следует, что величины A , R и D являются безразмерными коэффициентами поглощения, отражения и пропускания. В зависимости от конкретных физических свойств тела, его температуры и длины волны падающего излучения численные значения коэффициентов A , R и D могут быть различными, а в частных случаях и равными нулю.

Если $A = 1$ (т.е. $R = D = 0$), то тело полностью поглощает все падающие на него тепловые лучи и называется абсолютно черным. Абсолютно черных тел в природе нет ($A < 1$). Свойствами, близкими к абсолютно черному телу, обладают нефтяная сажа ($A = 0,9-0,96$), черный бархат ($A = 0,955$).

Если $R = 1$ (т.е. $A = D = 0$), то тело полностью отражает падающие на него тепловые лучи. Такое тело называется зеркальным (если отражение правильное, не рассеянное) либо абсолютно белым (если отражение рассеянное—диффузное). К числу тел, близких по свойствам к абсолютно белому телу, относится ряд металлов (золото, медь и др.). Для полированных металлов $R = 0,95-0,97$. Белая оштукатуренная наружная поверхность стены хорошо отражает солнечные (видимые) лучи, а невидимые тепловые лучи интенсивно ею поглощаются.

Если $D = 1$ (т.е. $A = R = 0$), то тело пропускает через себя все падающие на него лучи. Такое тело называется абсолютно прозрачным. Воздух—практически прозрачная среда, твердые тела и жидкости непрозрачны. Многие тела прозрачны только для определенных волн. Так, оконное стекло пропускает световые лучи и почти непрозрачно для ультрафиолетового и длинноволнового инфракрасного излучения.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕПЛОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ

Физико-химические процессы, проходящие в бетоне при тепловлажностной обработке

Твердение бетона – заключительный этап изготовления искусственного камня капиллярно-пористой структуры из вяжущего, крупного и мелкого заполнителя и воды. При затворении смеси водой вяжущее вступает в химические реакции гидратации, проходя последовательно стадии формирования пространственного каркаса коллоидной структуры, индукционного периода, формирования, а затем упрочнения конденсационно-кристаллизационной структуры. Уже в начальной стадии процесса гидратации вяжущего (цемента) происходит быстрое взаимодействие трехкальциевого силиката $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (алита C_3S) и воды с образованием гидросиликата кальция и гидроксида кальция. Трехкальциевый алюминат $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ представляет самую активную фазу среди клинкерных минералов: немедленно после соприкосновения C_3A с водой на поверхности непрореагировавших частиц образуется рыхлый слой метастабильных алюмогидратов в виде тонких гексагональных пластинок. Рыхлая структура гидроалюминатов ухудшает прочностные и эксплуатационные свойства бетонов.

Двухкальциевый силикат-белит $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (C_2S) гидратируется медленнее алита и при его взаимодействии с водой выделяется меньше гидроксида $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Четырехкальциевый алюмоферрит $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ (C_4AF) при взаимодействии с водой расщепляется на алюмогидрид и гидроферрит.

Первичная структура представляет собой малопрочный пространственный каркас из дисперсных частиц продуктов гидратации; к концу периода схватывания формируется основная структура цементного теста, которое превращается в цементный камень. Цементный камень, являющийся минеральным клеем, скрепляющим зерна заполнителя, должен обладать достаточной прочностью и хорошо сцепляться с зёрнами заполнителя. Эти свойства зависят от степени гидратации цемента, количества и качества новообразований, объема и характера пор.

Активным элементом структуры цементного камня, участвующим в образовании гидратных соединений и формировании пор, является вода. Пористость цементного камня зависит от

начального водоцементного отношения, а также от форм связи воды с твердой фазой. Структура цементного камня в значительной степени определяется механизмом его гидратации. В результате взаимодействия цемента с водой образуются «внутренние» продукты гидратации в пространстве, первоначально занятом цементными зернами, и «внешние», заполняющие пространство, первоначально занятое водой. Внутренний гидросиликат, получающийся в результате непосредственного присоединения воды к твердой фазе алита и белита, имеет тонкую и плотную структуру. Внешние продукты гидратации образуются вне зерен цемента и состоят из небольшого количества внешнего гидросиликата, крупных кристаллов гидроксида и этtringита.

Гидратация цемента относится к химическим реакциям, проходящим с *экзотермическим эффектом*, т. е. с выделением теплоты. Тепловыделение цементов зависит от минералогического состава и активности вяжущего, тонкости помола, водоцементного отношения, условий и длительности твердения.

Термохимические свойства минералов вяжущего различны; наибольшей экзотермией обладает трехкальциевый алюминат, наименьшей – белит.

При гидратации цемента в процессе тепловлажностной обработки тепловыделение на каждом этапе зависит от средней температуры бетона и продолжительности процесса, что при постоянном водоцементном отношении можно представить как функцию градусо-часов (4.1, 4.2).

$$\Theta = t_6 \cdot \tau_i \quad (4.1)$$

$$\Theta = 0,5 \cdot (t_1 + t_2) \cdot \tau_I + t_2 \cdot \tau_{II} + 0,5 \cdot (t_2 + t_3) \cdot \tau_{III} \quad (4.2)$$

где t_6 – температура бетона; $\tau_I, \tau_{II}, \tau_{III}$ – соответственно длительность периода нагрева, изотермического выдерживания и охлаждения. Среднюю температуру бетона определяют из расчетов нестационарных температурных полей.

Для практических расчетов применяют формулу определения тепловыделения, кДж/кг, связывающую марку цемента и количество градусо-часов:

$$q_{\text{экз}} = 9,64 \cdot 10^{-4} \cdot M \cdot \Theta \cdot (B/C)^{0,44} \quad (4.3)$$

Наибольшее тепловыделение цемента наблюдается в первые периоды твердения, затем процесс замедляется; тепловыделение более эффективно (при одинаковом количестве градусо-часов) при коротком нагреве до высокой температуры, чем длительное твердение при небольших температурах. Эта теплота может составить до 20 % всей теплоты, расходуемой на нагрев

изделий, и должна учитываться при составлении теплового баланса процесса. При отсутствии потерь теплоты в окружающую среду и на испарение температура в бетоне может на 5...10 °С превысить температуру среды в установке, что нежелательно, в частности, для предварительно напряженных бетонов.

Одним из методов ускорения твердения бетона является тепловлажностная обработка: повышение температуры до 60...100 °С ведет к ускорению химических реакций в 6...12 раз и сокращению длительности процесса структурообразования с 28 сут до 6...16 ч. При этом одним из основных требований является сохранение в бетонной смеси воды в жидкой фазе, необходимой для образования гидросиликатов, диффузии растворов, равномерной и уплотненной кристаллизации во всем объеме. Поэтому повышение температуры происходит в условиях повышенной влажности среды ($\varphi \sim 100\%$) или в условиях, исключающих массообмен между изделием и средой.

При прогреве свежетоформованного бетона в нем одновременно протекают *процессы структурообразования*, обусловленные ускорением твердения цемента и упрочнением структуры бетона, и *деструктивные процессы*, возникающие в результате физических изменений под действием температурных и влажностных факторов. К ним относятся явления, вызываемые температурными, линейными и объемными изменениями, внутренними деформациями, капиллярным давлением и миграцией влаги.

При тепловлажностной обработке бетона вода и «защемленный» воздух, находящиеся в нем и имеющие коэффициент температурного расширения в 20...300 раз выше, чем у заполнителей и новообразований, раздвигают твердые компоненты, создавая внутреннее давление, превышающее прочность свежеуложенного бетона. При этом наблюдаются необратимые нарушения структуры бетона, такие как уменьшение прочности, появление микротрещин и капиллярных канальцев.

Возникающие в процессе нагрева неравномерности распределения температур по объему изделия вызывают неравномерные температурные расширения различных участков и зон изделия, температурные напряжения и деформации.

Процессы массообмена, которыми сопровождается тепловая обработка бетона (например, конденсация пара на поверхности изделий, испарение влаги с открытых поверхностей, миграция влаги пара и воздуха внутри бетона), также влияют на характер и развитие деструктивных процессов.

В зависимости от степени температурного воздействия и

влияния деструктивных процессов нарушение структуры бетона по сравнению с бетоном нормального твердения характеризуется ухудшением его основных физико-механических свойств (прочности, долговечности, морозостойкости).

Режимы тепловлажностной обработки

Эффективными следует считать режимы тепловой обработки, которые позволяют получать бетон заданной прочности без существенных нарушений его структуры при минимальных удельных расходах вяжущего и тепловой энергии.

В общем виде *полный цикл тепловлажностной обработки* бетонных и железобетонных изделий состоит из следующих периодов (рис. 4.1, а): предварительного выдерживания $\tau_{\text{пред}}$; нагрева изделия τ_1 ; изотермического выдерживания τ_{II} ; охлаждения τ_{III} .

Выбор рациональных режимов тепловой обработки основывается на полной увязке множества технологических и теплотехнических факторов. Длительность предварительного выдерживания, скорость нагрева, температура и продолжительность изотермического выдерживания и т. д. зависят от характеристик материала, условий эксплуатации изделия, конструкций тепловых установок.

Выбор вида и режима тепловой обработки следует производить с учетом влияния вяжущего. Так, для бетонов на высокоактивных вяжущих марки М400 и выше рекомендуется паропрогрев при температуре 60...85 °С при относительной влажности среды 90...100 %; для бетонов на низкомарочных портландцементов, шлакопортландцементе и пуццолановых портландцементов тепловая обработка эффективна при температурах 95... 115 °С; для цементов, содержащих тонкомолотые кремнеземистые компоненты (например, кварцевый песок), обработку проводят при повышенных давлениях и температурах 170...220 °С.

Для изделий из пластифицированных и гидрофобных цементов допускается тепловая обработка по *мягким режимам* с небольшой скоростью подъема температуры после экспериментальной проверки в условиях, соответствующих производственным. Тепловая обработка бетонных изделий на глиноземистом цементе вообще не допустима.б

На длительность тепловой обработки также оказывает влияние массивность изделий. С увеличением массивности возрастает температурный перепад между наружными и внутренними слоями бетона, увеличивается величина температурных напряжений и вероятность возникновения температурных деформаций. На

графике режима тепловлажностной обработки (рис. 4.1, б) дано изменение температуры среды в установке t_{cp} , температура поверхности изделия t_n зависит от интенсивности теплообмена в установке и следует за температурой среды с отставанием. Температура центра бетонного изделия $t_{ц}$, зависит от коэффициента теплопроводности материала λ и толщины изделия: для тонких изделий $t_{ц}$, незначительно отстает от t_n перепад температур поверхность – центр Δt_1 невелик. Температура центра толстого массивного изделия $t_{ц}$, значительно отстает от t_n , перепад температур Δt_2 , может превысить предельно допустимую величину (принято $\Delta t_{max} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$), структура изделия будет нарушена.

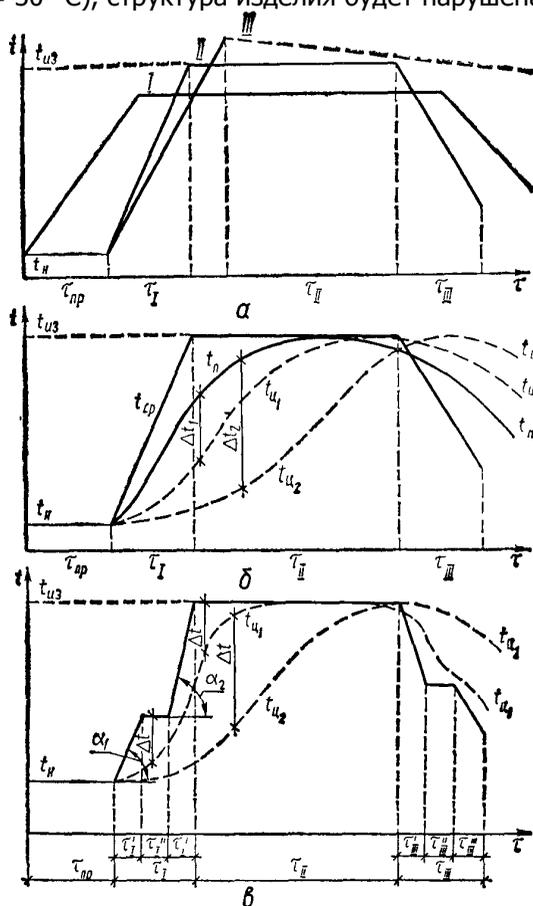


Рис. 4.1. Графики режимов тепловой обработки бетонов: а – варианты режима тепловой обработки, б – прогреваемость изделий различной толщины, в – ступенчатый режим теп-

ловой обработки.

Для предотвращения этого явления применяют *ступенчатый режим обработки* (рис. 4.1, *в*). В период нагрева и охлаждения вводят одно или несколько промежуточных выдерживаний, позволяющих довести температурный перепад Δt до допустимых величин.

Для восприятия теплового воздействия без нарушения структуры бетон должен обладать начальной (критической) прочностью, для чего его предварительно выдерживают при температуре окружающей среды. Быстрый нагрев после формования приводит к преждевременному уплотнению оболочки вокруг зерен цемента, прекращению диффузии раствора, замедлению реакций, к недоиспользованию цемента.

Предварительное выдерживание обязательно для изделий сложной конфигурации, с большим модулем открытой поверхности, при немедленной распалубке; оно необходимо для бетонов на пластифицированных, гидрофобных, пуццолановых и шлаковых портландцементов; длительность выдерживания зависит от активности вяжущего и составляет 2...4 ч.

Время предварительного выдерживания уменьшается при повышении марки цемента, температуры окружающей среды и понижении водоцементного отношения. От предварительного выдерживания можно отказаться при использовании ускорителей схватывания, жестких смесей, герметичных форм, при тепловой обработке с длительным периодом подогрева (рис. 4.1, *а*, режим I). Не предусмотрено предварительное выдерживание также в случае тепловой обработки с механическим пригрузом в малонапорных и индукционных камерах, кассетных установках, при применении разогретых бетонных смесей.

Скорость прогрева бетонных изделий зависит от начальной прочности бетона, пластичности бетонной смеси, размеров и модуля открытой поверхности:

Начальная прочность бетона, МПа	0,1...0,2	0,2...0,4	0,4...0,5	0,5...0,6	>0,6
Скорость подъема температуры среды в камере, °С/ч	10...15	15...25	25...35	35...45	45...60

При тепловой обработке распалубленных изделий и изделий в формах с большим модулем открытой поверхности под-

нимать температуру среды рекомендуется в прогрессивно возрастающем темпе. Независимо от толщины изделия в первый час подогрева скорость подъема температуры назначают 10...15, второй 15...25, третий 25...35 °С/ч.

Скорость подъема температуры для бетонов на легких заполнителях несколько выше, чем для тяжелых бетонов. При наличии внешнего давления скорость подъема температуры может быть больше. Так, при автоклавной обработке плотных бетонов скорость подъема температуры до 174 °С составляет 80 °С/ч, до 200 °С – 100...140 °С/ч.

Введение изотермического выдерживания при 100 °С между I и II периодами нагрева изделия в автоклаве способствует устранению деформаций в материале при твердении. Если автоклавной обработке подвергаются пено- и газобетоны с сильно пористой структурой, то обычно выбирается меньшая скорость подъема температуры (20...40 °С/ч), что объясняется различием теплофизических и технологических свойств плотного и ячеистого бетона.

Длительность изотермического выдерживания в основном зависит от жесткости бетонной смеси и от температуры выдерживания. При атмосферном давлении и невысоких температурах (до 60 °С) при использовании пластичных подвижных смесей время изотермической выдержки доходит до 18...20 ч. Для жестких смесей это время сокращается вдвое, повышение температуры от 60 до 100 °С уменьшает этот период еще в 4...5 раз, доводя его до 2 ч. При автоклавной обработке и повышении давления до 1,6...2,5 МПа нагрев изделий и изотермическое выдерживание могут происходить в течение короткого времени, что дает возможность весь цикл сократить до 6...8 ч.

Максимальная температура изотермического прогрева зависит от вида вяжущего: для портландцементов ее принимают равной 80...85 °С, для шлаковых и пуццолановых портландцементов 90...95 °С.

При хорошей теплоизоляции тепловых установок возможно применение «ликвого» режима (рис. 4.1, а, режим III), при котором в период изотермического выдерживания подача теплоносителя в установку не производится, что позволяет значительно экономить тепловую энергию. Снижение температуры в установке составляет 3...5 °С/ч (в зависимости от толщины и качества теплоизоляции), но в изделиях температура остается практически постоянной благодаря экзотермическим реакциям в твердеющем бетоне.

Допускаемая скорость снижения температуры колеблется в пределах 25...50 °С/ч в зависимости от полученной прочности и толщины изделия. Перепад температур между поверхностью изделий и окружающей средой не должен превышать 40 °С.

При охлаждении изделий, как и при нагреве, возникает нестационарное температурное поле, но поток теплоты направлен из изделия. Поэтому необходимо учитывать требования к допустимым температурным перепадам, регулировать длительность охлаждения, а для массивных изделий применять ступенчатые режимы обработки. Быстрое снижение температуры вызывает значительные температурные градиенты, при которых температура внутри изделия значительно выше, чем на его поверхности. При этом наблюдается также интенсивная миграция влаги с образованием в материале длинных открытых пор и капилляров. Резкое снижение температуры в автоклаве сочетается с одновременным падением давления, создавая добавочный градиент давления $\text{grad } p$ центр – поверхность и усиливая поток влаги к поверхности. При этом во внутренних порах изделий возникает явление «вторичного вскипания».

Тепловая обработка бетонов в *герметически закрытых формах*, позволяет предохранить бетон от значительных потерь воды и обработать его паровой средой, создаваемой испаряющейся из него влагой. Малые свободные размеры герметичной формы обуславливают быстрое заполнение свободного объема выделяющимся паром, относительно равномерный прогрев всей массы бетона и качественную его обработку.

Применение для тепловой обработки *дымовых газов* с непосредственным их соприкосновением с изделиями требует большого внимания на всех этапах обработки, так как высушивания бетонов допускать нельзя. Бетоны покрывают защитными покрытиями, увлажняют паром или распыленной водой. Если в конце обработки необходимо понизить влажность бетона, то процесс может быть двухстадийным: вначале – обработка в камере паром, а после основного твердения – подсушивание дымовыми газами до заданной влажности. При пропаривании изделий, прикрываемых во избежание тепловых и влажностных потерь металлическим или резиновым листом или полиамидной пленкой, общий цикл обработки сокращается на 15...20 %, соответственно возрастает прочность бетона.

Классификация установок для тепловлажностной обработки

Установки для тепловлажностной обработки бетонных и железобетонных изделий классифицируют по ряду признаков.

1. *Режиму работы.*
 - 1.1. *Периодического действия.*
 - 1.2. *Непрерывного действия.*
2. *Виду теплоносителя.*
 - 2.1. *Пар.*
 - 2.2. *Воздух.*
 - 2.3. *Паровоздушная смесь.*
 - 2.4. *Вода.*
 - 2.5. *Газ.*
 - 2.6. *Масло.*
 - 2.7. *Электроэнергия.*
3. *Давлению рабочей среды.*
 - 3.1. *Вакуум.*
 - 3.2. *Атмосферное давление.*
 - 3.3. *Давление выше атмосферного.*
4. *Способу передачи теплоты.*
 - 4.1. *Контактный.*
 - 4.2. *Конвективный.*
 - 4.3. *Тепловое излучение.*
 - 4.4. *Индукционный.*
5. *Основной конструкции.*
 - 5.1. *Ямные камеры.*
 - 5.2. *Стенды и колпаки*
 - 5.3. *Термоформы (индивидуальные, горизонтальные, вертикальные).*
 - 5.4. *Автоклавы;*
 - 5.5. *Камеры (щелевые, тоннельные, вертикальные).*
 - 5.6. *Вибропрокатные станы*

Виды тепловой обработки:

Прогрев бетона при атмосферном давлении при непосредственном соприкосновении теплоносителя с материалом проводят горячим воздухом, паровоздушной смесью или продуктами сгорания газа. *Достоинства:* сравнительно простая система теплоснабжения и низкая металлоемкость. *Недостатки:* может отрицательно воздействовать на качественные характеристики поверхностного слоя бетона или всего изделия.

Тепловая обработка в среде с избыточным давлением осуществляется в малонапорных пропарочных камерах или автоклавных установках в среде чистого насыщенного пара. *Достоинства:* способствует улучшению физико-механических свойств

твердеющего бетона, сокращению длительности тепловой обработки и уменьшению расхода вяжущего.

Тепловая обработка в жидкой среде. *Достоинства:* уменьшается вредное воздействия процессов массообмена, снижается пористость цементного камня, повышается поверхностная прочности бетона (при обработке в воде) или бетону придаются гидрофобные свойства (обработка в масле).

Контактный нагрев изделий (через разделяющую металлическую стенку) осуществляют в индивидуальных термоформах или пакетах термоформ. *Достоинства:* высокое качество поверхности изделий в сочетании с высокой скоростью нагрева (60-70°С/ч) за счет ограничения температурных деформаций поверхностных слоев бетона и исключения вредного влияния поверхностного массообмена.

Для интенсификации процесса теплоотдачи от теплоносителя к бетону и равномерного распределения температуры в тепловых отсеках применяют принудительную циркуляцию паровоздушной смеси в установке при помощи эжекторов или интенсивную циркуляцию непосредственно в отсеке за счет скоростной струйной подачи пара (через сопла).

Обогрев инфракрасными лучами применяют в камерах непрерывного действия щелевидного типа с использованием трубчатых металлических излучателей.

УСТАНОВКИ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ ДЛЯ ТЕПЛОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ БЕТОННЫХ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ

Ямные камеры

Камеры ямного типа применяют в агрегатно-поточной и полуконвейерной технологии изготовления сборных железобетонных изделий. Они просты в изготовлении и широко распространены на заводах сборного железобетона. Выполняют их напольными, полузаглубленными или заглубленными в зависимости от уровня грунтовых вод.

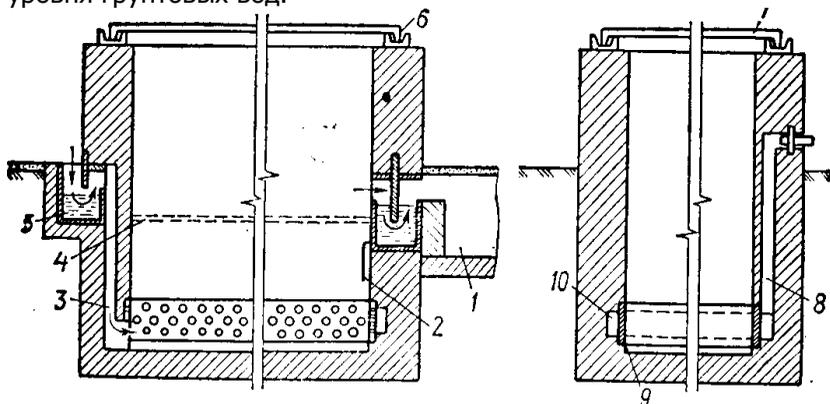


Рис. 5.1. Ямная камера паропрогрева конструкции Гипростройиндустрии:

1 – вентиляционный канал; 2 – слив воды из вентиляционных гидрозатворов; 3 – канал для подачи воздуха; 4 – соединительная труба; 5, 6 – гидрозатворы подачи воздуха и крышки; 7 – крышка камеры; 8 – канал для паропровода; 9 – плита с отверстиями; 10 – канал для разводки пара.

Ямная камера паропрогрева конструкции Гипростройиндустрии полузаглубленного типа (рис. 5.1) выполнена из керамзитобетона. Крышку камеры 7 укладывают на гидрозатвор 6; пар по паропроводу, проложенному по каналу 8, попадает в пароразводящий канал 10 в нижней части камеры и через отверстия в перфорированной плите 9 подается в камеру. В период охлаждения воздух через гидрозатвор приточного вентиляционного клапана 5 и канал 3 подается в камеру, затем через вытяжной гидрозатвор и вентиляционный канал 1 выбрасывается в атмосферу отсасы-

вающим вентилятором; вода из вентиляционных гидрозатворов

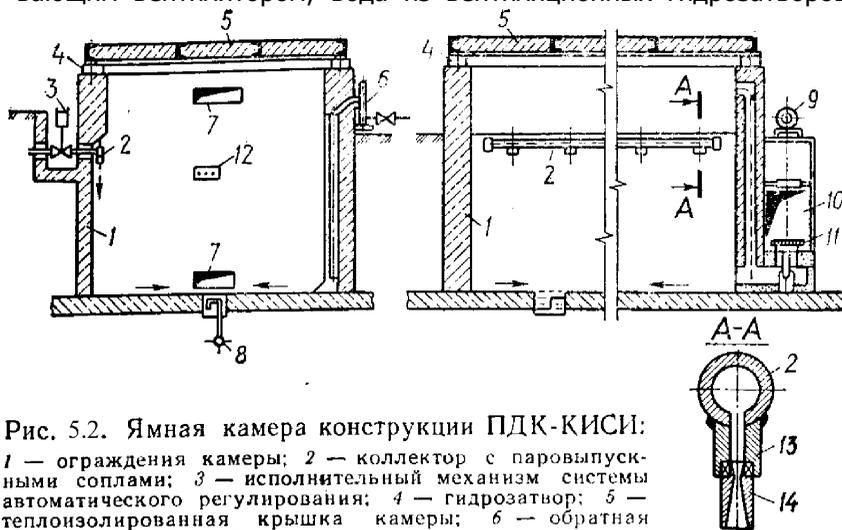


Рис. 5.2. Ямная камера конструкции ПДК-КИСИ:

1 — ограждения камеры; 2 — коллектор с паровыпускными соплами; 3 — исполнительный механизм системы автоматического регулирования; 4 — гидрозатвор; 5 — теплоизолированная крышка камеры; 6 — обратная труба с клапаном; 7 — вентиляционные окна; 8 — конденсатопровод; 9 — электропривод вентиляционного клапана; 10 — магистральный вентиляционный канал; 11 — гидрозатвор клапана; 12 — датчики САР; 13 — муфта; 14 — сопло

перетекает по соединительной трубе 4 и вытекает по трубе 2.

Ямные камеры конструкции ПДК-КИСИ проектируются напольными, полузаглубленными или заглубленными (рис. 5.2) и отличаются следующими системами: разводки пара 2, включающей в себя пароразводящий коллектор с паровыми соплами; удаления из камеры холодного воздуха б в период разогрева и избыточной паровоздушной смеси; вентиляции, состоящей из вентиляционных окон 7, соединяющих камеру с магистральным вентиляционным каналом 10 с помощью клапана 11, открываемого электропроводом 9; удаления конденсата 8.

Внутренние габариты камер в плане зависят от размеров форм укладываемых изделий с зазорами вдоль стен для прохода захватов автоматической траверсы, а для двухрядных камер — размерами двух форм с промежутками между ними. Более экономичны однорядные камеры, так как в них сокращается общая длительность цикла обработки, увеличивается оборачиваемость установок и форм, снижается металлоемкость процесса.

Камеры проектируют под определенный типоразмер изделий. Промежутки для прохода теплоносителя должны быть минимально допустимыми. Это повышает полезную загрузку камер, коэффициент заполнения их бетоном и тем самым увеличивает

удельный объем продукции при снижении удельных расходов теплоты. Обычно камеры располагают блоками по 6...8 шт., это позволяет уменьшить удельный расход теплоты за счет сокращения

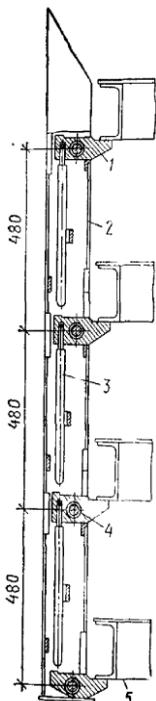


Рис. 5.3.
Стойка с кронштейнами:

1 – кронштейн; 2 – стойка; 3 – противовес; 4 – ось кронштейна; 5 – форма

теплопотерь в окружающую среду. Высота камеры зависит от типа системы парораздачи и в среднем составляет 3...4 м. Изделия по высоте укладывают на инвентарные стойки (рис. 5.3) с фиксированными, автоматически выдвигаемыми кронштейнами. Расстояние между формами составляет 50...75 мм, между дном камеры и днищем нижней формы – 150 мм, между верхним изделием и крышкой – 50 мм (для циркуляции теплоносителя).

Если система парораздачи не обеспечивает циркуляцию теплоносителя, то в камере происходит расслоение паровоздушной среды по высоте, так как пар, имея более низкую плотность, чем

воздух, поднимается вверх, ухудшая условия обработки нижних изделий.

Для предотвращения выбивания пара в промежутке между стенами и крышкой устанавливают гидрозатвор, представляющий собой заполненный водой желоб из металлического швеллера, укладываемого по верхнему периметру стен камеры. К днищу швеллера приварена и замоноличена в стены металлическая полка, препятствующая сдвиганию затвора при укладке крышки и проходу пара под затвором. Проходу пара над швеллером препятствует полоса или уголок, приваренные к крышке, и опускающиеся в воду гидрозатвора при закрытии крышки.

Крышки ямных камер паропрогрева представляют собой жесткую металлическую конструкцию толщиной 150...200 мм, паро- и гидроизолированную по отношению к паровой среде камеры и теплоизолированную снаружи. С внутренней стороны крышки имеют небольшой уклон (до 5 %) к гидрозатвору для стока осадка

ждающегося конденсата, тем самым предохраняя верхнее бетонное изделие от нарушения поверхности падающими каплями

Крышки не должны деформироваться при снятии их и перестановке кранами. Избежать многочисленных перестановки, удары, деформации крышек позволяет установка гидропривода подъема крышки в вертикальное положение.

Ограждения камеры (стены и пол) до недавнего времени выполнялись из монолитного или сборного железобетона, однако повышавшиеся требования к экономии тепловой энергии привели к разработке различных современных конструкций ограждений, отличающихся повышенными теплозащитными свойствами. Внутренние поверхности камеры покрыты гидроизоляцией, что предотвращает их увлажнение и повышение теплопроводности. Пол камеры имеет уклон (0,005...0,01 %) для стока конденсата в канализацию.

Существующие системы пароснабжения и пароразводки в камерах не обеспечивают равномерность прогрева изделий, так как сосредоточенный выпуск пара приводит к перегреву близлежащих изделий (или поверхностей изделий) и недогреву удаленных. Кроме того, выпуск пара через перфорированные паропроводы, уложенные по периметру днища, или через перфорированные плиты в нижней части камеры приводит к плавному подъему пара вдоль стен только в верхнюю зону камеры и преимущественному прогреву стен камеры и торцов изделий. Промежутки между изделиями заняты розданной прослойкой, пар сюда не попадает и поэтому плоские поверхности изделий в теплообмене практически не участвуют. Из-за более высокой интенсивности теплообмена в паровой среде прогрев изделий в верхней части камеры проходит значительно быстрее, чем в нижней, заполненной воздухом.

Система пароснабжения в камерах ПДК-КИСИ (см. рис. 5.2) основана на турбулизирующем и эжектирующем действиях скоростной струи пара, вытекающей из крупноразмерных (суживающихся, цилиндрических или расширяющихся) сопел и вовлекающей паровоздушную смесь в камеру в циркуляцию. Тем самым ликвидируются застойные участки, воздушные прослойки между изделиями и в теплообмене участвуют все поверхности изделий. В этих камерах благодаря интенсивной циркуляции греющей среды длительность прогрева и удельный расход теплоносителя в 1,5...2 раза ниже, а равномерность обработки выше, чем в камерах с другими системами пароснабжения.

Для удаления воздуха в период подъема температуры в ка-

мерах ПДК-КИСИ предусмотрена обратная труба с гидрозатвором или клапаном, которая позволяет по мере наполнения камеры паром удалять воздух из камеры и препятствует обратному приходу воздуха в камеру.

Для организации управляемого снижения температуры изделий в период остывания и удаления паровоздушной смеси из камеры применяются системы вентиляции, в которых вытяжной вентилятор подсоединен к магистральному вентиляционному каналу, объединяющему блок из 4...6 камер. Камеры изолированы от канала герметичными вентиляционными клапанами, открывающимися только в период охлаждения камеры.

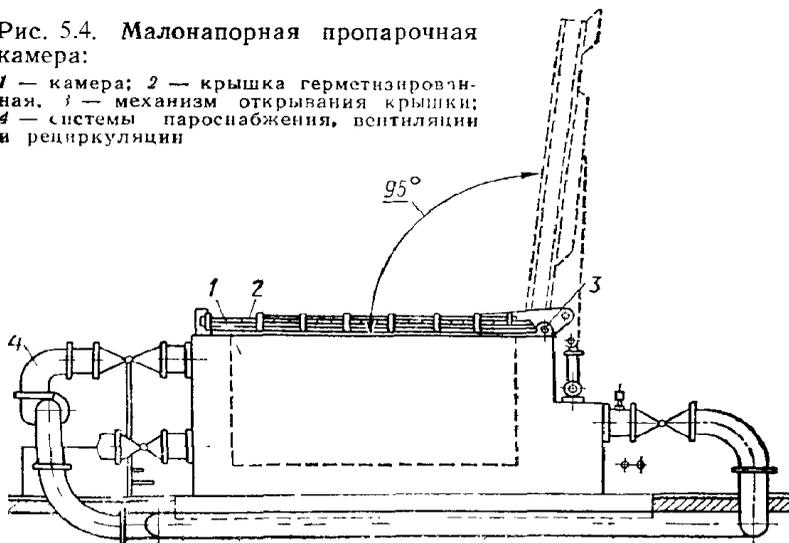
Качество изделий можно повысить, применяя малонапорные камеры (рис. 5.4), в которых создается избыточное давление 0,02...0,03 МПа. Камера имеет внутреннюю стальную рубашку толщиной 6 мм и снабжена крышкой с запирающим устройством, механизмами подъема и опускания. Крышку выполняют из металлических профилей, обшивают металлическим листом и заполняют теплоизоляцией. Верхняя и нижняя рамы каркаса крышки имеют фигурный паз для размещения резинового профильного уплотнителя специального сечения. Запирающее устройство, опорную раму которого замоноличивают в бетон корпуса камеры, имеет трубчатую рейку с прямоугольными выступами и гидроприводы. Для герметизации камеры во внутреннюю полость уплотнителя подается сжатый воздух давлением 0,5 МПа. Система автоматики контролирует положение запирающих устройств, повышение давления в прокладке и пуск пара в камеру. После завершения цикла тепловой обработки снижается сначала давление в камере, а затем в уплотнителе, запирающее устройство открывается и гидроцилиндры поднимают крышку. Шарнирное соединение опорной рамы и кронштейнов крышки позволяют поворачивать ее на 90°.

Оптимальная скорость нагрева камеры составляет 60 °С/ч (по сравнению с 30 °С/ч в обычных камерах), длительность обработки 5...6 ч (по сравнению с 11... 12 ч), расход пара снижается на 100...150 кг/м³ бетона.

Установка для тепловой обработки изделий продуктами сгорания природного газа состоит из камеры тепловой обработки, теплогенератора, систем рециркуляции, вентиляции, газоснабжения и автоматики безопасности (*на самостоятельное изучение*).

Рис. 5.4. Малонапорная пропарочная камера:

1 — камера; 2 — крышка герметизирующая. 3 — механизм открывания крышки; 4 — системы пароснабжения, вентиляции и рециркуляции



Стенды формования и паропрогрева

Стеновой способ производства применяют для изготовления крупноразмерных изделий, при изготовлении которых нельзя использовать передвижные формы. При этом способе изделия формуют непосредственно на стенде, представляющем собой ямную камеру малой глубины, на дне которой установлена железобетонная плита толщиной 120...200 мм.

В стендах с греющим дном в плите на глубине 50... 70 мм от поверхности уложены обогревающие трубы диаметром 25...32 мм, по которым проходит пар или горячая вода. Снизу, под плитой, находится теплоизоляционный слой сухого шлака толщиной 300...400 мм.

После формования изделия на стенде под крышку подводят пар. Расход пара при тепловлажностной обработке на стендах, по сравнению с обработкой в пропарочных камерах, повышен (400... 1000 кг/м³) за счет увеличения потерь теплоты в окружающую среду через большие ограждающие поверхности.

Ограждающие конструкции (пол, стены, крышку) для уменьшения потерь в окружающую среду следует покрывать паро- и гидроизоляцией, а по периметру стен устраивают гидрозатвор для предотвращения выбивания пара. Пол стенда выполняют с уклоном для стока конденсата и слив, который оборудован

гидрозатвором и подключен к общей системе сброса конденсата. Конструкция крышки стенда должна иметь необходимую жесткость во избежание перекосов.

Наиболее эффективны системы пароснабжения стендов, обеспечивающие интенсивную циркуляцию греющей среды. Так как камеры в стендах малой глубины, то циркуляцию обеспечивают по горизонтальному контуру, т. е. паровые стояки стоят вертикально в углах камеры, а направление сопловой подачи пара – горизонтальное, вдоль стен. При стендовом формовании плоских плит и панелей широко распространен способ тепловой обработки на подогреваемых формовочных матрицах или площадках с устройством в них паропроводящих каналов или регистров.

Для улучшения условий тепловой обработки изделия покрывают колпаками или крышками, под которые подают «острый» пар. Прочность колпаков обеспечивается металлическим каркасом, к которому крепится деревянная обшивка и утепление из шлаковаты или другого теплоизоляционного материала. Размеры колпаков соответствуют размерам прогреваемого изделия; расстояние от поверхности изделия до крышки и стенок колпака должно быть не менее 50 мм. Плотное прилегание колпаков к формам или площадке обеспечивается упругими брезентовыми или резиновыми подкладками, пришитыми по всему периметру опорных кромок. Жесткие каркасные колпаки при изготовлении изделий на подогреваемых стендах можно заменить покрытиями из двух слоев брезента или полиамидной пленки с прослойкой из минеральной ваты.

При изготовлении изделий сложной конфигурации применяют стальные или железобетонные матрицы. Так, при производстве лестничных маршей используют железобетонную матрицу (рис. 5.5). Форма для изделия образуется боковыми ограждающими конструкциями 1 и железобетонным основанием 2 с вмонтированными греющими трубами 3. Под основанием 2 устроена шлаковая или керамзитная теплоизоляция 4. Пар через паропровод 6 подается под колпак или крышку 5; конденсат удаляется через патрубок.

Для изготовления крупноразмерных изделий (пролетных мостовых конструкций) применяют *тоннельные камеры паропрогрева периодического действия*. Камеры бывают *проходными* (с двумя дверьми) и *тупиковыми* (одна дверь), двери в них выполнены из металлического каркаса, обшиты листовым металлом и теплоизолированы, а также герметизированы прокладками из термостойкой резины и специальными зажимами. Пар подается по

длине камеры перфорированными трубами, днище имеет уклон для стока конденсата. Камера имеет высоту и ширину 1,8...2,0 м и длину 25 м. Изделия длиной 21 или 24 м подаются в камеру по рельсовому пути на передвижном стенде.

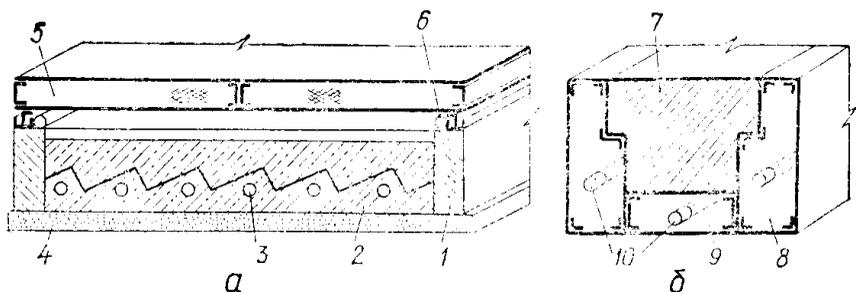


Рис. 5.5. Матрица (а) для изготовления лестничных маршей и термоформа (б):

1 – ограждающие стены; 2 – железобетонное основание; 3 – греющие трубы; 4 – теплоизоляционный слой; 5 – крышка; 6 – паропровод; 7 – изделие; 8 – боковые стенки; 9 – поддон; 10 – штуцера и перфорированные трубы пароподачи

Для тепловой обработки изделий применяется также установка, в которой паровой колпак имеет П-образную форму и расположен на роликовых опорах, по торцам снабжен шторными завесами с приводами (рис. 5.6.). В данной установке можно одновременно подвергать тепловлажной обработке несколько труб.

Институтом Индустройпроект разработана, исследована и опробована система пароснабжения форм труб с использованием эжекторов, обеспечивающая нагрев бетона труб до 70...80 °С в течение 4 ч и сокращение расхода пара до 250...300 кг/м³. В настоящее время исследовано несколько методов электротермообработки труб с помощью ТЭНов, обогрев горячим воздухом, индукционный нагрев, а также обогрев продуктами сгорания природного газа.

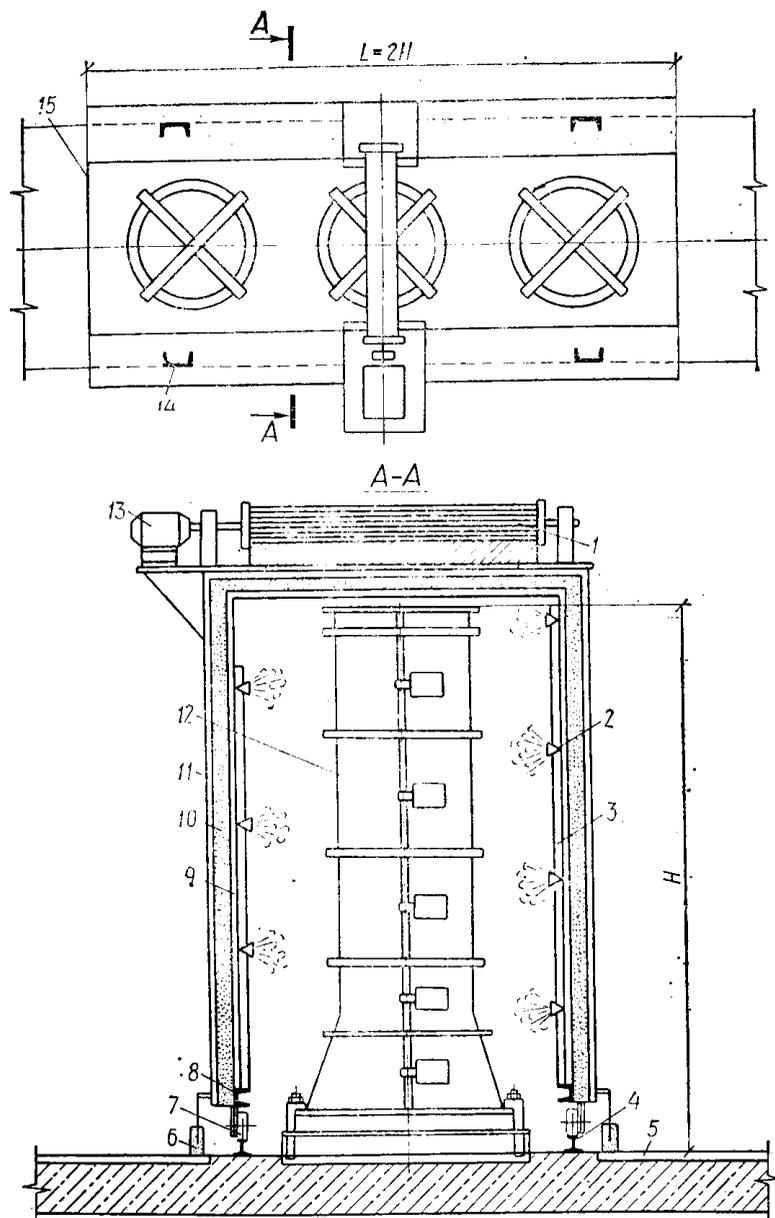


Рис. 5.6. Передвижная пропарочная камера для термообработки виброгидропрессованных труб:

1 – барабан; 2 – сопла; 3 – подающий паропровод; 4 – рельс; 5 – основание; 6 – гидрозатвор; 7 – колесо-каток; 8 –

швеллер: 9, 11 – внутренняя и наружная обшивки колпака; 10 – теплоизоляция; 12 – труба; 13 – электродвигатель; 14 – П-образные рамы; 15 – шторная завеса

Термоформы

Улучшить условия структурообразования бетона при тепловлажностной обработке (уменьшить интенсивность массообмена, снизить вероятность переувлажнения или пересушивания материала) можно при отсутствии непосредственного соприкосновения поверхности изделия с теплоносителем.

Контактный прогрев бетонных и железобетонных изделий осуществляется в термоформах через днища и стенки формы, а в герметически закрытых формах – и через крышку формы. Жесткие конструкции поддона и боковых стенок обшивают металлическим листом и герметизируют, а в образовавшиеся полости через штуцера подводится теплоноситель; в отсеки теплоноситель может быть подан с помощью перфорированных труб. Для равномерного распределения теплоносителя и его циркуляции в ребрах жесткости делают круглые или овальные отверстия диаметром не менее 100 мм.

В качестве теплоносителя используют пар, воду, высокотемпературные теплоносители (например, масло, дитолилметан). Возможно также применение электроэнергии, для чего в полостях устанавливают трубчатые или плоские электронагреватели. Температура в тепловых отсеках может достигать 130... 140 °С, что интенсифицирует процесс и сокращает длительность тепловой обработки. При использовании пара в качестве теплоносителя предусматривают систему удаления конденсата и для облегчения его стока форму устанавливают с уклоном 1...2°.

Применение термоформ позволяет уменьшить долю производительных расходов теплоты на прогрев свободного пространства и ограждений тепловых установок, а теплоизоляция термоформ уменьшает потери теплоты в окружающую среду.

На заводах ЖБИ применяют стационарные и передвижные термоформы. *Стационарные термоформы* применяют, как правило, для изготовления крупноразмерных изделий. Постоянно подключенные к тепловой сети, эти формы имеют неподвижный поддон и откидывающиеся борта. Вибрирование производят с помощью навесных или глубинных вибраторов. При использовании индивидуальных термоформ особое внимание следует обратить на гидро- и теплоизоляцию открытых поверхностей изделий во избежание неравномерного прогрева и снижения эксплуата-

тационных характеристик изделий, что может вызвать повышенную пористость и водопоглощение изделия, низкую морозостойкость.

Широкое распространение получили плоские термоформы:

- вертикальные (применяемые в кассетных установках);
- горизонтальные (применяемые в пакетировщиках).

Горизонтальные термоформы имеют греющий поддон и теплоизолированные откидные борта (рис. 5.7). Рамная конструкция формы 4, обеспечивающая ее жесткость, герметизирована днищами формы 1 и термоотсека 5. Пар разводится по отсекам перфорированным трубопроводом 3; конденсат стекает по уклону и через конденсатопровод 2 удаляется из формы.

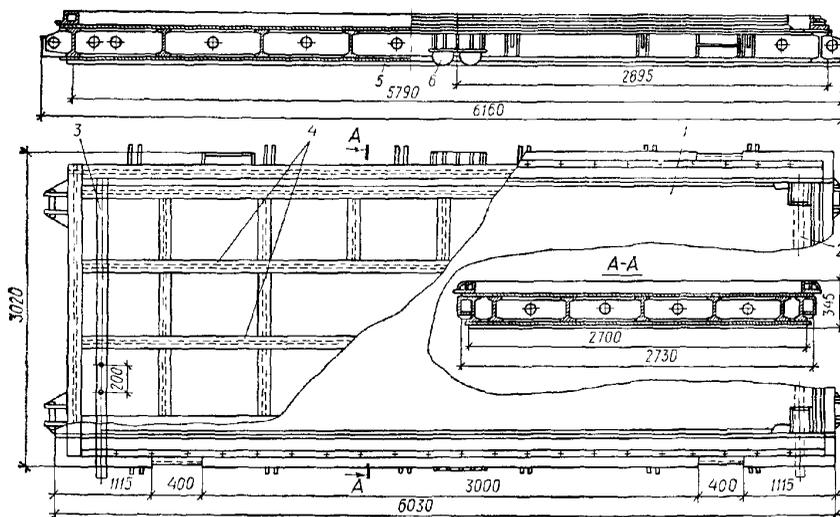


Рис. 5.7. Горизонтальная термоформа: 1 – днище формы; 2 – конденсатопровод; 3 – перфорированный паропровод; 4 – рамная конструкция формы; 5 – днище термоотсека; 6 – фиксирующее устройство.

В пакетировщике (рис. 5.8) изделие, ранее сформованное в термоформе, механическим или гидравлическим приводом поднимается и прижимается к днищу ранее поднятой и удерживаемой кронштейнами термоформы.

В установках непрерывного движения вверх на одно изделие передвигается весь пакет. Верхняя термоформа с изделием, пройдя весь цикл тепловой об-

точной тележки подается на пост распалубки. Конструкции паке-тировщиков позволяют собрать в пакет 6 или 10 термоформ. Теплоноситель в установках периодического действия с помощью гибких шлангов подается в каждый тепловой отсек, а в установках непрерывного действия – автоматическими клапанами. Привод автоматических клапанов заблокирован с приводом стола-подъемника; в процессе передвижения формы вверх пар отключается и вновь подключается после установки форм в фиксированное положение.

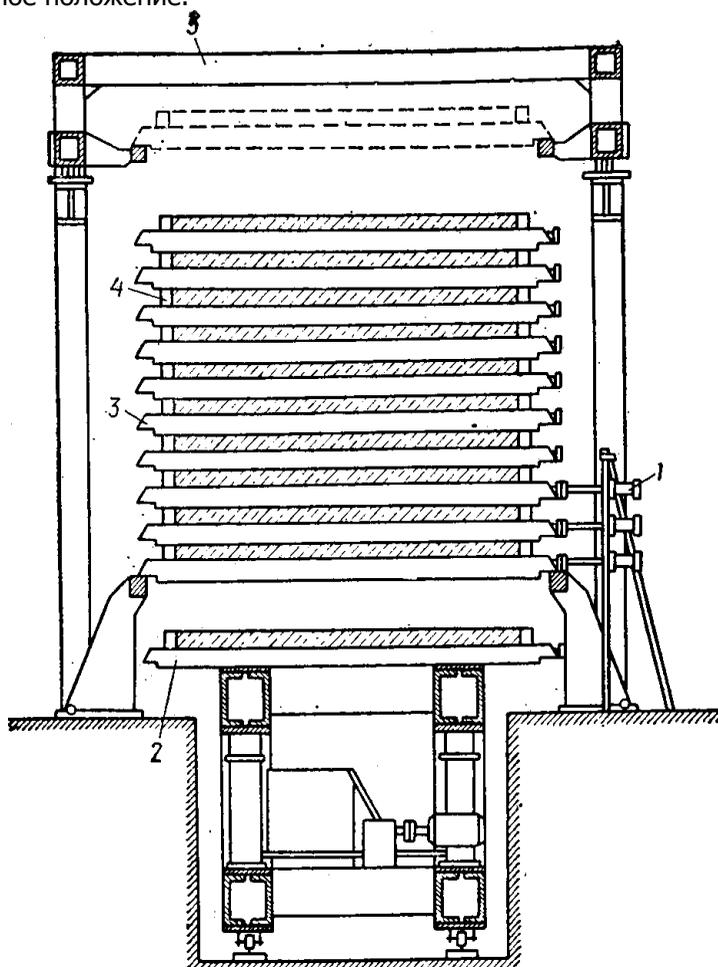


Рис. 5.8. Паке-тировщик: 1 – автоматические клапаны подачи пара; 2 – стол-подъемник; 3 – термоформы; 4 – изделие; 5 – передаточная тележка.

Пароснабжение термоформ осуществляется следующим образом (рис. 5.9). Поступающий по магистральному паропроводу 8 пар через расходомер 7 и узел управления 6 с регулирующими устройствами подается в коллектор 5, из которого подводится к автоматическим клапанам 2. Автоматические клапаны с помощью пневмоцилиндров 4 прижимаются к приемным конусам пакета термоформ 1, открывая проход и пропуская пар в отсеки; при обратном движении пневмоцилиндров клапаны отходят от термоформ, автоматически перекрывая подачу пара. Паровая гребенка 3 с вентилями дает возможность при необходимости осуществлять ручное подключение термоформ через гибкие шланги. Аналогично устроена система удаления конденсата: через автоматические клапаны для удаления конденсата 9, коллектор 10 и конденсатопровод 11 конденсат поступает в конденсационные горшки, затем его подают в котельную установку.

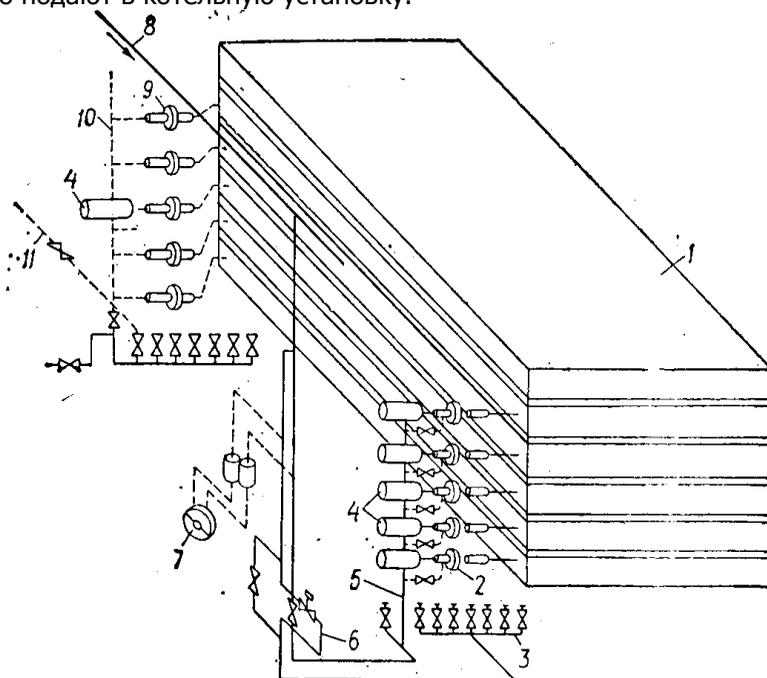


Рис. 5.9. Схема пароснабжения пакетировщика:

1 – пакет термоформ; 2 – автоматические клапаны; 3 – паровая Гребенка; 4 – пневмоцилиндры; 5 – паровой коллектор; 6 – узел регулирования; 7 – расходомер; 8 – паропровод; 9 – клапаны для удаления конденсата; 10 – коллектор конденсата; 11 – конденсатопровод

При установке термоформ в пакет без прокладок изделие прогревается с двух сторон: с днища формы и днища верхнего термоподдона. При этом изделие под воздействием массы верхнего изделия испытывает давление 0,03 МПа. К последнему (верхнему) изделию теплоноситель не подают и изделие начинает остывать, остывает оно также при движении на пост распалубки. Общая длительность тепловой обработки составляет 6...8 ч при расходе пара 200...250 кг/м³.

В *малонапорных термоформах* пакетиروщик собирает в пакет изделия уже распалубленные, находящиеся на силовых поддонах. Поддоны и герметизирующие прокладки создают замкнутые полости, в которых помещены изделия. За счет подачи пара и расширения паровоздушной смеси, а также испарения влаги из бетона возникает избыточное давление около 0,03 МПа, которое, обжимая поверхностные слои бетона, повышает его прочность и морозостойкость. Пар подается в пространство между поддонами и там же осуществляется отбор конденсата. Так как полости (в малонапорных термоформах – камеры) заполнены воздухом, то начальная относительная влажность в них составляет 40...50 %, а в дальнейшем за счет подачи пара и испарения влаги из бетона она повышается до 90...95 %. Длительность тепловой обработки бетона в таких термоформах составляет 6...8 ч. Этот способ применяют только для обработки изделий из жестких бетонных смесей, пригодных для немедленной распалубки

Хотя съем готовых изделий с 1 м² производственной площади, занятой пакетиروщиком, выше, а металлоемкость вдвое ниже, чем при кассетной технологии, способ производства с использованием пакетиروщиков требует строительства формовочной линии, занимающей значительные площади.

В настоящее время начинает распространение *пакетный способ приготовления однослойных плоских конструкций*. Сущность его состоит в изготовлении на одном поддоне или площадке нескольких изделий, разделенных прокладками из теплопроводного материала. Количество изделий в таком пакете определяется массой одного изделия с формой, грузоподъемностью внутрицехового транспорта, продолжительностью формования всех изделий в пакет и видом теплоносителя для разогрева изделий при тепловой обработке. Изготовление плит осуществляется в искусственно создаваемых массивах путем составления их в пакеты для уменьшения поверхности теплоотдачи. Формы с изделиями свободно опираются друг на друга и передают давление массы вышележащих в пакете изделий и форм на бетон нижележа-

щих изделий. При этом способе осуществляется равномерный по всему объему изделий в массиве кондуктивный прогрев за счет подводимой теплоты и внутреннего тепловыделения при гидратации цемента.

Процесс изготовления изделий в пакете состоит в последовательном формовании их в формах, составляемых одна на другую, поверхностным методом при помощи скользящего виброустройства. В отличие от традиционной, конструкция формы для пакетной технологии представляет собой силовую раму из продольных и поперечных бортов и плоского днища. Все нагрузки на форму при формовании изделий, в том числе и усилие натяжения стержней напрягаемой арматуры, воспринимаются рамой бортовых элементов.

Тепловую обработку изделий в пакетах с модулем поверхности до 10 м^{-1} производят без камер, а свыше 10 м^{-1} – в теплоизолирующих камерах. Для электрообогрева используют плоские низкотемпературные нагреватели, монтируемые в днища форм и питающиеся при напряжении до 60 В от трансформаторов типа ТМОБ-63. При паровом обогреве теплоноситель подают в паровую рубашку поддонов, имеющих нижнюю обшивку. Подача осуществляется через отверстия в боковых стенках встречными потоками посредством сопел Лаваля или коротких патрубков, устанавливаемых на парораспределительных стояках. В этом случае общая высота изделий в пакете не должна превышать 0,25 м. Поэтому паровый обогрев с целью экономии теплоэнергии и для улучшения условий труда производят в теплоизолирующих камерах, где пакеты составляют в штабеля.

Кассетные установки

Кассетные установки сочетают в себе установки для формования и тепловлажностной обработки изделий, что обуславливает значительную экономию производственных площадей. Бетонные и железобетонные изделия (плоские, ребристые) формируют и прогревают в вертикальных сборно-разборных формах. Так как длительная тепловая обработка снижает производительность и эффективность кассетного способа производства, то такие установки используются в двухстадийной технологии: формование и короткий прогрев в кассетной установке, а окончание процесса тепловой обработки в камерах выдерживания.

Конструктивно кассетные установки состоят из неподвижной станины, подвижных тепловых отсеков, разделительных стенок, опор и прижимных домкратов. К паровым отсекам

или разделительным стенкам крепятся днища и борта форм, которые в собранном состоянии (установка сжата домкратами) образуют вертикальные формы, запотняемые арматурой и бетоном. Торцевая неподвижная теплоизолированная стенка крепится к раме станины, а подвижные стенки и отсеки перемещаются на роликовых опорах. Передвижение стенок производится гидравлическими домкратами, а закрепление их – установочными клиньями в кронштейнах.

Тепловые отсеки различных типов кассет (конструкции Гипростроймаша, Гипростройиндустрии, и др.) имеют различные толщину и конструктивные особенности. Как правило, это жесткие металлические конструкции толщиной 70...240 мм, имеющие каркас и обшитые металлическим листом толщиной 12...24 мм. Исключение составляют тепловые отсеки кассет конструкции ЦНИИЭПЖилища, имеющие плоский тепловой регистр из стальных трубок, вложенный между двумя армированными железобетонными стенками; общая толщина отсека 40 мм. Несмотря на некоторые осложнения теплопередачи (теплоноситель–трубы–бетон–изделие), эти тепловые отсеки выгодны, так как имеют малую металлоемкость.

Теплоноситель к греющим отсекам подводится с помощью гибких шлангов, арматурный каркас и бетонная смесь подаются сверху. Вибрирование бетона производится навесными вибраторами. В большинстве случаев в качестве теплоносителя используют пар, однако возможно применение горячей воды и высокотемпературных теплоносителей.

К недостаткам кассетных установок относится необходимость использования пластичных бетонных смесей, так как высокую узкую щель (формовочный отсек), в которой находится арматурный каркас, заполнить жесткой бетонной смесью и уплотнить невозможно. Применение же пластичных смесей требует снижения скорости прогрева, удлинения цикла тепловой обработки и ограничения температуры нагрева (не выше 100 °С).

Во всех конструкциях кассетных установок тепловые и формовочные отсеки раздвигаются в горизонтальной плоскости. Исключение составляет кассетная установка конструкции ЦНИИЭПЖилища с оснасткой, передвигающейся в вертикальной плоскости и позволяющей применять жесткие бетонные смеси. Значительная высота формовочного отсека приводит к тому, что нижние слои бетонной смеси находятся под избыточным давлением и имеют более высокие прочностные показатели (в 1,5..2 раза), чем верхняя часть изделия. С целью экономии цемента при-

меняют бетонную смесь переменного состава, с уменьшением расхода цемента для нижних слоев.

Кассетные установки отличаются высокой металлоемкостью (до 10 т металла на одно изделие). Так как эти установки периодического действия, то прежде чем начнет прогреваться изделие, необходимо прогреть всю бортоснастку. Если формовочные отсеки чередуются с тепловыми, то прогрев изделий происходит с двух сторон; если же между изделиями установлены разделительные стенки (гибкие из металлических листов толщиной 24 мм или жесткие в виде пространственных каркасов), то осуществляется односторонний прогрев, а температура в средних изделиях на 10...30 °С отстает от температуры изделий, расположенных около теплых отсеков.

В кассетных установках неравномерность прогрева изделия может иметь место по длине (быстрый прогрев в зоне подачи пара и слабое поступление теплоносителя в дальний торец из-за обилия ребер жесткости), по толщине (при одностороннем прогреве) и высоте (из-за расслоения теплоносителя в узком высоком отсеке). Поэтому важное значение приобретают организация теплообмена, движение и циркуляция теплоносителя, что сказывается на скорости прогрева, расходах тепловой энергии и эксплуатационных характеристиках изделий.

Как известно, интенсивность теплообмена зависит от скорости движения и турбулизации теплоносителя. Поэтому предусматривают циркуляцию, многократное использование и многоходовое движение теплоносителя в отсеках.

Одной из наиболее распространенных схем пароснабжения кассетных установок является *эжекторная система* (рис. 27). Применение эжектора позволяет организовать циркуляцию теплоносителя через тепловой отсек, уменьшить неравномерность прогрева изделий, экономить тепловую энергию, многократно используя теплоноситель.

Пар с высокой температурой из магистрального паропровода / через узел регулирования 3 попадает в эжектор 4 В эжекторе, имеющем сопло, конфузур и диффузор, создается разрежение и охладившаяся паровоздушная смесь из тепловых отсеков 5 через резиновые шланги и отсасывающий коллектор 9 подсасывается в эжектор. Смешавшись со свежим паром и повысив температуру, теплоноситель через подающий коллектор 2 поступает в тепловые отсеки 5, прогревая формовочные отсеки 10 с бетонными изделиями. Остывший пар конденсируется и по резиновым шлангам стекает в коллектор сбора конденсата 6 и далее в кон-

денсатопровод 8; конденсационный горшок 7 отделяет конденсат и не позволяет пару из тепловых отсеков уходить в конденсатопровод.

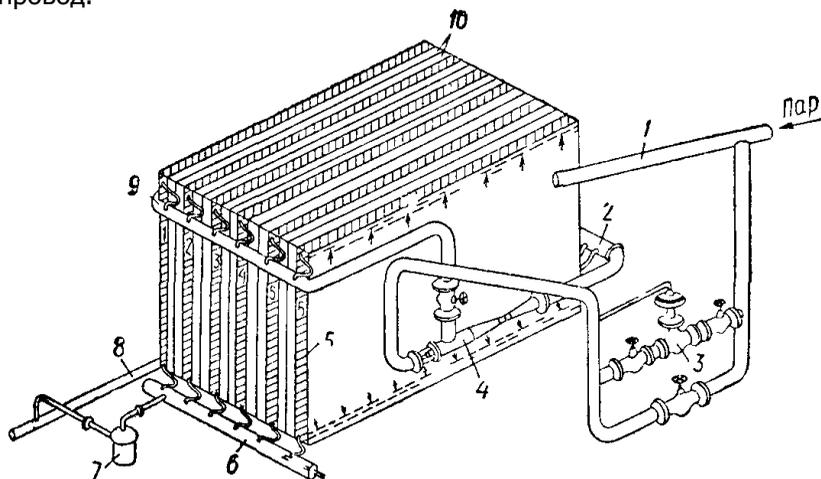


Рис. 5.10. Схема эжекторной системы пароснабжения кассеты: 1 – магистральный паропровод; 3 – подающий коллектор; 3 – узел регулирования, 4 – эжектор, 5 – тепловые отсеки, 6 – коллектор (борд) конденсата; 7 – конденсационный горшок, 8 – конденсатопровод, 9 – отсасывающий коллектор; 10 – формовочные отсеки с разделительной стенкой.

Прогрев изделий в кассетных формах может производиться сразу после окончания формования, без предварительного выдерживания. Для ускорения прогрева и сокращения продолжительности тепловой обработки целесообразно бетонную смесь укладывать в предварительно подогретую до 40...45° форму. В этом случае продолжительность подъема температуры в отсеках форм до максимальной может быть сокращена до 1...1,5 ч.

Продолжительность изотермического прогрева зависит от температуры и расположения тепловых отсеков, толщины изделий и состава бетона.

Остывание изделий после прекращения подачи пара происходит весьма медленно из-за большой теплоемкости кассеты с изделиями, поэтому распалубку изделий делают при температуре 75...80 °С. Для снижения температуры в тепловом отсеке применяют принудительное охлаждение водой.

Ускорить процесс твердения бетона можно путем введения химических ускорителей. Наибольшее сокращение сроков тверде-

ния может быть достигнуто предварительным электроразогревом бетонной смеси и последующим кратковременным прогревом бетона в кассетной форме при температуре 95...100 С.

Повышение температуры изотермического прогрева выше 100°C связано с повышением давления в отсеках (при применении пара в качестве теплоносителя) и для плоских изделий с большой поверхностью требует значительного усиления каркаса отсеков. В этих случаях рациональнее применять высокотемпературные теплоносители, имеющие температуру кипения 250...350 °С.

Удельные расходы пара в кассетных установках должны составлять 200 кг пара на 1 м³ бетона, однако в зависимости от длительности цикла, состояния кассет и качества эксплуатации они колеблются от 200 до 1000 кг/м³.

Автоклавные установки

Автоклавные установки предназначены для тепловлажностной обработки бетонных, железобетонных и силикатных изделий в среде с избыточным давлением.

Наличие избыточного давления среды в начале тепловой обработки и возрастающая относительная влажность паровоздушной среды в процессе ее способствуют повышению физико-механических свойств твердеющего бетона, сокращению длительности обработки и уменьшению расхода цемента.

Повышенное давление в сочетании с высокой температурой активизируют реакции гидратации вяжущих; формирование структуры свежееуложенного бетона проходит в благоприятных условиях при постоянно действующем давлении. Под воздействием давления в изделии происходит обжатие поверхностных слоев материала, повышающее прочностные свойства бетона, улучшающее морозостойкость и уменьшающее водопоглощение. Автоклавный способ обработки позволяет получать высококачественные изделия даже при применении низкомарочных цементов или местных вяжущих, а также теплоизоляционные материалы (пенобетоны, ячеистые бетоны).

Рабочее избыточное давление в автоклавах 0,8 - 2,5 МПа. Оптимальные значения температуры среды и давления при изотермическом выдерживании и его продолжительность зависят от вида вяжущего: при применении вяжущих на основе извести и портландцемента они находятся в пределах 1,2... 1,6 МПа, а некоторых побочных продуктов промышленности (например нефелинового цемента) – 1,6...2,5 МПа.

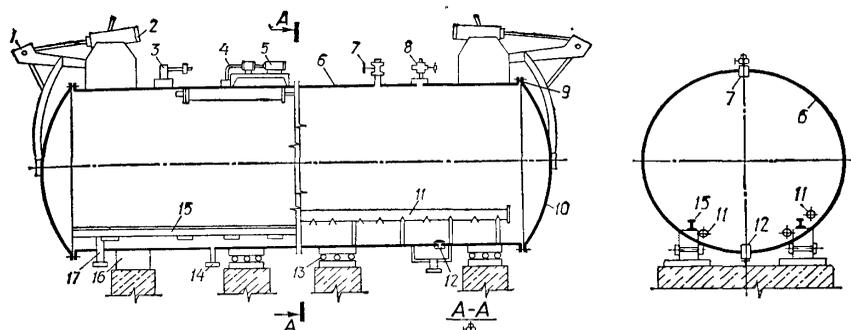


Рис. 5.11. Автоклав:

1 – механизм подъема крышки; 2 – гидроцилиндр; 3 – предохранительный клапан; 4 – маслопроводы; 5 – электропривод; 6 – корпус; 7, 8, 17 – перепускной, выпускной и впускной штуцера; 9 – байонетный затвор; 10 – крышка; 11 – перфорированный паропровод; 12 – штуцер удаления конденсата; 13, 16 – подвижная и неподвижная опоры; 14 – продувочный штуцер; 15 – рельсовый путь

Автоклав представляет собой стальной цилиндрический сосуд диаметром 2,6 или 3,6 м длиной 17...21 м с одной (тупиковый) или двумя крышками (проходной). Массивный стальной корпус 6 с толщиной стенок 20...30 мм выдерживает высокое давление. Он установлен на одной неподвижной опоре 16 и нескольких подвижных опорах 13, что позволяет ему перемещаться при нагревании и охлаждении. Автоклав имеет механизмы подъема крышек и байонетные затворы 9, обеспечивающие его герметичность. Прижим байонетных колец и подъем крышек осуществляется гидравлической системой, состоящей из электропривода 5 насосной станции, маслопроводов 4 и гидроцилиндров 2. Загрузку изделий в автоклав производят тележками с помощью переходного мостика, соединяющего рельсовый путь в цеху с рельсами 15 внутри автоклава.

Система пароснабжения состоит из следующих элементов: продувочный 14, впускной 17, перепускной 7, выпускной 8 штуцера с регулирующей и запорной арматурами; система удаления конденсата, подсоединенная к штуцеру 12; предохранительный клапан 3. Пар в автоклаве распределяется сопловой подачей или через перфорированный паропровод 11, режим подачи пара регулируется программным регулятором температур ПРЗ или РПТА-2.

Перед началом запаривания автоклав продувают паром для удаления воздуха, снижающего интенсивность теплообмена. В первый период обработки происходит прогрев изделий до температуры 100 °С при обильной конденсации пара на изделиях и стенках автоклава; во второй период температура и давление повышаются до принятого максимального значения, что сопровождается прогревом и обжатием бетона. После периода изотермического выдерживания, длительность которого связана с толщиной изделия, видом материала и величиной давления, наступает период охлаждения. Он наиболее опасен из-за возможного нарушения структуры материала. Так, при снижении давления в автоклаве в материале некоторое время сохраняется максимальное давление и возникающий градиент давления может превысить допустимые значения. При этом резкое снижение давления в среде может привести к тому, что находящаяся в изделии влага окажется перегретой и произойдет бурное вскипание по всему объему изделия. Поэтому снижение давления и температуры производится по ступенчатому графику с промежуточными выдерживаниями для выравнивания давлений и температур по объему изделия. Для экономии пара график режима обработки изделий составляют для нескольких автоклавов так, чтобы подъем давления в одном совпадал со снижением в другом; в этом случае пар перепускают в другой автоклав до выравнивания давления в них.

В некоторых случаях после снижения давления до атмосферного производят *вакуумирование*. Вакуумирование крупно-размерных изделий из ячеистого бетона в период охлаждения после достижения атмосферного давления дает возможность снизить влажность изделий и ускорить их охлаждение без потери прочности. Вакуумирование также создает дополнительный градиент давления в теле изделия, обуславливающий движение влаги от центра к периферии и необходимое обезвоживание ячеистого бетона.

После открытия крышки или выгрузки изделий из автоклава изделия необходимо выдерживать в условиях цеха, так как внутри них еще достаточно высокая температура и процесс охлаждения бетона продолжается.

Эффективность автоклавного способа обработки в значительной степени зависит от степени заполнения автоклавов изделиями, т. е. укладка изделий должна быть максимальной по всему объему. Длину автоклава выбирают в соответствии кратности его размеров размерам типовых обрабатываемых изделий.

УСТАНОВКИ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

В установках непрерывного действия в отличие от установок периодических легче механизировать и автоматизировать весь процесс. Производительность труда обслуживающего персонала на них значительно возрастает. В качестве установок непрерывного действия для тепловлажностной обработки наиболее широко применяют щелевые горизонтальные, щелевые полигональные и вертикальные пропарочные камеры.

Горизонтальные пропарочные камеры щелевого типа

Горизонтальные пропарочные камеры щелевого типа представляют собой туннель длиной $L=100-120$ м. Ширина туннеля проектируется в расчете на движение через него одного-двух изделий на каждой форме-вагонетке и находится в пределах $B=5-7$ м. Высота $H=1,0-1,17$ м. В камере помещается от 15 до 30 вагонеток с изделиями. В отличие от периодически действующих камер, где подъем температуры, а затем изотермическая выдержка и охлаждение осуществляются последовательно во времени в одной камере (нестационарное температурное поле), щелевые пропарочные камеры по длине разделяются на соответствующие зоны: зону подъема температуры среды, изотермической выдержки и охлаждения (стационарное температурное поле).

По длине камера разделяется на три зоны: зону подъема температуры (подогрева) I, зону изотермической выдержки II и зону охлаждения III. В первую и вторую зоны подводится тепловая энергия. Третья зона вентилируется холодным воздухом. Разделение камеры на функциональные зоны позволяет экономить тепловую энергию за счет затрат теплоты на нагрев конструкций после каждого цикла по сравнению с установками периодического действия.

Схема горизонтальной щелевой пропарочной камеры показана на рис. 6.1.

Принцип работы такой камеры следующий. Вагонетка с изделием в форме 1 поступает на снижатель 2, оборудованный толкателем. Снижатель опускает вагонетку на уровень рельсов щелевой камеры 4, и толкатель выталкивает вагонетку со снижателя в камеру. При этом вагонетка с изделием проходит под механической шторой 3, которая предохраняет торец камеры от выбивания паровоздушной смеси и проникания в нее холодного воздуха. Одновременно вагонетка с изделием усилием толкателя про-

двигает весь поезд» находящийся в камере, и последняя вагонетка также через герметизирующую штору 5 выдвигается на подъемник 6, который поднимает вагонетку на уровень пола, откуда она транспортируется на пост распалубки изделий. Изменяя ритм загрузки вагонеток можно повышать или снижать производительность камеры.

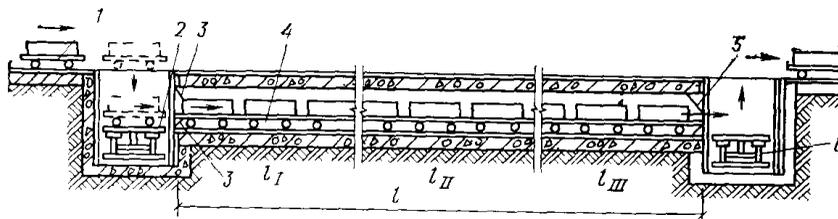


Рис. 6.1 Схема горизонтальной пропарочной камеры щелевого типа

L – длина камеры, L_I , L_{II} , L_{III} – соответственно длины зон подъема температуры, изотермической выдержки и охлаждения; 1 – вагонетка, 2 – снижатель, 3, 5 – механические герметизирующие шторы, 4 – рельсы, 6 – подъемник.

Тепловая обработка изделий в камере сводится к следующему. Материал, поступивший в камеру, может подогреваться либо паром, либо ТЭНами. При нагреве паром для его подачи используют двухсторонние стояки, причем первая пара стояков располагается на расстоянии 20-25 м от входа с шагом от 2 до 6 м, а последняя – на расстоянии 35-40 м от выгрузочного торца камеры. Пар смешивается с воздухом, образуя паровоздушную смесь. Для улучшения использования теплоты пара устраивают рециркуляцию: паровоздушную смесь отбирают у загрузочного конца камеры и возвращают в конец зоны подогрева. Рециркуляция помогает уменьшить потери пара, проникающего в зону охлаждения за счет его передвижения к загрузочному концу камеры. Кроме того, в этих же целях между зоной изотермической выдержки и охлаждения устраивают воздушные завесы или перегородки из термостойкой резины. Воздушные завесы в целях экономии тепла устраивают и в месте загрузки камеры. Максимальный нагрев изделий при использовании пара составляет 80-85°C, ибо в данном случае в камере кроме пара находится воздух.

В качестве теплоносителя применяют: «острый» пар, т. е. непосредственное соприкосновение пара с поверхностью бетона; «глухой» пар – обогрев паровыми регистрами; электронагревате-

ли. При обогреве «острым» паром его подают в двухсторонние стоянки с шагом 2-6 м, а затем через перфорированные трубы или гребенки с установленными на них соплами выпускают в камеру. При этом образуется паровоздушная смесь, которая конденсируется на холодных изделиях. В таких камерах необходимо предусматривать уклоны для стока конденсата и устройства для ее сбора.

При тепловой обработке изделий из легких бетонов (например, наружных стеновых панелей из керамзитобетона) применяют «глухой» пар, так как осаждающийся конденсат повышает влажность изделия. Количество регистров, необходимое для зоны нагрева, определяют из расчета теплового баланса и теплоотдачи одного регистра. Регистры обычно изготавливают из гладких труб диаметром 76 мм и длиной 5 м; число труб в регистре колеблется от 5 до 15 шт. и зависит от размеров камеры и места установки. Для определения теплоотдачи регистра подсчитывают поверхность всех труб в регистре, а затем рассчитывают необходимое количество регистров. Расход пара при такой обработке бетона составляет 200-250 кг/м³ бетона.

В настоящее время применяют *щелевые камеры с обогревом электроэнергией с помощью ТЭНов*. Трубчатые электронагреватели длиной 0,4-2,0 м и диаметром 6-18 мм имеют мощность 0,5-5 кВт и температуру поверхности 400-800°C; питание ТЭНов производится от электросети напряжением 380 В. Соединенные в блоки по несколько штук для гибкого регулирования температуры, ТЭНовы устанавливают на полу камеры под вагонетками в зоне нагрева, начиная с 5-10 м от загрузочного торца, а также в зоне изотермического выдерживания или под потолком. Общая мощность ТЭНов камеры около 1000 кВт.

Тепловую обработку с использованием ТЭНов применяют для изделий из легкого и конструктивно-теплоизоляционного бетона. Расход электроэнергии составляет 50...100 кВт·ч/м³.

Температура среды в камере в зоне установки блоков ТЭНов достигает 130...190 °С, но изделие прогревается медленно (2...5 °С/ч). При включении ТЭНов относительная влажность среды снижается с 90...100 % до 5...8%, что приводит к интенсивной сушке изделий. Керамзитобетонные изделия при этом теряют 50...70 кг воды на 1 м³ бетона, на что затрачивается треть всего расхода электроэнергии. Изделия после обработки с помощью ТЭНов имеют влажность 10...11 % по сравнению с 18...20 % после пропаривания. Изготовленные в таких камерах ограждающие конструкции обладают значительно меньшей теплопровод-

ностью и способствуют значительной экономии тепловой энергии в процессе эксплуатации зданий.

В щелевых камерах для улучшения условий теплообмена монтируются вентиляционные системы: рециркуляционная – в зоне нагрева и приточно-вытяжная – в зоне охлаждения. Воздушные завесы, перекрывающие торцы камеры и отделяющие зону охлаждения от зоны изотермического выдерживания, способствуют экономии теплоты.

После тепловой обработки в зонах подогрева и изотермической выдержки как в случае нагрева паром, так и при использовании ТЭНов изделия охлаждают. В зоны охлаждения с двух сторон устраивают каналы: один заборный, снабженный выведенными в цех заборными шахтами, на которых для регулирования забора воздуха устанавливают жалюзные решетки, другой канал – отборный, соединенный с вентилятором. Охлаждают изделия за счет тяги, создаваемой вентилятором в зоне охлаждения.

Щелевая камера для обработки изделий из легкого или конструктивно-теплоизоляционного бетона может быть оборудована *обогревом продуктами сгорания природного газа*. В зависимости от длины камера оснащена двумя или тремя тепловыми системами, основанными на применении теплогенераторов ТОК или ТОБ. Каждая из систем имеет рециркуляционный контур, включающий вентилятор, теплогенератор, воздуховоды и клапаны, регулирующие распределение потоков теплоносителя. Удаление отработанной газозадушной смеси производят с помощью вентиляционной системы.

При использовании теплогенераторов удельный расход природного газа на тепловую обработку 1 м³ железобетонных изделий составляет 10-20 м³ природного газа и 4-10 кВт·ч. При годовой производительности технологической линии 18 000 м³ стеновых панелей и коэффициенте заполнения объема камеры 0,16 расход природного газа составит 300 000 м³/год; режим обработки – 12 ч при максимальной температуре в камере 150 °С. Установленная мощность электрооборудования 145 кВт.

Полигональные пропарочные камеры щелевого типа

Полигональные пропарочные камеры щелевого типа представляют собой такой же туннель с соотношением размеров, подобным присущему горизонтальным пропарочным камерам щелевого типа, но имеют полигональное очертание (рис. 6.2). Принцип действия полигональной камеры заключается в следующем. Посредством снижателя 1 вагонетка с изделием 2 спускается к

входу в камеру, где захватывается тянущим механизмом, Привод тянущего механизма располагается в приямке шахты подъемника. Тянувший механизм протягивает поезд вагонеток при загрузке очередной из них на один шаг через камеру 3. Очередная выходящая из камеры вагонетка поступает на подъемник 5 и поднимается на уровень пола. Поднятая вагонетка с пропаренным изделием направляется к месту распалубки.

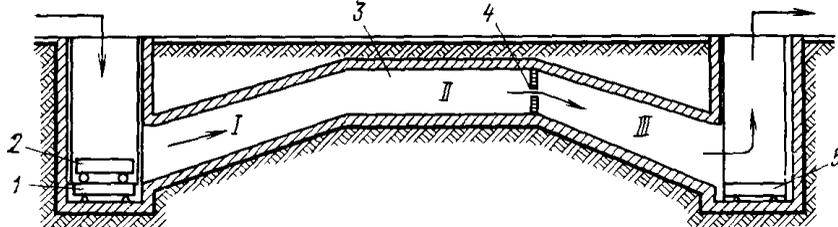


Рис 6.2. Схема полигональной пропарочной камеры щелевого типа

I, II, III – соответственно зоны подъема температуры, изотермической выдержки и охлаждения; 1 – снижатель, 2 – вагонетка, 3 – камера, 4 – воздушная завеса, 5 – подъемник.

Полигональный тип камер наиболее выгоден при использовании в качестве теплоносителя пара, хотя в них можно применять, обогрев и ТЭНами. При обогреве паром пар вводится во II зону изотермической выдержки, часть стоек расположена в конце I зоны подогрева. Зона III– охлаждения должна подвергаться вентиляции. В камере в начале ее пуска в эксплуатацию присутствует, как и в горизонтальных камерах, воздух. Вначале в камере образуется паровоздушная смесь. Далее поступающий пар, так как он легче паровоздушной смеси, занимает самую верхнюю часть зоны изотермической выдержки, выдавливает паровоздушную смесь в расположенную ниже зону подогрева. Зона охлаждения III отделяется от зоны изотермической выдержки воздушной завесой 4, поэтому в нее паровоздушная смесь почти не перетекает. Таким образом, в зоне изотермической выдержки воздуха не остается, относительная влажность достигает 95-97 % и температура в зоне повышается почти до 100 °С. Создаваемые условия позволяют несколько уменьшить длину камеры, ибо доля воздуха в паровоздушной смеси камеры снижается, а коэффициент теплопередачи от паровоздушной смеси к материалу возрастает. Полигональная камера благодаря улучшению условий теплообмена дает возможность снизить и расход пара на 8–10 % по сравнению с горизонтальной щелевой пропарочной камерой.

Пропарочные камеры с разным уровнем зон

Кроме рассмотренных типов камер на заводах применяют щелевые камеры с расположенными на разных уровнях зонами тепловой обработки. Схемы таких камер даны на рис. 6.3. На рис. 6.3.а показана щелевая камера, где материал на вагонетке входит в зону подогрева I, подогревается и попадает на снижатель 2. Снижатель спускает изделие на уровень рельсов зоны изотермической выдержки II, которая отделена от зоны подогрева глухим перекрытием. После зоны II материал попадает в зону III, где охлаждается за счет просасывания холодного воздуха, и материал через подъемник 3 транспортируется на пост распалубки. Принцип подачи и отбора воздуха аналогичен принятому для горизонтальной щелевой камеры (см. рис. 6.3). Тепловлажностная обработка в камерах, расположенных на разных уровнях, может осуществляться паром или ТЭНами. Такая камера занимает меньше места и легче комплектуется с остальным оборудованием.

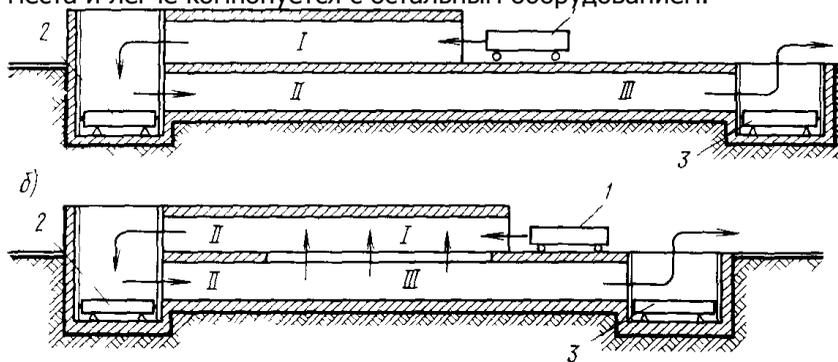


Рис. 6.3 Схема двухъярусной пропарочной камеры
 а – двухъярусная пропарочная камера, б – камера Киевского инженерно-строительного института; I, II, III – соответственно зоны подъема температуры, изотермической выдержки и охлаждения, 1 – вагонетка, 2 – снижатель, 3 – подъемник.

Более совершенная конструкция камеры предложена сотрудниками Киевского инженерно-строительного института (рис. 6.3.б). Она несколько отличается от предыдущей. Часть камеры, расположенная над полом, удлинена, а длина камеры, расположенной под полом по отношению к камере, показанной на рис. 6.3.а, уменьшена. Таким образом, зона подогрева I находится над зоной охлаждения III. Кроме того, между зоной охлаждения и зоной подогрева сплошного перекрытия не делают. Зона изотерми-

ческой выдержки II располагается на втором и первом ярусах и разделена сплошным перекрытием. Изделия, поступающие в зону подогрева камеры, оказываются над поступившими в зону охлаждения. Теплота нагретых изделий интенсивно передается холодным, нагревает их, что резко повышает тепловой КПД камеры, снижает общий расход теплоты. Нагрев камеры может вестись паром и ТЭНами, однако таких камер, к сожалению, еще мало.

Щелевые горизонтальные камеры можно располагать в два или три яруса, размещая при этом все зоны каждой из двух или трех камер на одном ярусе.

Вертикальные пропарочные камеры

Рациональное использование расслоения паровоздушной смеси предусмотрено в вертикальной камере конструкции А. Л. Семенова (рис. 6.4) Такие камеры могут быть оборудованы гидроподъемником и снижателем при высоте камеры 9 м (рис. 6.4, б) или двумя подъемниками и двумя снижателями при высоте камеры 5,5-6 м (рис. 6.4, а). Привезенное с линии формования передаточной тележкой изделие 2 по рольгангу 8 поступает на вход в камеру 6 и фиксируется под подъемным пакетом, удерживаемым отсекателями 13. Включается привод гидроподъемника 11, стол-подъемник 10 вместе с изделием идет вверх, и, достигнув пакета, поднимает его на одно изделие вверх; отсекатели фиксируются под изделием, прижатым к пакету снизу; пустой подъемник уходит вниз. Верхнее изделие захватывается передаточной тележкой 3 и устанавливается на верх разгрузочного пакета, тележка перемещается лебедкой, установленной вне камеры. Поднятый стол-снижатель 4 (разгрузочные гидродомкраты) снижает разгрузочный пакет на одно изделие: отсекатели задерживают пакет, а нижнее изделие уходит по рольгангу на распалубку.

В 2-штабельной камере длительность тепловой обработки составляет 8...9 ч при ритме конвейера 21... 22 мин, а в 4-штабельной камере – 10...12 ч при ритме 45 мин. Ограждения камеры выполнены из железобетонных или коробчатых конструкций, покрытых или заполненных теплоизоляцией.

Система пароснабжения вертикальной камеры состоит из узлов регулирования давления и расхода и системы раздачи пара, которая включает кольцевой перфорированный паропровод, смонтированный в верхней части камеры. Температуру среды в камере замеряют термометрами сопротивления, установленными в четырех точках по высоте камеры. В зависимости от режима обработки подача пара в камеру регулируется клапаном с

исполнительным механизмом, установленным на паропроводе перед камерой.

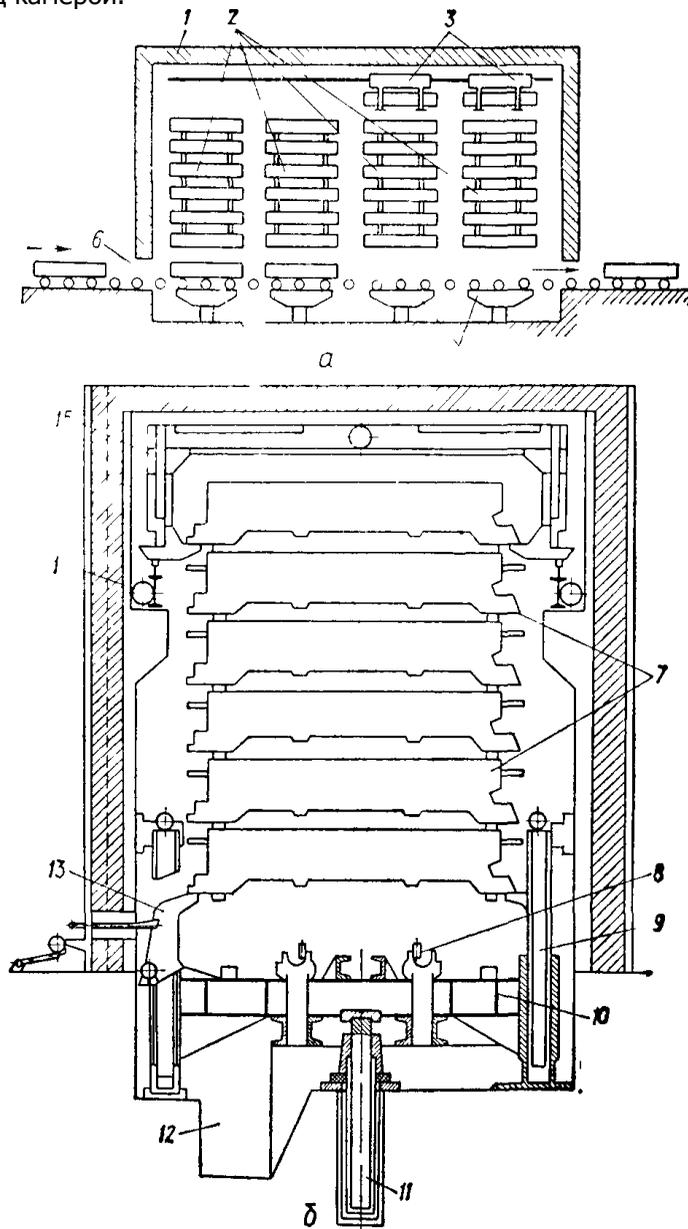


Рис 6.4. Схема вертикальной камеры паропрогрева (на 4 штабеля изделий):

а – общий вид, б – разрез. 1 – ограждения камеры, 2, 7 – формы с изделиями, 3, 15 – передаточные тележки, 4 – стол снижатель, 5, 10 – стол-подъемник, 6 – вход в камеру, 8 – рольганг, 9 – направляющие подъемника, 11 – гидродомкрат, 12 – станина подъемника, 13 – отсекабель 14 – кольцевой перфорированный паропровод

Выходя из паропровода, пар поднимается в верхнюю часть камеры, вытесняя воздух. В верхней зоне камеры постоянно поддерживается среда чистого насыщенного пара с относительной влажностью 100 % и температурой 100 °С; ниже находится паровоздушная смесь с постепенно убывающей температурой (на уровне входного отверстия температура равна температуре окружающей среды).

Таким образом, изделия, поднимаясь вверх, последовательно попадают в зоны с более высокой температурой, в верхней части камеры проходят изотермическое выдерживание, а затем, снижаясь, проходят зоны с более низкой температурой и охлаждаются. Изменением расхода пара регулируют высоту границ зон нагрева – охлаждения и изотермического выдерживания, тем самым регулируя длительность пребывания изделий в каждой зоне.

Вертикальные камеры тепловлажностной обработки теплотехнически экономичны, так как в среде насыщенного пара происходит эффективный теплообмен, максимально используется тепловая энергия пара, избыток пара конденсируется на поднимающихся холодных изделиях. При этом отсутствуют выбивания паровоздушной смеси, частично используется теплота снижающихся изделий для нагрева поднимающихся холодных. Удельный расход пара 100-150 кг/м³ изделий.

Вибропрокатные станы

Вибропрокатные станы представляют собой высокомеханизированные установки непрерывного действия, на которых выполняются все технологические операции по изготовлению изделий из сборного железобетона, в том числе их тепловлажностная обработка.

Вибропрокатный стан ВПС-6 (рис. 6.5) представляет собой непрерывный конвейер, выполненный в виде установленных на фундамент 12 формующей ленты 4, формовочного агрегата // и камеры тепловлажностной обработки 5.

В приемной части стана формующую ленту, состоящую

из отдельных стальных поперечных звеньев, очищают, смазывают и укладывают на нее арматурный каркас. Бетонную смесь, приготовленную в бетоносмесителе, из приемного бункера 10 распределяют с помощью шнека ровным слоем по ширине формирующей ленты, уплотняют вибробалкой и вибропригрузом; изделие зачищают и заглаживают. Отформованное изделие поступает в щелевую камеру тепловлажностной обработки 5, куда из паропровода 7 по парораспределительным гребенкам 8 подают пар температурой 115... 120 °С. В камере изделия в течение 2,5 ч прогреваются до температуры 95... 100 °С. Во избежание вспучивания и деформации изделий при быстром нагреве, поверхность бетона в камере покрывается замкнутой резиновой лентой 9, плотно прижимаемой к поверхности бетона идвигающейся вместе с ней. Пар подают под формирующую ленту и в свободное пространство камеры тепловлажностной обработки, что обеспечивает двухсторонний прогрев изделий.

После выхода изделия из камеры происходит механическое его распалубливание, изделие попадает на обгонный рольганг 1 и поступает на опрокидыватель, откуда транспортируется на склад или конвейер доводки.

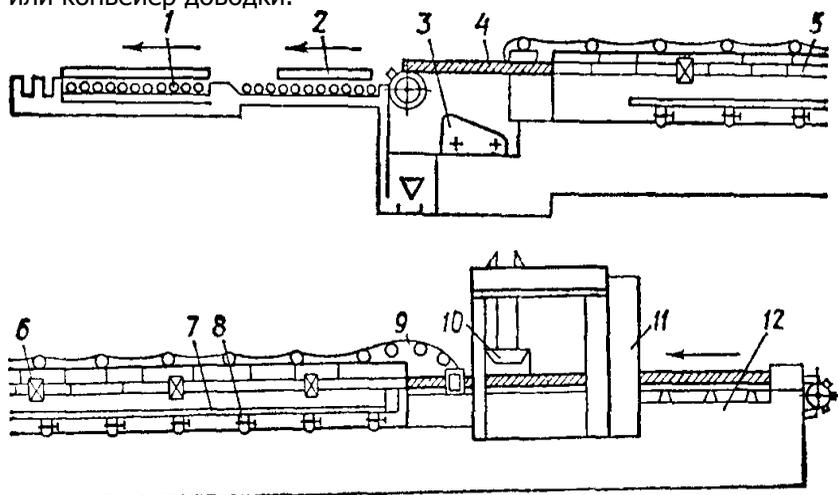


Рис. 6.5. Схема вибропркатного стана ВПС-6:

1 – рольганг, 2 – распалубленное изделие, 3 – привод, 4 – формирующая лента, 5 – камера ТВО, 6 – люк, 7 – паропровод, 8 – парораспределительные гребенки, 9 – резиновая прижимная лента, 10 – бункер бетоноукладчика, 11 – формовочный агрегат, 12 – фундамент.

К достоинствам вибропрокатных установок следует отнести компактность, совмещение в одной установке всех технологических операций, высокий уровень механизации и автоматизации. Однако сложность механической части стана, загрязнение направляющих и большого количества сопряжении, шарниров приводит к частым поломкам; при замене типа изделий требуется замена всей формующей ленты, стоимость которой составляет треть стоимости стана; применение мелкозернистых бетонов и сокращенных режимов обработки требует повышенных расходов высокомарочных цементов. Все эти недостатки сдерживают широкое распространение вибропрокатной технологии.

ЭЛЕКТРОТЕРМООБРАБОТКА БЕТОНА

Общие положения

Электротермообработку бетона применяют с целью ускорения его твердения за счет использования теплоты, получаемой от превращения электрической энергии в тепловую. Так, при возведении монолитных конструкций в зимних условиях с помощью методов электротермообработки предотвращают преждевременное замерзание бетона и обеспечивают его интенсивное твердение при любой отрицательной температуре наружного воздуха.

Применение методов электротермообработки бетона при изготовлении изделий в заводских условиях и на полигонах сокращает время выдерживания их в формах и снижает стоимость прогрева, значительно повышает культуру производства и улучшает санитарно-гигиенические условия труда, дает возможность автоматизировать производственные процессы.

Методы электротермообработки классифицируют на три следующие группы: электродный прогрев (собственно электропрогрев); обогрев различными электронагревательными устройствами; нагрев в электромагнитном поле.

Электродный прогрев бетона осуществляют непосредственно в конструкции или до его укладки в опалубку (предварительный электроразогрев), пропуская электрический ток через бетон или бетонную смесь. При использовании этого метода температуру материала можно повысить до требуемого уровня за любой промежуток времени – от нескольких минут до нескольких часов.

Электрообогрев с помощью электронагревательных устройств осуществляется путем подачи теплоты к поверхности бетона от источников превращения электрической энергии в тепловую – нагревателей инфракрасного излучения или низкотемпературных нагревателей (сетчатых, коаксиальных, плоских, ТЭНов и др.). Во внутренние слои конструкции теплота передается путем теплопроводности.

Прогрев бетона в электромагнитном поле производится передачей теплоты от разогревающихся вихревыми токами стальных элементов опалубки, арматуры и закладных частей. Электромагнитное поле с применяющимися на практике параметрами непосредственного воздействия на бетон не оказывает, а во внутренние слои материала теплота передается путем теплопроводности.

Электродный прогрев бетона

Так как при электродном прогреве выделение теплоты происходит непосредственно в бетоне при пропускании через него электрического тока, КПД использования электрической энергии при прочих равных условиях значительно выше; температурное поле распределяется в бетоне более равномерно.

Одним из основных исходных параметров при расчете электродного прогрева бетона является его удельное электрическое сопротивление (ρ), величина которого зависит от состава и количества жидкой фазы (вода с растворенными в ней минералами цементного клинкера) в единице объема. Изменение количества жидкой фазы в бетоне в связи с различным расходом цемента или воды на 1 м³ бетона вызывает соответственно изменение ρ , что обусловлено изменением концентрации электролитов в жидкой фазе. Так, с повышением влагосодержания от 135 до 225 л на 1 м³ бетона ρ снижается в 2,4... 2,6 раза.

Основной причиной нестабильности удельного электрического сопротивления бетонной смеси являются колебания в химическом и минералогическом составе цементов различных заводов. Диапазон колебаний удельного сопротивления бетонной смеси в цементах ряда заводов составляет 3...19 Ом·м, что обусловлено содержанием водорастворимых щелочей в их составе, величина которых в отечественных портландцементях 0,03... 1,1 %.

Шлакощелочные бетоны, в отличие от цементных, имеют пониженные удельные сопротивления в связи с повышенной концентрацией ионов в жидкой фазе. Их величина зависит от состава, содержания, плотности и количества раствора щелочного компонента, его температуры, а также от вида и расхода шлака и составляет 0,2...2,5 Ом·м.

На удельное сопротивление бетона большое влияние оказывает также степень его уплотнения. Так, изменение коэффициента уплотнения бетонной смеси на 1 % вызывает изменение ρ на 3 %.

Электроды, применяемые при электропрогреве бетона, подразделяются на:

- пластинчатые;
- полосовые (ленточные);
- стержневые;
- струнные.

Наиболее эффективны *пластинчатые электроды*, располагаемые на двух противоположных плоскостях конструкции и под-

ключаемые к разным фазам.

Полосовые электроды используются для периферийного прогрева, при котором они расположены на поверхности конструкции; электрический ток между соседними разноименными электродами проходит, главным образом, в периферийном слое бетона.

Удельная мощность, необходимая для прогрева бетона полосовыми электродами с односторонним прогревом, зависит от толщины изделия, расстояния между электродами (10...40 см), напряжения (50...127 В), среднего удельного сопротивления (2...16 Ом·м) и находится в пределах 0,9...25,0 кВт/м³ при напряжении 50 В и 2...50 кВт/м³ при напряжении 127 В.

При невозможности или нецелесообразности использования наружных пластинчатых или полосовых электродов из-за сложной конфигурации изделий, высокой степени армирования или большой их толщины (более 40 см) применяют *стержневые электроды* диаметром 6...10 мм.

Для обработки длинномерных изделий (свай, прогонов, балок) применяют одиночные или групповые *струнные электроды* диаметром 3...6 мм. Возможен прогрев с применением струн в качестве внутренних электродов, а бортов форм – в качестве наружных. Использование арматуры прогреваемых конструкций в качестве электродов нежелательно из-за возможного пересушивания приэлектродных слоев и уменьшения сцепления арматуры с бетоном.

Допускается использование не соединенных друг с другом плавающих арматурных сеток в качестве разноименных электродов. При изготовлении панелей наружных стен из легкого и ячеистых бетонов в качестве одного электрода используют поддон формы, а другого – арматурную сетку, ближайшую к свободной поверхности бетона. Сетка-электрод должна быть плавающей, изготовленной из стали диаметром не менее 5 мм с размерами ячеек не более 10 см.

Панели перегородок, плиты перекрытий и другие плоские изделия прогревают в кассетных установках, где в качестве электродов используют разделительные стенки и наружные щиты. Для производства подобных изделий эффективна кассетно-конвейерная технология с тепловыми отсеками, оснащенными полосовыми нагревателями, которые изготовлены из хромоникелевой ленты 3 X 20 мм длиной 90...100 м и расположены параллельно кассетным стенкам с шагом 250...300 мм на фарфоровых электроизоляторах типа 2830, образуя по всей площади отсе-

ка плоскую зигзагообразную спираль. При подводимом напряжении 380 В и расчетном поле 220 А установленная мощность составляет 60...80 кВт на отсек или 3 кВт на 1 м² греющей поверхности.

Сборные изделия небольших размеров с прямоугольными сечениями прогревают в групповых формах в положении «на ребро». Поперечные разделительные стенки и борта, параллельные плоскостями изделия, изготавливают из стали и используют как пластинчатые электроды.

Контактный электрообогрев

Контактный электрообогрев применяют для тепловой обработки бетона при возведении монолитных сооружений и изготовлении сборных железобетонных конструкций на заводах и полигонах.

При такой обработке осуществляется непосредственная теплопередача от греющих поверхностей к прогреваемому бетону. Распределение теплоты в бетоне конструкции происходит преимущественно путем теплопроводности. Конструкцию греющей опалубки (термоформы) выбирают таким образом, чтобы поверхность нагревательного элемента максимально перекрывала поверхность изделия. Неутепленная поверхность не должна превышать 5 %, а расстояние между нагревательными элементами как в пределах одного щита, так и в смежных – 15 см.

Электрообогрев изделий и конструкций может выполняться с помощью различных нагревателей: проволочных, греющих кабелей и проводов, стержневых, трубчато-стержневых и уголково-стержневых, трубчатых (ТЭНы), коаксиальных, индукционных, сетчатых, пластинчатых, пленочных.

Проволочные нагревательные элементы выполняются из проволоки с повышенным омическим сопротивлением (например, нихромовой). Проволока диаметром 0,8... 3 мм наматывается на каркас из изоляционного материала (лист асбошифера) и изолируется (например, тонколистовым асбестом); такие элементы размещают по стороне каркаса, примыкающей к опалубке.

В качестве *греющих кабелей* применяются электрические кабели типа КСОП или КВМС, состоящие из константановой жилы диаметром 0,7...0,8 мм, термостойкой изоляции и металлического защитного чулка. Кабель крепится непосредственно к металлическому щиту греющей опалубки или термоформы; сверху нагреватель покрывают асбестовым листом толщиной 0,5 мм и слоем минеральной ваты 40...50 мм.

Греющие провода со стальной, медной или алюминиевой жилой диаметром 1,0...2,5 мм крепят к каркасу или элементам опалубки. Провода должны находиться на равных расстояниях друг от друга в пределах 10... 30 см. Крепление проводов производится таким образом, чтобы они не смещались во время бетонирования.

Греющие провода укладывают в виде прямолинейных или спиральных нитей. Спиральную проволоку используют тогда, когда петли становятся настолько длинными, что применение прямолинейной проволоки затруднительно. При спиральной прокладке провода шнуры с равными промежутками наматываются вокруг армированного каркаса.

При толщине прогреваемых изделий до 20 см петли прокладывают в один слой, а свыше 20 см – в два слоя. Греющие провода не должны соприкасаться с опалубкой.

Стержневые нагреватели изготавливают из стержневой арматурной стали класса А1 марки Ст3 группы А диаметром не менее 8 мм. Нагревательные элементы имеют зигзагообразную форму и крепятся кронштейнами, изготовленными из диэлектрика, к опалубке; расстояние между нагревателем и опалубкой должно составлять 30...50 мм.

Трубчато-стержневой нагреватель представляет собой арматурный стержень диаметром не менее 8 мм, на который надета труба из ферромагнитного материала.

Разновидностью такого нагревателя является уголково-стержневой, представляющий собой арматурный стержень диаметром не менее 6 мм и установленный внутри стального уголка соосно с последним. Стержень изолируется от трубы (уголка) асбестовым шнуром, навитым на стержень участками в 20...30 мм с шагом 300... 350 мм. Воздушный зазор между стержнем и трубой (уголком) не должен превышать 1...1,5 мм. Отсутствие напряжения на трубе (или в уголке) позволяет крепить такие нагреватели непосредственно к опалубке с помощью сварки.

Коаксиальный нагреватель состоит из двух соосно расположенных стальных труб или наружной трубы и внутреннего стержня, сваренных у одного из торцов так, что ток в них идет в разных направлениях. Фиксирование внутренних проводников в расчетном положении осуществляется центрирующими шайбами из диэлектрика.

Крепление коаксиальных нагревателей к металлу опалубки осуществляется с помощью изолированных кронштейнов на расстоянии 20...30 мм от обогреваемой поверхности.

Сетчатый нагреватель представляет собой полосы тканых сеток определенной ширины (10, 15, 20 см), последовательно соединенных медными шинами. Материалом для изготовления нагревателей могут служить сетки из латуни, низкоуглеродистой стали и другие. Расстояние между полосами (в свету) определяют расчетом (обычно оно не превышает 5...15 см). Полосы сеток изолируют от щитов опалубки (термоформы) с помощью термостойких электроизоляционных материалов, например, из листового асбеста.

Пластинчатый нагреватель состоит из двух пластин электроизоляционного материала с зигзагообразно уложенной между ними металлической лентой. Ленты укладывают на расстоянии 5...10 мм одна от другой. Ширина ленты нагревателя зависит от токовой нагрузки, применяемого напряжения и конструктивных особенностей прогреваемого изделия и составляет 10...30 мм.

Для изготовления нагревательного элемента используют различные рулонные или листовые материалы толщиной 0,1...0,5 мм (медь, латунь, кровельное железо, сталь).

Возможен также прогрев путем *кондуктивной теплопередачи от нагретой поверхности термоактивной опалубки*. По сравнению с электродным прогревом этот метод характеризуется меньшими трудоемкостью и металлоемкостью, затратами энергии и материалов, возможностью активного регулирования теплового режима твердения конструкции на всех стадиях.

В термоактивную можно переоборудовать любую опалубку каркасной конструкции с палубами из различных материалов. Источником теплоэнергии служит поверхность щита, которая включается в электрическую сеть через понижающий трансформатор. Сила тока в стальном листе достигает 5000...10 000 А, напряжение 0,7...3,0 В.

Прилегающие к опалубке слои бетона нагреваются со скоростью 15...25 °С в час, в период изотермического выдерживания температуру поддерживают периодическим включением электрической цепи.

Применение в качестве греющего элемента термоактивной опалубки металлических щитов палубы позволяет существенно упростить конструкцию опалубки, а также сократить расходы электроэнергии.

Инфракрасный прогрев

Для обработки изделий в воздушной среде с температурой 100...150°С и низкой относительной влажностью (керамзи-

тобетон, перлитобетонные изделия) применяют инфракрасный прогрев. При этом используют различные излучатели: трубчатые (ТЭНы), стержневые карборундовые, керамические электрические лампы инфракрасного излучения типа ЗС-3.

При производстве сборного железобетона применяют ТЭН типа НВСЖ (нагреватель воздушный сушильный жаростойкий) или НВС (нагреватель воздушный сушильный) мощностью на 1 м длины от 0,6 до 1,2 кВт и температурой излучающей поверхности 300...600 °С.

Карборундовые излучатели представляют собой стержень из карбида кремния диаметром 6...50 мм и длиной 0,3...1,0 м; рабочая температура 1300...1500 °С.

Инфракрасная установка состоит из инфракрасных излучателей в комплекте с отражателями и поддерживающих устройств. Конструктивно установки представляют собой сферические или трапецеидальные отражатели, во внутренней плоскости которых размещены излучатели с поддерживающими устройствами. Сферические отражатели применяют для передачи энергии излучением на расстояние до 3м, а трапецеидальные – до 1 м.

В зависимости от конструктивных особенностей термообрабатываемых элементов существует ряд модификаций установок: *«короб»* (термообработка плит перекрытий и покрытий, дорожных плит, отогрева замороженного бетона и грунта); *двухстенчатая плоская опалубка*, (при термообработке линейных элементов); *камера щелевого типа с генераторами инфракрасных лучей* (для изделий, изготавливаемых по конвейерной технологии); *камера с излучающими поверхностями: «колпак»* (термообработка объемных элементов); *стержни, вводимые в каналы элементов* (при обработке многопустотных плит); *установки столбчатого типа* (термообработка трубчатых элементов).

При тепловой обработке инфракрасными лучами прочность бетона во многом зависит от условий облучения (режима прогрева, расположения излучателей), а интенсивность теплового потока на поверхности материала – от расстояния до источника излучения (в обратной пропорции).

При инфракрасном прогреве можно совмещать тепловлажностную обработку и подсушку изделий, что эффективно используется при изготовлении конструктивно-теплоизоляционных материалов в щелевых камерах.

Щелевая камера представляет собой тоннель длиной 90 м и высотой в свету 1 м с зазором 50... 100 мм между верхом изделия и потолком камеры. На полу камеры, между рельсами, располо-

жены трубчатые электронагреватели (ТЭНы) общей мощностью 1200 кВт, присоединенные к электросети напряжением 380 В. Для регулирования температуры все ТЭНы камеры разделены на 12 блоков, управление которыми осуществляется на общем щите с приборами, регистрирующими температуру в шести точках по длине камеры. Камера оборудована рециркуляционной и вентиляционной системами, предназначенными для выравнивания температур и отсоса воздуха из камеры. Конечная влажность изделий после тепловой обработки в камерах с ТЭНами снижается до 11...12 %, что соответствует существующим нормам.

Удельный расход электроэнергии на тепловую обработку керамзитобетонных изделий 80...100 кВт·ч/м³, при этом расход теплоты на нагрев бетона составляет всего 21%, а значительная часть теплоты расходуется на испарение влаги (32 %).

Индукционный прогрев

Индукционный метод термообработки бетона основан на использовании магнитной составляющей переменного электромагнитного поля для нагрева стали вследствие теплового действия электрического тока, наводимого электромагнитной индукцией.

Сущность метода заключается в следующем. Бетонные конструкции (армированные или неармированные), находящиеся в ферромагнитных формах, помещаются в переменное электромагнитное поле индуктора. На поверхности опалубки укладывают витками изолированный провод и пропускают по нему переменный ток, тогда в арматуре и в опалубке (если она стальная) начинают циркулировать вихревые токи, выделяемая в результате этого арматурой и стальной опалубкой теплота расходуется на прогрев бетона конструкции.

Вихревые токи, возникающие в загрузке (т. е. в арматуре или опалубке), циркулируют не по всей ее толщине. При попадании электромагнитной волны на поверхность металла амплитуда плотности вихревых токов по сечению загрузки убывает от поверхности вглубь, причем около 90 % всей теплоты выделяется с поверхностного слоя.

В зависимости от характера армирования применяют различные схемы загрузок: прутковая арматура конструкции; жесткий каркас и прутковая арматура в неметаллической опалубке; то же, в металлической опалубке. В применяемой составной металлической опалубке имеются щели, направление которых совпадает с направлением магнитного потока, в результате чего экра-

нирующая способность опалубки исчезает. Так как электрическое сопротивление в стыке значительно выше сопротивления при движении тока по стенкам опалубки, то ток возвращается по внутренней ее поверхности, которая и выделяет теплоту.

Для устранения перепадов температуры, обусловленных неравномерным распределением напряженности поля, витки индуктора на различных участках длины конструкции укладывают с различным шагом.

Образование структуры цементного камня и бетона происходит в исключительно благоприятных условиях, вследствие чего прочность такого бетона в 28-суточном возрасте на 15...25 % выше, чем бетона нормально-влажного (стандартного) твердения и на 25...35 % пропаренного бетона. При этой обработке в бетоне уменьшается объем микрокапиллярной пористости и количество сообщающихся пор, возрастает его непроницаемость, стойкость к воздействию агрессивных сред и долговечность.

В Институте тепло- и массообмена АН БССР разработаны проекты электромагнитных установок для термообработки железобетонных конструкций различных типов: тоннельные камеры (стационарные и передвижные) для плитных и длинноразмерных изделий; камеры-колпаки для труб большого диаметра, плоскостные элементы для монолитного железобетона и конструкций, изготавливаемых в скользящей опалубке.

Для обработки монолитных конструкций и прогрева стыков применяются *инвентарные мягкие разъемные индукторы*, позволяющие значительно снизить трудозатраты. Сечение проводов индуктора определяют по расчету, прогрев ведут при напряжении 50...120 В с использованием сварочных и масляных понижающих трансформаторов.

Возможно применение индукционного прогрева при изготовлении изделий *по кассетной или пакетной технологии* с установкой индукционных нагревателей между изделиями. Такой нагреватель состоит из обмотки, выполненной из неизолированного или изолированного провода и образующей замкнутый магнитопровод с металлом стальной опалубки или с арматурой, если опалубка выполнена из дерева. Так, в типовой кассете конструкции Гипростроммаша нагреватель расположена между двумя стальными стенками, связанными между собой равнобокими уголками. В пространстве между соседними формами установлены индуктирующие токопроводы и изоляционные диафрагмы. Ребра жесткости устанавливаются горизонтально с расчетным шагом и со сдвижкой в шахматном порядке с тем, чтобы в образовавшейся

непрерывной полости можно было разместить плоский трехзачодный зигзагообразный токопровод из стержневой арматурной стали класса А1 0 14... 18 мм.

Образованная таким образом полость замкнута ферромагнитным материалом, а наличие одного направления во всех трех стержнях токопровода и минимального зазора между ними и формирующими листами позволяет замкнуть в магнитонроводе часть магнитного потока индуктора. Листы опалубки соединены между швами по периметру электросварными заклепками.

Токопровод изолируют от окружающего металла воздушным зазором, равным 15 мм, и фиксируемыми диафрагмами из асбестоцементных электроизоляционных досок, установленными через 1 м (ГОСТ 4248–78).

Индукционный нагреватель реализует комбинированный способ преобразования электрической энергии в тепловую за счет активного сопротивления стального токопровода, активного сопротивления «загрузки» вихревым токами гистерезиса строительной стали. Групповое соединение нагревателей одной каскадной установки позволяет использовать для прогрева токи промышленной частоты и сетевого напряжения.

Безопасность эксплуатации каскад обеспечивается электроизоляцией токопровода заземлением каждого нагревателя гибким проводом и системой защиты электроустановок. При применении обмотки из изолированного провода используют провода марки РКГМ с рабочей температурой до 180 °С, изоляцию «голого» провода от замыкания на металлическую опалубку осуществляют асбестовым шнуром. Расход электроэнергии составляет 70 кВт·ч/м³ бетона.

В *конвейерной технологии* применяют термообработку бетона в электроиндукционных камерах со стальными стенами, которые нагреваются до 200...300 °С и передают теплоту обрабатываемым изделиям за счет излучения и конвекции, при этом температура среды в камере достигает 120... 150 °С. КПД камер с «греющими стенами» низок, так как на различных участках наблюдаются потери: в ограждениях, при передаче от стен к среде в камере, от среды к форме, от металла форм к поверхности изделия.

Более эффективны камеры с «греющими формами». В этих камерах, щелевых или тоннельных, индукционная обмотка расположена не снаружи, а внутри камеры, на изоляторах. Токи индуцируются в металле форм или арматуре, при этом значительно сокращаются потери теплоты.

Необходимая активная мощность на термообработку 1 м³ бетона в зависимости от режима прогрева составляет 2...10 кВт. Полная же мощность зависит от коэффициента мощности цепи (а с увеличением насыщенности сечения конструкции металлом (р растет, а с увеличением периметра индуктора и электросопротивления поверхности арматуры – падает, изменяясь при этом в пределах 0,3...0,7, но не превышая 0,707. Поэтому при индукционном прогреве полная мощность при равных прочих условиях будет выше, чем при электропрогреве и составит 5...20 кВт на 1 м³ бетона.

ТОПЛИВО И ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ

Классификация топлива

Топливом называют горючие вещества, которые сжигают с целью использования выделяющейся при этом тепловой и лучистой энергии. Основные условия применения топлива в промышленности:

- оно должно быть экономически выгодным, т. е. дешевым;
- скорость его сгорания должна обеспечивать максимальный тепловой эффект.

Топливо различают

1). по происхождению:

- естественное;
- искусственное.

2). по агрегатному состоянию:

- твердое;
- жидкое;
- газообразное.

К **твердому топливу** естественного происхождения относят антрацит, каменный и бурый угли, сланцы, торф, дрова, а искусственного – кокс, торфяные и буроугольные брикеты. Основным видом топлива являются ископаемые угли, применяемые в виде зерен (кусков) или пыли (после помола). К местным видам топлива относят сланцы, торф и дрова.

Антрациты имеют блестящую темно-серую или черную поверхность. По сравнению с другими видами топлива характеризуются большими плотностью и содержанием углерода. Горят коротким пламенем, не коксуются и выделяют мало летучих веществ. Их удельная теплота сгорания составляет около 29 300 кДж/кг.

Каменные угли по составу и свойствам колеблются в широком диапазоне и потому общей классификации не имеют.

Бурые угли характеризуются высоким содержанием балласта (влаги, золы, иногда серы), большим количеством (свыше 40 %) летучих веществ и способностью к самовозгоранию при продолжительном хранении на складе. Ввиду высокого содержания балласта отличительной особенностью их является разница между удельной теплотой сгорания горючей массы и теплотой рабочего топлива. По содержанию углерода бурые угли уступают каменным углям, но превосходят торф.

Сланцы – многозольное топливо с содержанием золы

40...60 % Содержание летучих веществ составляет 70 % и выше. Удельная теплота сгорания горючей массы 27 200...33 500 кДж/кг, но удельная теплота сгорания рабочего топлива в 2...3 раза ниже из-за высокого содержания золы.

Торф – продукт разложения различных растительных остатков во влажных условиях без доступа воздуха. Зольность топлива составляет 5...10 %. Балласт торфа имеет влажность 25...35 %. Удельная тепло га сгорания в рабочем состоянии 10 500...14 600 кДж/кг.

Кокс – продукт сухой перегонки различных топлив (например, каменноугольный кокс, древесный торфяной полукокс).

Пылевидное топливо получают путем дробления, сушки и помола твердого топлива. Основные преимущества пылевидного топлива:

- быстрое и полное сгорание из-за высокой удельной поверхности, соприкасающейся с воздухом;
- высокая температура горения благодаря малому избытку воздуха, обеспечивающему полноту сгорания;
- удобство обслуживания топок и печей вследствие легкости регулирования процесса горения;
- возможность эффективного использования низкосортных видов топлива.

Тонкость помола зависит от содержания горючих летучих веществ и золы в топливе: чем меньше летучих веществ, тем более тонким должен быть помол. Пылевидное топливо является основным в цементной промышленности.

Жидкое топливо — это в основном продукты переработки нефти.

Мазут представляет собой черно-бурую жидкость с зеленоватым оттенком; зольность, влажность и содержание сернистых примесей очень малы. Удельная теплота сгорания около 40 000 кДж/кг. Характеризуется вязкостью, температурами вспышки паров и застывания. Эти свойства важны при транспортировании его по трубопроводам, так как застывший мазут нельзя транспортировать. Чем больше в нем парафиновых углеводородов, тем выше температура застывания

Газообразное топливо по происхождению делится на *естественное* (природный газ) и *искусственное* (генераторный, доменный, коксовый и другие газы). Оно легко сжигается, транспортируется, хорошо смешивается с воздухом и не содержит золы.

Природный газ – это вы- сококалорийное топливо, на 90

% состоящее из метана (CH_4) Удельная теплота сгорания 31 400...37 700 кДж/м³.

Из искусственных видов газообразного топлива наиболее применим *генераторный газ*, получаемый из твердого топлива путем газификации, сущность которой состоит в полном сгорании кускового топлива при недостатке воздуха. Также в горючий газ превращают залегающий в пластах уголь, удельная теплота сгорания которого 5 860 кДж/м³. Доменный, коксовый и другие искусственные горючие газы применяют значительно реже Удельная теплота сгорания доменного газа 3 300... 4 200 кДж/м³, а коксового – около 18 000 кДж/м³.

Процесс горения топлива и принципы его сжигания

Сжигание топлива включает три стадии: *зажигание*, *горение* и *дожигание*. Во времени они протекают последовательно, но в ряде случаев одна стадия накладывается на другую.

Стадия зажигания характеризуется тепловой подготовкой топлива – подогревом, подсушкой, выделением летучих веществ – и собственно зажиганием. Твердое топливо при подогреве вначале теряет влагу, затем разлагается на летучие вещества и твердый остаток – кокс. Дальнейшее повышение температуры приводит к воспламенению сначала летучих веществ, затем кокса. Жидкое топливо, закипая, переходит в парообразное состояние. Температура кипения его ниже температуры воспламенения, поэтому возгорается сначала парообразное топливо. В стадии зажигания любое топливо требует подвода теплоты.

В стадии горения воспламеняются вначале летучие горючие вещества, затем кокс. При этом выделяется большое количество теплоты и развивается высокая температура. Одновременно в топке происходит процесс золо- и шлакообразования.

Основные реакции горения твердого топлива, нуждающегося в значительном количестве кислорода, происходят на поверхности. Характер горения определяется подводом (диффузией) окислителя к поверхности и степенью ее развития. Увеличение скорости прохождения окислителя у поверхности кусков топлива приводит к уменьшению толщины инертной пленки газов, ускорению реакций на поверхности горящего топлива и к интенсификации процесса в целом.

При горении жидкого топлива сначала испаряются и воспламеняются легкие фракции, затем тяжелые. При повышении температуры из капель жидкости выделяются легкие и тяжелые углеводороды. Тяжелые разлагаются на промежуточные со-

единения, которые и воспламеняются. Поэтому для интенсификации процессов горения жидкое топливо предварительно распыляют.

Теоретическое количество воздуха для полного сгорания твердого и жидкого топлива по объему, м³/кг,

$$V_0 = 0,0889(C^p + 0,375S_{0+k}^p) + 0,265H^p - 0,0333O^p$$

по массе, кг/кг,

$$L_0 = 1,293V_0$$

где C^p, S^p, H^p, O^p рабочие массы топлива, кг; числовые коэффициенты перед C^p, S^p, H^p, O^p – количество кислорода для сгорания 1 кг этих элементов, м³/кг; 1,293 – плотность воздуха при нормальных условиях, кг/м³.

Полный объем продуктов сгорания топлива (газов), кг/м³, при α > 1

$$V_r = 0,01855C^p + 0,007S^p + 0,112H^p + 0,0124(W^p + 100\omega_n) + 0,0016d_v\alpha V_0 + 0,79\alpha V_0 + 0,008N^p + 0,21(\alpha - 1)V_0$$

где W^p – содержание влаги в топливе, %; ω_n – массовое количество пара, вводимое для распыления жидкого топлива, кг/кг; d_v – влагосодержание воздуха, г/кг; α – коэффициент избытка воздуха (при сжигании твердого кускового топлива α = 1,3...2; твердого пылевидного – 1,2...1,25; жидкого – 1,15...1,25; газообразного – 1,05... 1,2).

Теоретическое количество воздуха для полного сгорания газообразного топлива, м³/м³,

$$V_0 = 0,0476[0,5H_2 + 0,5CO + 3,5C_2H_6 + (m + 0,25n)C_mH_n + 1,5H_2S - O_2]$$

Действительное количество воздуха для полного сгорания топлива, м³/кг или м³/м³,

$$V_d = \alpha V_0$$

Виды теплоносителей

В качестве теплоносителей для тепловых установок в производстве строительных материалов и изделий применяют подогретый воздух, дымовые газы, горячую воду, пар, высококипящие органические и масляные жидкости, электроэнергию.

Подогретый воздух применяют для сушки и полимеризации материалов, в воздушных завесах, а также как окислитель для более полного сгорания топлива. Нагревают его в паровых воздухоподогревателях до 150 °С, огневых – до 500 °С и электрических – до 200 °С. Используют также воздух, нагретый в обжиговых пе-

чах за счет рекуперации и регенерации теплоты в зонах охлаждения.

Подогретым воздухом сушат керамические изделия, к которым предъявляются повышенные требования в отношении чистоты поверхности (например, фасадные изделия, сырец, подлежащий глазурированию).

Дымовые газы получают при сжигании любых видов топлива и разбавлении продуктов горения наружным воздухом до необходимой температуры. Их влагосодержание зависит от влажности получаемых продуктов горения и кратности разбавления газов наружным воздухом. Чистые дымовые газы получают при сжигании газообразного и жидкого топлива, а при сжигании каменного угля они засорены уносом (золы и сажой) и газообразными компонентами недожога (CO и H_2).

Отходящие газы обжиговых печей, используемые для сушки материалов, имеют температуру 80... 100 °С, иногда до 130 °С, и влагосодержание 20 ..70 г/кг сухих газов. Печные газы более загрязнены золой, чем топочные. При сушке в сушильных барабанах сыпучих и кусковых материалов применяют смесь топочных газов с воздухом температурой 600. .800 °С.

Для тепловой обработки бетонных и железобетонных изделий можно применять дымовые газы от сжигания любого вида топлива, однако на практике используются только природный газ.

Водяной пар делится на насыщенный и перегретый.

Насыщенный пар может быть сухим и влажным: сухой не содержит жидкости, влажный представляет собой смесь пара с мельчайшими капельками жидкости, равномерно распределенными по его массе и находящимися во взвешенном состоянии. Объем и температура сухого насыщенного пара являются функциями давления.

Перегретый пар – это пар, температура которого выше температуры насыщенного пара того же давления. От насыщенного он отличается тем, что не имеет определенной зависимости между температурой и давлением:

при данном давлении перегретый пар в зависимости от количества сообщенной ему теплоты может иметь различную температуру. Разность температур перегретого и насыщенного пара того же давления называется *степенью перегрева*.

Основным достоинством водяного пара является выделение большого количества теплоты при конденсации и высокий коэффициент теплоотдачи, а недостатком – повышение давления и зависимости от температуры насыщения. Так, температура насы-

ценного пара 200 °С может быть получена только при давлении 1,6 МПа, а 300 °С – уже при 10 МПа, для чего используют сосуды (автоклавы) сложной конфигурации, большой толщины, л следовательно, и повышенной металлоемкости.

Для тепловой обработки железобетона применяют влажный или сухой насыщенный пар, который легко конденсируется на поверхности изделий, интенсивно нагревая их и создавая в тепловых установках паровоздушную среду с влажностью 100 %. В этих условиях влага из бетона практически не испаряется. Перегретый пар конденсируется гораздо труднее и только после того, как потеряет теплоту перегрева, т. е. когда его температура понизится до температуры сухого насыщенного пара.

Горячая вода применяется в ваннах или бассейнах при обработке железобетона, древесины и других материалов. Подогревают воду в специальных водогрейных котлах или теплообменных аппаратах до 180 °С и более. К тепловым установкам ее подают при температуре 100 °С насосами, а при более высоких температурах – под давлением.

Высокикипящие теплоносители – это органические и масляные вещества. Из органических веществ в качестве теплоносителей используют дифенил ($C_{12}H_{10}$) с температурой кипения 255 °С, дифениловый эфир ($C_6H_5O_2$) – 259 °С и их смеси; применение кремнийорганических соединений типа тетракрезилокси-лана позволяет достигать температур 440 °С. Применение минеральных масел в жидкой (разе с температурой кипения 200...220 °С позволяет снизить давление в обогреваемых установках до атмосферную, а использование их в паровой фазе – до 0,5...0,6 МПа. Однако для их применения необходимы дополнительные установки для нагрева (котельные установки или термостаты).

При тепловой обработке строительных материалов используется электроэнергия – как источник для электропрогрева, электрообогрева, электромагнитного и других видов нагрева.

Электропрогрев предусматривает включение нагреваемого тела (бетона) в электрическую цепь как сопротивления. Внутри изделия электрическая энергия преобразуется в тепловую. Для тепловой обработки бетона используют энергию переменного тока промышленной частоты. Постоянный ток не применяют, так как он вызывает электролиз воды. Осуществляется электропрогрев *внутренними электродами*, заложенными внутрь изделия (стержневыми и струнными), или *наружными*, расположенными на поверхности (пластинчатыми, по Лосевыми и сплошными).

Электрообогрев выполняют внешними источниками тепло-

ты, передаваемой через промежуточную среду, которой может быть воздух, жидкость или твердое тело. Теплота передается инфракрасными лучами, излучаемыми нагретой поверхностью твердого тела. В качестве источников инфракрасного излучения используют электрические лампы и газовые излучатели (металлические и керамические).

Получение теплоносителей

Теплоносители получают при сжигании топлива в топочных устройствах.

Топки – это устройства для сжигания твердого кускового топлива. В их комплект входят топочная камера, колосниковая решетка, золоборник, надколосниковое пространство и гарнитура (дверцы, гляделки)

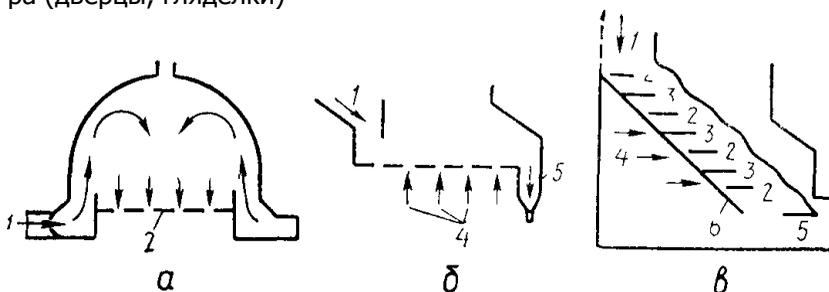


Рис. 7.1. Схемы топок для сжигания топлива:

а – простая; б – с шурующей планкой; в – с наклонно-переталкивающими колосниками; 1 – загрузка топлива; 2 – колосниковая решетка; 3 – подвижные колосники; 4 – подача воздуха; 5 – зольник; 6 – привод подвижных колосников.

Топки бывают простые и полугазовые. В простой топке с неподвижной решеткой (рис. 7.1, а) загружают и шуруют топливо вручную, сжигая в них древесину, торф и все угли, кроме тощих и спекающихся.

Более распространены полумеханические и механические топки. Полумеханическая топка с шурующей планкой (рис. 7.1, б) имеет колосниковую решетку из плит с отверстиями диаметром 6 мм для подачи воздуха, на которую укладывают шлаковую подушку и слой топлива. По решетке шурующая планка автоматически совершает возвратно-поступательные движения: несколько коротких – для подачи и продвижения топлива, и одно, во всю длину колосников, – для шуровки и сбрасывания шлака в бункер. Процесс загрузки и шуровки топлива осуществляют и на колосни-

ковых решетках с наклонно-переталкивающими колосниками (рис. 7.1, б).

В высокопроизводительных тепловых установках и промышленных котельных применяют *топки с пневмомеханическими забрасывателями угля*. Уголь подают в приемный бункер, затем ковшевым элеватором – в расходный бункер, под которым смонтирован пневмомеханический забрасыватель, непрерывно подающий уголь в топку через отверстие в стене. В топке размещена колосниковая решетка с опрокидными колосниками

В полугазовых топках топочные газы горят в рабочем пространстве печи. Для таких топок используют топливо с большим количеством летучих веществ (торф и длиннопламенные угли). Воздух для процесса горения подают в два приема: вначале – под колосниковую решетку для получения полугаза, а затем – в верхнюю часть топочного устройства или рабочее пространство печи. Чем толще слой топлива на колосниковой решетке (0,4...0,8 м), тем больше образуется продуктов неполного сгорания. Удельная теплота сгорания полугаза 2500...4000 кДж/м³.

Форсунки низкого и высокого давления предназначены для подачи в топку мазута, его распыления и смешивания с воздухом. Различают мазутные форсунки трех типов: механические, воздушные и паровые. Распыляется топливо за счет энергии распыляющей среды и сжатия мазута.

В *механических форсунках* (рис. 7.2) распыление основано на принципе пропуска струи жидкости под большим давлением через небольшое отверстие со скоростью истечения струи 45...50 м/с. Они бесшумны в работе и обеспечивают большой пирометрический эффект. Однако они громоздки, легко засоряются, производительность их трудно регулируема.

Паровые форсунки служат для распыления струи мазута перегретым паром под давлением 0,15...0,4 МПа. Их применяют в топках котельных установок и печах, требующих длинного факела (например, в цементных вращающихся печах); они просты в обслуживании, регулируются по производительности, но при работе создают большой шум, понижают температуру горения и малоэкономичны.

В *воздушных форсунках* (компрессорных и вентиляторных) мазутная струя распыляется воздухом. В компрессорных форсунках давление воздуха составляет 0,3...0,7 МПа, поэтому их относят к группе форсунок высокого давления. Вентиляторные форсунки среднего (до 0,3 МПа) и низкого (до 0,01 МПа) давления высокоэкономичны, могут работать с малым избытком воздуха,

обеспечивают полноту сгорания топлива и высокий пирометрический эффект. Они бывают прямоструйные и турбулентные: первые дают длинный факел (до 3 м) с углом раскрытия 20...30°, а вторые – короткий закрученный (0,3 0,7 м) с углом раскрытия 60...90°.

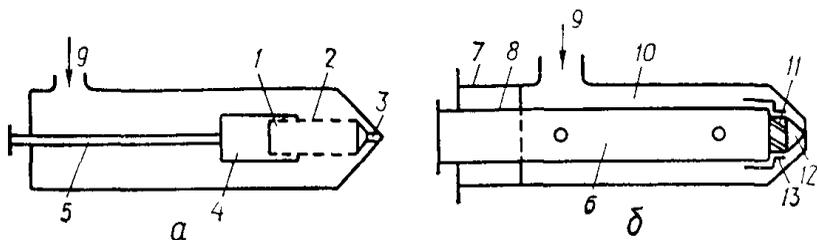


Рис. 7.2. Механические форсунки:

а – с тангенциальными распылителями; б – с винтовыми распылителями; 1 – выходной насадок; 2 – прорези для ввода мазута, 3 – выходное сопло; 4 – поршень; 5 – шток поршня; 6, 10 – каналы для ввода мазута; 7 и 8 – штоки распылителей, 9 – патрубок для ввода мазута; 11, 13 – распылители; 12 – насадок сопла

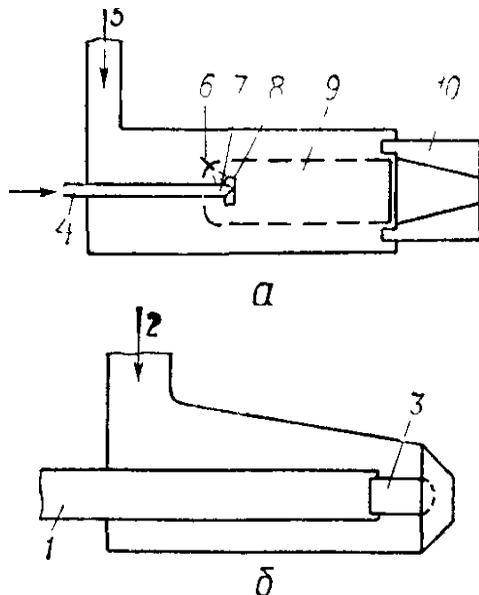


Рис. 7.3. Газовые горелки: а – типа ГНП; б – скоростная; 1, 4 – газопроводы; 2, 5 – воздухопроводы; 3, 7 – газовые сопла; 6 – свеча зажигания; 8 – стабилизатор горения; 9 – камера сгорания; 10 – огнеупорное сопло.

Горелки – это устройства для образования газозвушной смеси, ввода ее в топку и сжигания (рис. 7.3). Они могут быть неполного и полного смешивания газа и воздуха: в первых газ и воздух смешиваются на выходе из горелки, во-вторых – в самой горелке. Выходящая из горелок газозвушная смесь воспламеняется и полностью сгорает.

Горелки для пылевидного топлива представляют собой трубу диаметром 100... 150 мм, внутри которой со скоростью 50...70 м/с движется пылевоздушная смесь. Для изменения положения факела их делают поворотными или выдвжными. Теплоизлучение от сжигания пылевидного топлива выше, чем от газообразного из-за находящихся в нем раскаленных частиц твердого углерода.

Теплогенераторы – это установки для подогрева воздуха, являющегося теплоносителем в сушилках. В качестве теплоносителя в камерных, тоннельных и конвейерных сушилках используют дымовые газы от сжигания природного газа, т.е. дымовые газы без примесей сернистых соединений, золы, сажи и токсичного СО. Другие виды топлива (твердое и мазут) не применяют. Поэтому в качестве греющей среды используют атмосферный воздух, который нагревают в паровых калориферах или огневых теплообменниках. Простейшими из них являются трубчатые теплогенераторы (рис. 4). По трубам пропускают горячие дымовые газы от сжигания топлива в топке (греющая среда) Наружную поверхность труб обдувают атмосферным воздухом (нагреваемая среда);

КПД огневых теплогенераторов составляет 65...70 %.

Рекуператоры – устройства, в которых воздух подогревается теплотой отходящих продуктов горения (рис. 7.5). Теплота горячих дымовых газов передается нагреваемому воздуху через стенку (металлическую или керамическую). Рекуператоры из обычного металла служат для подогрева воздуха до 350 °С, из жаропрочных сплавов – до 700 °С. Керамические (шамотные или карборундовые) рекуператоры служат для подогрева воздуха до 1000 °С, применяют их в стекловаренных и камерных обжиговых печах.

Регенераторы – это теплообменные устройства периодического действия: сначала через генератор проходят дымовые газы и нагревают массивную насадку, аккумулирующую теплоту, затем изменяется направление движения газов и через нагретую насадку проходит воздух. Регенеративная насадка поочередно нагревается и охлаждается. Время одного цикла составляет 0,25...0,5 ч.

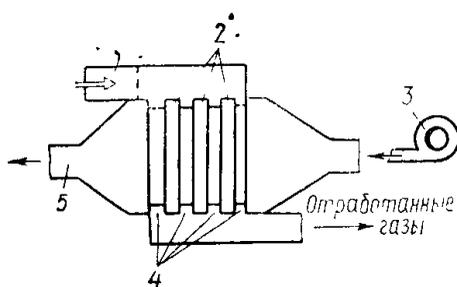


Рис. 7.4. трубчатый теплогенератор:
1 – топка, 2 – межтрубное пространство;
3 – вентилятор нагнетания холодного воздуха;
4 – трубы; 5 – трубопровод нагретого воздуха.

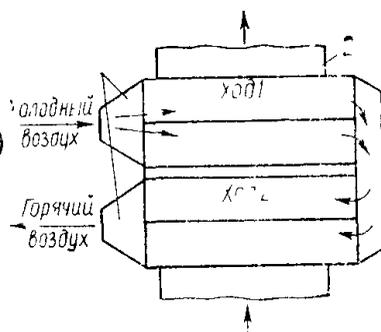


Рис. 7.5. двухходовой игольчатый рекуператор:
1 – чугунные трубы; 2 – упорная кладка.

Калориферы–установки для нагрева воздуха, в которых в качестве греющей среды используют горячую воду, насыщенный или перегретый водяной пар. Они бывают пластинчатыми (П) и спирально навивными (Ф). По виду теплоносителя различают калориферы с греющим теплоносителем водой (КВ) и паром (КП), а по направлению движения теплоносителя – одно-и многоходовые.

Пластинчатые одноходовые калориферы (рис. 7.6) представляют собой две стальные коробки, называемые коллекторами, в которые ввальцованы ряды труб. По трубам, оребренным пластинками или спиралью, проходит пар с избыточным давлением 0,1...0,5 МПа. Нагретые трубы омывает воздух. Нижний коллектор подключается к конденсатопроводу и служит для сбора конденсата.

Спирально-навивные калориферы отличаются тем, что поверхность нагрева создается навивкой стальной ленты (шириной 10 мм и толщиной 0,5 мм) на трубки, расположенные в шахматном порядке. Наружная оребренная поверхность калорифера имеет противокоррозионное оцинкованное покрытие, которое также улучшает теплопередачу в местах контакта пластин или спирального оребрения с трубками. Пластины изготавливают с диагональными гофрами, увеличивающими теплопередачу. В одноходовых калориферах теплоноситель движется по трубкам в одном направлении, а во многоходовых – направление движения теплоносителя многократно меняется.

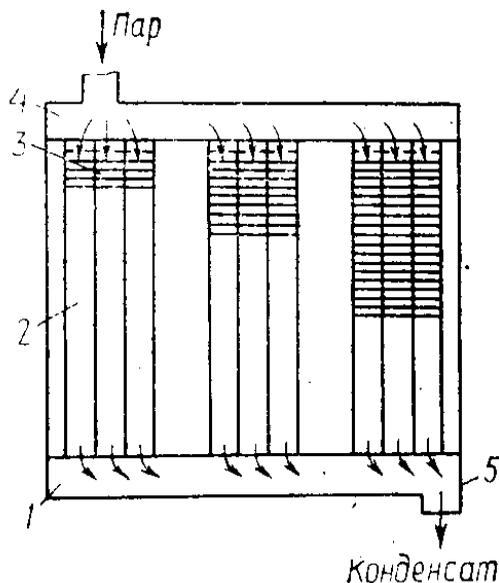


Рис. 7.6. Калорифер стальной пластинчатый: 1 – нижний коллектор; 2 – трубы; 3 – пластинки; 4 – верхний коллектор; 5 – штуцер

Калориферы устанавливают параллельно или последовательно. При последовательной установке общее сопротивление прохождению воздуха больше, чем при параллельной, но выше температуры прогрева.

Источники инфракрасного излучения. Электрическая лампа инфракрасного излучения типа Зс-3 представляет собой стеклянную колбу диаметром 175 мм и высотой 180 мм, на внутреннюю поверхность которой нанесен слой серебра, служащий рефлектором. Колба заполнена смесью азота и аргона. Рабочая температура спирали из вольфрама около 2200 °С. Мощность лампы 500 Вт при напряжении 220 В. Наличие рефлектора приводит к быстрому падению интенсивности теплового потока за его пределами. Однако лампы практически не обладают тепловой инерцией, поэтому изменение напряжения в сети существенно влияет на интенсивность излучения. Так, снижение напряжения в сети на 10 % уменьшает интенсивность теплового потока на 15...20 %.

Металлические электрические излучатели – это, как правило, *трубчатые электрические нагреватели* (ТЭНы) – тонкостенные трубки диаметром 6...18 мм и длиной 200...3000 мм, в центре ко-

торых помещена нихромовая или фехралевая спираль сопротивления. Трубки выполняют из нержавеющей стали или латуни. Изоляторами, заполняющими трубку, служат песок, оксид магния или аммония. Мощность ТЭНов 100...4000 Вт при напряжении 220В. В зависимости от мощности температура на поверхности ТЭНов изменяется от 400 до 800 °С. Они просты в эксплуатации, стойки против механических и термических воздействий, имеют различную форму и служат 5000...10 000 ч.

Металлические стержневые излучатели представляют собой трубку диаметром 12...25 мм, покрытую слоем асбеста. На ней намотана спираль из нихромовой проволоки, концы которой подключены к контактным болтам, расположенным на концах излучателя. Длина излучателя назначается в зависимости от длины изделия. Нихромовая спираль нагревается до 750...800 °С. Недостатком металлических стержневых излучателей является их сравнительно небольшая тепловая инерция, вследствие чего даже кратковременные колебания напряжения в сети вызывают заметные изменения теплового потока и температуры.

Керамические газовые излучатели состоят из излучающей панели и всасывающей камеры с соплом. Газ из сети поступает через сопло горелки во всасывающую камеру, эжектируя воздух, необходимый для горения. Затем из всасывающей камеры газ и воздух поступают в смесительную камеру, где происходит их окончательное перемешивание и выравнивание скоростного потока. Газовоздушная смесь выходит через излучающую панель, представляющую собой объемную керамическую сетку, состоящую из отдельных плиток с каналами диаметром 1...2 мм. Выходя через них, газ сгорает без видимого пламени. Керамическая сетка нагревается до температуры 850...950°С и становится источником инфракрасных лучей. Перед керамической сеткой иногда устанавливают нихромовую, которая, накаляясь от поверхности керамики, увеличивает радиационную составляющую теплового потока излучателя.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СУШКИ

Влагосодержание материала

По классификации П. А. Ребиндера формы связи влаги с материалом делятся на три группы.

Химическая связь влаги с материалом является или результатом образования кристаллогидратов (влага входит в состав кристаллических решеток материалов) или химической реакции гидратации. Химически связанная влага при сушке не удаляется, для ее удаления необходимы более высокая температура и большое количество энергии, она может быть удалена при обжиге.

Физико-химическая связь может быть адсорбционной, осмотической и структурной.

При *адсорбционной* связи вода может входить в образованные при растворении сольватные оболочки или как пластификатор в межмицелярное пространство гидрофильных тел, способствуя их набуханию и образуя коллоидный раствор, а также удерживаться только молекулами внешних поверхностей гидрофобных тел. *Осмотическая* связь возникает при диффузии воды через стенки клеток и понижении концентрации растворов внутри клеток (например, набухание древесины). *Структурная* связь наблюдается в процессах гелеобразования (90...99 % воды и 1...10 % твердой фазы).

Физико-механическая связь существует при смачивании поверхности материала или конденсации влаги на нем в результате сорбции ее из воздуха. Сорбция – это поглощение водяного пара из воздуха и конденсация его в микрокапиллярах, радиус которых $< 0,1$ мк, за счет пониженного капиллярного давления. В макрокапиллярах (радиус $> 0,1$ мк) давление пара над плоским мениском равно парциальному в окружающей среде, а заполнение микрокапилляров водой происходит при непосредственном увлажнении.

Строительные материалы в зависимости от вида связи влаги подразделяются на следующие типы:

1. *капиллярно-пористые тела*, - вода удерживается силами капиллярного давления, а удаление влаги происходит без существенного изменения первоначального объема;
2. *коллоидные тела* – материалы с осмотической и структурной связью воды;
3. *коллоидно-капиллярно-пористые тела*, присутствует как осмотическая, так и капиллярная вода; эти материалы при увлаж-

нении набухают, а при высушивании уменьшаются в объеме.

Тепло- и массообмен в процессе сушки

Удаление влаги из материала происходит под влиянием двух процессов: взаимодействия материала с окружающей средой (внешний тепло- и массообмен) и внутреннего тепло- и массопереноса, т. е. диффузии влаги от центральных слоев к наружной поверхности.

Внешний тепло- и массообмен при сушке. Интенсивность влагоотдачи, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, от поверхности материала в окружающую среду описывается уравнением (8.1).

$$q_{п.в} = -\alpha' \cdot (P_{п.м.} - P_v) \quad (8.1)$$

где α' – коэффициент влагоотдачи, $\text{кг} \cdot \text{м}^2 / (\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})$; $P_{п.м.}$ – давление пара на поверхности материала (равно давлению насыщенного пара при температуре поверхности), Па; P_v – парциальное давление пара в окружающей среде, Па.

Так как в сушильных установках преобладает конвективный теплообмен, то интенсивность потока теплоты к материалу, $\text{кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, зависит от теплофизических характеристик и скорости движения сушильного агента, температуры и характера поверхности материала:

$$q = \alpha \cdot (\bar{t}_c - \bar{t}_п) \quad (8.2)$$

где α – коэффициент теплоотдачи от сушильного агента к материалу, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; \bar{t}_c , $\bar{t}_п$ – средние температуры соответственно сушильного агента и поверхности материала, $^\circ\text{C}$.

Теоретический расчет тепло- и массообмена в каждом конкретном случае крайне затруднен. Поэтому для расчета применяют теорию подобия с использованием экспериментально полученных величин для геометрически и физически подобных структур, начальных состояний и условий взаимодействия материала с окружающей средой. При этом используют тепловые и массообменные критерии подобия.

Внутренний тепло- и массообмен. В процессе сушки изменяются температура и влагосодержание поверхности материала, вызывая в материале распространение теплоты (теплоперенос) и движение потоков влаги и воздуха (массоперенос). Тепло- и массоперенос в материале определяются градиентами температур, влагосодержаний и давлений.

Теплота, передаваемая к поверхности материала с помощью внешнего тепло- и массообмена, распространяется в материале за счет его теплопроводности. Однако при сушке этот процесс

осложняется перемещением теплоты, которую несет передвигающийся в материале поток массы.

Периоды процесса сушки

Для знакомства с динамикой изменения температур и влажностей в материале в процессе сушки представим, что капиллярно-пористый материал с начальным влажностью u_0 и температурой t_0 помещен в установку с непрерывно меняющимся сушильным агентом и постоянной температурой t_c . Характер изменений этих параметров в различные периоды сушки дан на рис. 8.1. Распределение температур, влажностей и давлений в материале представлено на примере неограниченной пластины толщиной $2x$ (рис. 8.2.).

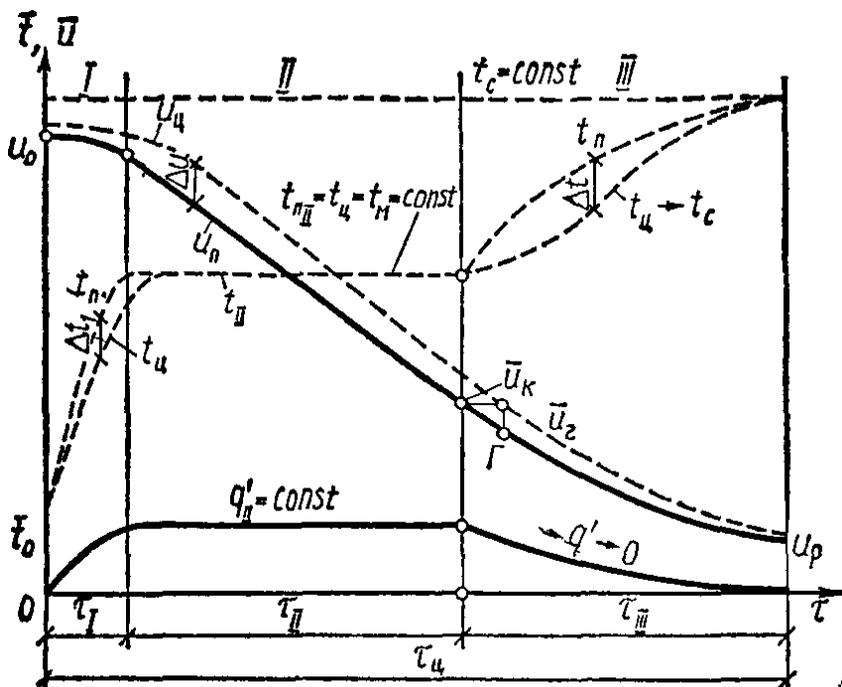


Рис. 8.1. График сушильного процесса

В первый период (I) сушки – *период прогрева* (τ_I) – происходит прогрев материала, и температура в установке повышается от t_0 до t_{II} . Температура на поверхности материала значительно выше, чем в центре (Δt_I); поток массы (рис. 8.1, а), вызванный градиентом температур, направлен к центру изделия. Поток мас-

сы q'_u (рис. 8.1, б), вызванный градиентом влагосодержаний, направлен к поверхности, так же, как и поток массы q'_p (рис. 40, в), вызванный градиентом давлений. Градиент температур оказывает тормозящее действие на передвижение влаги к поверхности, что отражается в уравнении плотности потока для периода I:

$$q'_I = q'_u - q'_t + q'_p \quad (8.3)$$

Интенсивность испарения влаги в течение первого периода сушки, возрастает, а влажность материала снижается незначительно.

Период II называется *периодом постоянной скорости сушки* и характеризуется постоянной температурой материала как на поверхности, так и в центре его, равной температуре мокрого термометра.

Парциальное давление паров на поверхности равно давлению насыщения. Внешняя поверхность покрыта слоем влаги и скорость сушки определяется условиями внешней диффузии пара через пограничный слой в окружающую газовую среду. Градиенты температур отсутствуют; передвижение влаги к поверхности зависит от градиентов влагосодержаний и давлений:

$$q'_I = q'_u + q'_p \quad (8.4)$$

Сушка происходит с постоянной интенсивностью, приближающейся к интенсивности испарения влаги со свободной поверхности, превышая ее на 10...20 % за счет влияния структуры поверхности материала, а при высокоинтенсивной сушке – за счет перехода процесса испарения внутрь материала.

Процесс заканчивается, когда свободная влага полностью испарится, влагосодержание снизится до критического u_k , а влагосодержание на поверхности – до гигроскопического u_g , соответствующего влажности материала при длительном воздействии на него насыщенными парами окружающей среды. Точка Г (рис. 8.1) разделяет влажное состояние материала (период II) от гигроскопического (период III).

Период III сушки материалов называется *периодом падающей скорости сушки*. Основная влага удалена из материала в предыдущем периоде, поэтому скорость сушки зависит, в основном, от скорости перемещения влаги внутри материала по капиллярам и порам. Теплота в период III расходуется не только на испарение влаги, как в периоде II, а также на нагрев материала.

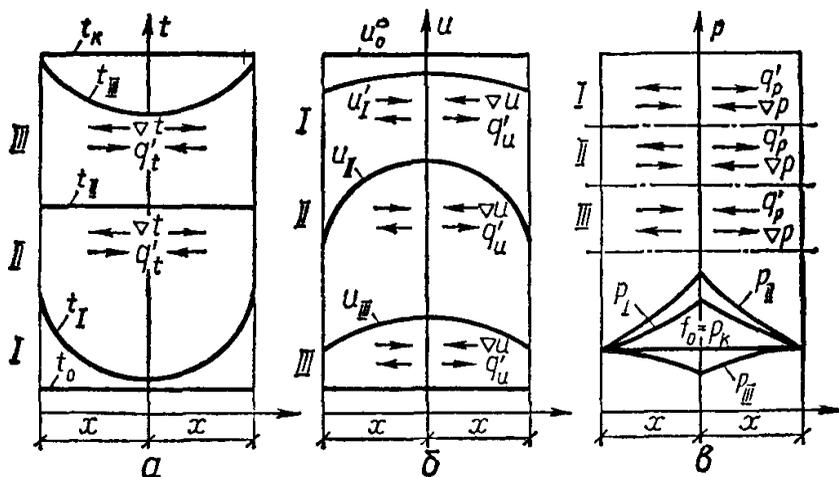


Рис. 8.2. Схема направлений градиентов и частных потоков массы при сушке: а, б, в – градиенты температур, влагосодержаний, давлений; I, II, III – периоды сушки

Температура поверхности выше температуры мокрого термометра ($t_n > t_m$) и приближается к температуре сушильного агента t_c ; за счет теплопроводности материала прогревается и весь его объем, температура центра растет. В результате вновь возникает перепад температур на участке поверхность – центр, а поток массы q_t , вызванный градиентом температур, направлен внутрь материала. Часть водяных паров конденсируется в порах, давление паров вследствие уменьшения их конденсации становится меньше давления насыщенных паров при той же температуре. Градиент давлений направлен к поверхности, а частный поток массы q'_p – внутрь материала. Градиент влагосодержаний направлен внутрь материала, а частный поток массы q'_u – к поверхности. Удаление влаги продолжается, однако интенсивность испарения уменьшается и по достижении материалом равновесия влажности становится равной нулю. Равновесная влажность материала u_p соответствует тепловому и влажностному равновесию с окружающей средой и зависит от структуры материала, его температуры и относительной влажности среды φ .

Уравнение плотности потока массы для периода падающей скорости сушки (период III) записывается в следующем виде:

$$q'_I = q'_u - q'_t + q'_p \quad (8.5)$$

Напряжения и деформации в процессе сушки

Возникающие под влиянием внешнего воздействия поля температур приводят к неравномерному распределению влагосодержания по объему материала и удалению влаги из различных слоев. При удалении влаги частицы материала сближаются. В результате размеры изделия сокращаются и происходит определенная усадка материала, зависящая от его структуры и вида связи влаги.

В строительных материалах, относящихся к капиллярно-пористым телам, линейная усадка определяет размеры тела как

$$l = l_0 \cdot (1 + \beta_l \cdot u) \quad (8.6)$$

$$\beta_l = \frac{dl}{l_0 du}$$

где β_l – коэффициент линейной усадки, характеризующий интенсивность изменения линейных размеров материала.

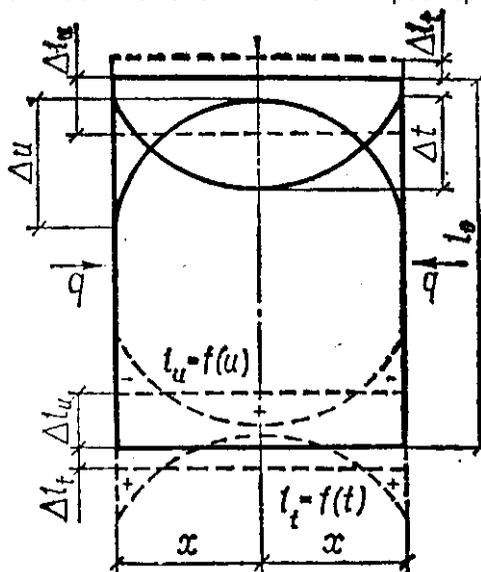


Рис. 8.3. Распределение температур, влагосодержаний и напряжений в пластине при сушке:

q – направление теплового потока; $2x$ – толщина пластины; l_0 – начальная длина пластины; $\Delta t, \Delta u$ – перепады температур и влагосодержаний; Δl_t – отрезок, на который должна увеличиться длина пластины от температурного расширения; Δl_u – отрезок, на который должна уменьшиться пластина пропорционально влагосодержания; t, l – конфигурации, принимаемые пластиной соот-

ветственно от температурных и влажностных деформаций

Неравномерное распределение влагосодержаний Δu в материале при сушке (рис. 8.3) должно было бы привести к соответствующему сокращению размеров изделия, изменению конфигурации пластины, т. е. поверхностные слои материала были бы значительно короче, чем центральные. Развивающиеся силы стараются сдвинуть отдельные слои по отношению друг к другу, в результате возникает напряженное состояние в материале.

Однако линейная усадка материала Δl_u , вызванная изменением влагосодержаний, усреднена по толщине пластины, а различные зоны материала находятся в растянутом состоянии (знак «-», т. е. наружные слои сократились меньше расчетного значения) или сжатом (знак «+» – внутренние слои сократились больше расчетного значения). Если возникающее напряжение превышает прочность материала, то появляются трещины, а затем расщепление и полное разрушение материала.

В периоды I и III температура материала по толщине изделия различна (см. рис. 8.1; 8.2, а), в результате чего возникает неравномерное расширение различных слоев:

$$l = l_0 \cdot (1 + a_l \cdot \Delta t) \quad (8.6)$$

где a_l – коэффициент линейного расширения.

Перепад температур в пластине при нагреве ее с двух сторон составляет Δt (рис. 8.3), а теоретическое удлинение материала определяется кривой $l_t = f(t)$. Однако реальные размеры пластины $l_0 + 2\Delta l$. Усредненное удлинение Δl (с каждой стороны пластины), вызванное ее нагревом и расширением, приводит к возникновению температурных напряжений. Следовательно, наружные слои материала расширились меньше теоретических значений и находятся в сжатом состоянии (знак «+»), а внутренние – больше и находятся в растянутом состоянии (знак «-»).

При анализе схемы напряженных состояний необходимо отметить, что напряжения, возникающие под влиянием градиентов влагосодержаний и температур, имеют противоположные знаки, и уменьшая друг друга, снижают напряженное состояние материала. Однако усадка, вызываемая испарением влаги, во много раз превышает температурное расширение материала, и поэтому скорость испарения влаги, и соответственно изменение поля влагосодержаний в материале, оказывает основное влияние на деформативное изменение его структуры.

В периоды I и II сушильного процесса в материале в результате нагрева возникает внутреннее давление, вызванное расширением воздуха в капиллярах, движением влаги, а так-

же испарением влаги в пузырьки воздуха в капиллярах (см. рис. 8.2, *в*). В периоде III концентрация паров в капиллярах уменьшается и давление в центре изделия становится ниже давления окружающей среды.

Наиболее значительные перепады давлений возникают в материале при высокотемпературной сушке за счет кипения влаги. Как правило, такие условия наблюдаются при сушке токами высокой частоты, методом сброса давления или контактным способом на горячих поверхностях. Перепады давлений также могут быть причиной нарушения структуры материала при сушке.

Основные принципы расчета сушильного процесса

В сушильных установках основным видом сушильного агента является воздух, передающий материалу теплоту для испарения влаги и поглощающий испарившуюся из него влагу, а затем удаляющий ее из установки.

Сушильные качества воздуха зависят от его влажности. Влажный воздух – это смесь сухого воздуха и водяных паров. Степень наличия влаги в воздухе определяется тремя параметрами: абсолютной и относительной влажностями, влагосодержанием.

Графическое решение задач процессов сушки. Графоаналитический метод решения задач по определению параметров сушильных процессов был предложен Л. К. Рамзиным на основе построенной им $i-d$ -диаграммы. Принципы и система построения $i-d$ -диаграммы рассматриваются в предыдущих курсах, поэтому мы остановимся лишь на решении задач в $i-d$ диаграмме.

Определяем параметры влажного воздуха в окружающей среде. Для этого необходимо знать любые два параметра (например t и φ). Затем, используя $i-d$ -диаграмму (рис. 8.4, *а*), на пересечении линий, соответствующих t_0 и φ_0 находим точку А. Влагосодержание d_0 определяем, проведя из точки А вертикальную линию $d_0 = \text{const}$ до пересечения ее с осью d ; энтальпию i_0 – по линии $i_0 = \text{const}$; парциальное давление – при пересечении линии $d_0 = \text{const}$ с треугольником парциальных давлений; точку росы t_p находим по $t = \text{const}$, проходящей через точку пересечения линий $d_0 = \text{const}$ и $\varphi = 100\%$.

Процесс подогрева влажного воздуха в калорифере характеризуется повышением температуры, энтальпии и снижением относительной влажности и проходит из точки А по линии $d_0 = \text{const}$ до точки В, характеризующейся параметрами t_1 и i_1 , $d_0 = d_1$.

Адиабатный процесс испарения влаги из материала (увлажнение сушильного агента) происходит по линии $i = \text{const}$ (например прямая BC).

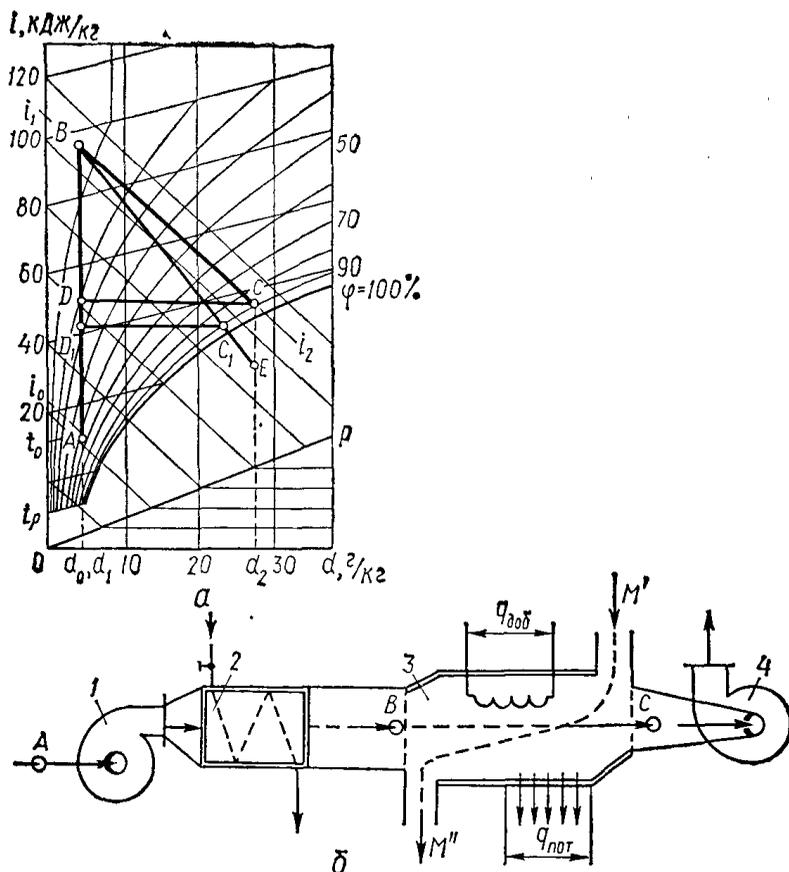


Рис. 8.4. Основной вариант сушильного процесса:
 а – изображение в $i - d$ -диаграмме; б – схема сушильной установки; 1 – дутьевой вентилятор; 2 – калорифер; 3 – сушильная камера; 4 – вытяжной вентилятор

Основной вариант сушильного процесса (рис. 8.4, б). Вентилятор 1, забирая воздух из окружающей среды с параметрами, характеризуемыми точкой А, подает его в калорифер 2, где он нагревается до параметров, характеризуемых точкой В, превращаясь при этом в сушильный агент с высокими свойствами. Затем воздух вентилятором 4 просасывается через сушильную установку

З, отбирая влагу у материала, увлажняясь и изменяя свои параметры от значений, определяемых точкой В до значений, определяемых точкой С. При этом сушка может происходить при постоянном теплосодержании влажного воздуха, а также при подаче дополнительного количества теплоты в сушильную установку или при потере ее.

Изображая сушильный процесс в $i-d$ -диаграмме, находим параметры наружного воздуха по методике, описанной выше. Для точки А – это φ_0, d_0, t_0, i_0 . Проходя через калорифер, воздух сохраняет свое влагосодержание ($d_0 = d_1 = const$), так как с теплоносителем (дымовыми газами, паром, водой) не контактирует. Нагрев без влагообмена в $i-d$ -диаграмме выражается вертикальной прямой из точки А до пересечения с изотермой t_1 . Изменив относительную влажность воздуха с $\varphi \approx 60...90\%$ до $\varphi \approx 2...5\%$, а температуру с t_0 до t_1 , мы на этот процесс затратили теоретически $i_1 - i_0 = \Delta t$ теплоты. Полученный сушильный агент подаем в сушильную установку и обдуваем влажный материал.

Теоретически сушильный процесс в установке пойдет без расхода теплоты на испарение влаги, по адиабатной прямой из точки В по линии $i_1 = const$. Изменяя свои параметры по этой линии, сушильный агент может содержать максимально возможное количество влаги при относительной влажности $\varphi = 100\%$. Однако мы знаем по определению точки росы, что при $\varphi = 100\%$ происходит конденсация влаги, т. е. влага может опять осесть на материале или в установке, поэтому конечная относительная влажность сушильного агента доводится только до $85...90\%$. На пересечении линии $i_1 = const$ и $\varphi = 90\%$ находим точку С, характеризуемую параметрами φ_2, d_2, t_2, i_2 с которыми отработанный сушильный агент выбрасывается из установки. Построенный треугольник АВС отражает основной вариант сушильного процесса.

Как видно из построения в $i-d$ -диаграмме, линия ВС характеризует изменение следующих параметров сушильного агента в сушильной установке: снижение температуры, увеличение относительной влажности и влагосодержания. Проведенная из точки С до пересечения с линией АВ, линия СД, параллельная оси d , в масштабе $i-d$ -диаграммы выражает изменение влагосодержания сушильного агента ($d_2 - d_1$) в процессе сушки.

Таким образом, выполненное нами построение, позволяет сделать вывод, что 1 кг наружного воздуха, нагретого от точки А до точки В, при прохождении через сушильную установку может забрать у материала ($d_2 - d_1$) влаги. Следовательно, на 1 кг испаренной влаги для теоретического процесса сушки АВС рас-

ход сухого воздуха, кг/кг, составляет:

$$l = \frac{1000}{d_2 - d_1} \quad (8.7)$$

Отсюда расход теплоты на 1 кг испаренной влаги, кДж/кг:

$$q = l \cdot (i_1 - i_0) \quad (8.8)$$

В отличие от теоретического, реальный процесс сушки может проходить при наличии тепловых потерь или поступлении в установку добавочной теплоты.

Влияние режимов сушки на качество материала

Эффективные режимы сушки должны обеспечивать высокую интенсивность сушильного процесса, сохраняя при этом качественные характеристики материала. *Мягкие режимы* отличаются большой длительностью процесса и невысокими температурами обработки, а *жесткие* – повышенной температурой и короткими сроками.

Режим сушки характеризуется параметрами сушильного агента, описываемыми $i - d$ -диаграммой (температура, относительная влажность, влагосодержание), а также скоростью его продвижения по установке.

Для материала режим сушки определяется его напряженным состоянием, вызванным перепадом влагосодержаний между центром материала или изделия и поверхностью.

Классификация сушильных установок

Продуктивность сушильного процесса во многом зависит от конструктивных особенностей сушильных установок, вида и эффективности теплоносителя и сушильного агента, рациональной схемы распределения потоков газов и материала.

Сушильные установки классифицируются по следующим признакам.

По *режиму работы* – периодического, непрерывного и попеременно-циклического действия.

В установках периодического действия чередуются загрузка, сушка и выгрузка материала. Эти установки характеризуются низким уровнем механизации, отсутствием систем автоматизации, большими потерями теплоты на периодический разогрев конструкций ограждений установок. Установки непрерывного действия работают в стационарном режиме загрузки и выгрузки материала, материал или изделия последовательно проходят разные зоны; в них сушка более экономична.

В работе переменного-циклических сушилок использован принцип управления потоками влаги для повышения интенсивности сушки: быстрый нагрев чередуется с периодами остывания, во время которых градиенты температур и влагосодержаний усиливают поток влаги к поверхности материала; при этом длительность процесса сокращается на треть по сравнению с обработкой изделий в других типах сушилок. По *виду обрабатываемого материала* – для сыпучих и кусковых материалов (песок, глина, щебень, гранулы);

текучих материалов (шликер); штучных изделий (кирпич, керамические блоки, плитки, трубы), листовых изделий (сухая штукатурка, теплоизоляционные плиты).

По *способу передачи теплоты* – контактные (передача теплоты через металлическую поверхность), конвективные (теплота передается при непосредственном соприкосновении и обдуве материала сушильным агентом), радиационные (с помощью инфракрасного излучения). Менее распространены сушилки: с периодическим сбросом давления в автоклавах; работающие на перегретом паре; с прогревом токами высокой частоты; с комбинированными источниками теплоты.

По *схеме движения газов и материала* – прямоточные (материал и газы движутся в одном направлении), противоточные (материал и газы движутся навстречу друг другу), с внутренним или внешним подогревом сушильного агента, с рециркуляцией или без нее, одно-или многозонные.

По *основной конструкции* – газослоевые с неподвижным, кипящим или виброкипящим слоем с сушкой воздухом или дымовыми газами; сушилки с сушкой при падении, во взвешенном состоянии и при движении материала; распылительные с пневматическим, механическим и центробежным распылением; барабанные (с непосредственным контактом газа и материала и с внешним смыванием поверхности); контактные (шнековые, скребковые, трубчатые, подовые); тоннельные и щелевые с ленточными конвейерами или вагонетками для сушки штучных и листовых изделий; камерные сушилки.

СУШИЛКИ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Шахтные и газослоевые сушилки

При подготовке к дальнейшему использованию сыпучих и кусковых строительных материалов широкое распространение получили шахтные сушилки с неподвижным, кипящим, виброкипящим и взвешенным слоем.

Шахтные сушилки с неподвижным слоем используются для обработки больших объемов материала невысокого качества. Из-за низкого уровня механизации процесса и невысокой удельной производительности сушилки этих модификаций в настоящее время практически не применяются. В механизированных вариантах шахтных сушилок использован принцип противотока:

материал пересыпается по наклонным лопастям (решеткам) или падает вниз навстречу потоку горячих газов, предварительно прошедших через слой материала, лежащего на подовых решетках (или тарелках). Скорость движения газов невысока, а динамическое давление газов меньше силы тяжести неподвижного слоя материала. Газы фильтруются по пустотам и каналам между кусками материала, проходя там, где толщина слоя и его сопротивление меньше; в более толстых участках слоя материал не высушивается.

Более интенсивная и равномерная сушка происходит в *установках кипящего слоя*. При повышении скорости движения сушильного агента динамическое давление потока газа возрастает, приближаясь по значению к давлению слоя материала. Частицы материала при этом начинают перемещаться в пределах слоя. Объем, занимаемый материалом, увеличивается, а слой становится *псевдооживленным*. При дальнейшем увеличении скорости сушильного агента сначала отдельные, наиболее легкие, частицы материала начинают взлетать над поверхностью слоя, затем наступает «кипение» всей/слоя. Частицы материала практически теряют контакт друг с другом и свободно перемещаются под давлением потока газа в пределах слоя. Продолжая увеличивать скорость газа, достигают критической скорости (скорости витания), при которой весь материал находится во взвешенном состоянии, удерживаясь в объеме установки силами динамического давления потока газа. При этом частицы материала, потерявшие влагу, становятся легче, захватываются потоком газа и уносятся, причем расстояние транспортирования зависит от размеров частицы.

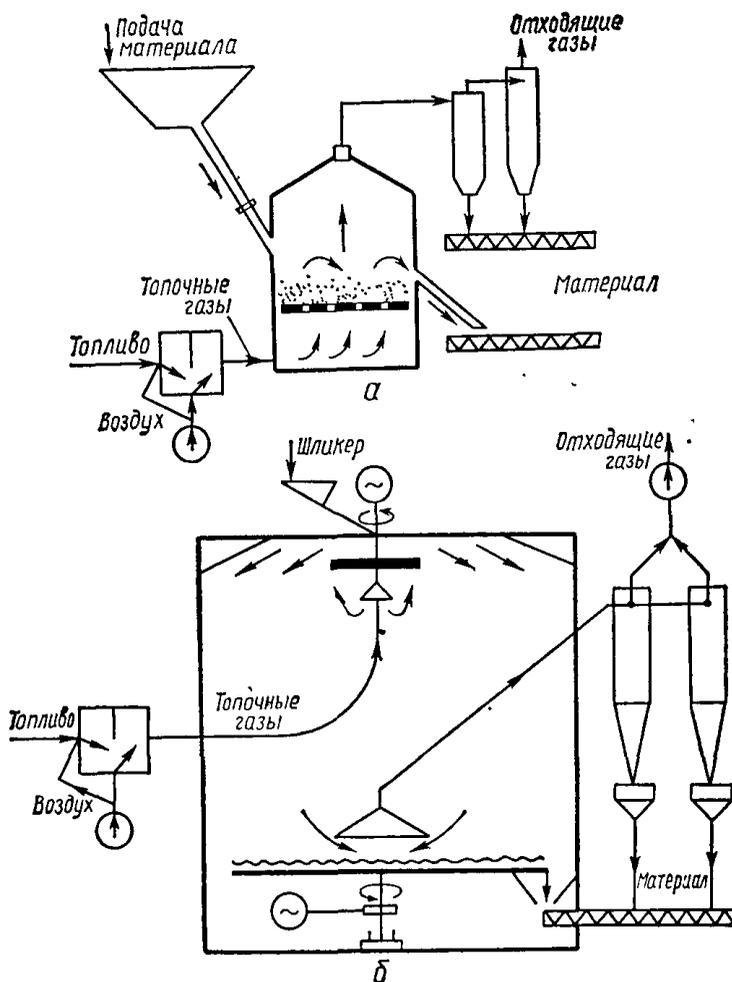


Рис. 9.1. Схемы сушилок:
 а – с кипящим слоем; б – распылительной

Схема простейшей сушильной установки для сушки материалов в кипящем слое представлена на рис.9.1, а. Сжигая топливо в топке и смешивая дымовые газы с воздухом, получают сушильный агент, подаваемый вентилятором под решетку с материалом. Газы, проходя через решетку и слой материала, захватывают высушенные мелкие фракции и транспортируют их в пылесадительные камеры и циклоны, в которых фракции обеспыливаются, а газы охлажденными выбрасываются в атмосферу. Материал из

загрузочного бункера подают в сушилку, перемещают по решетке и выгружают на шнековый транспортер. Таким же образом выгружают материал из пылесадительных камер и циклонов.

В установках данного типа высота слоя зависит от размеров частиц материала и давления, создаваемого вентилятором, и составляет 200...700 мм. Температура газов на входе в установку 300...400 °С, температура отходящих газов 100... 125 °С, удельный расход теплоты 5000...6000 кДж/кг испаренной влаги.

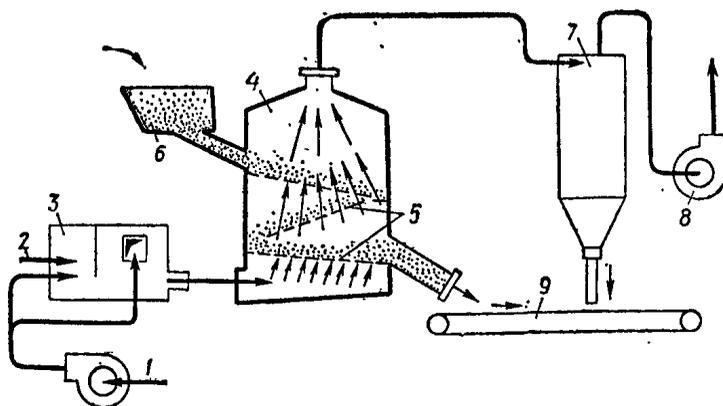


Рис. 9.2. Схема трехъярусной сушилки с кипящим слоем:
1,2 – подача воздуха и топлива; 3 – топка; 4 – сушильная камера! 6 – решетки; 5 – питатель подачи материала; 7 – циклоны; 8 – отсасывающий вентилятор; 9 – конвейер готовой продукции

Так как температура отходящих газов невелика, но превышает температуру высушенного материала, для повышения эффективности и экономичности установок целесообразно высушиваемый материал располагать в несколько ярусов по ходу потока газов (рис. 9.2). Вентилятором 1 воздух подают в топку 3, а также смесительную камеру для смешивания с дымовыми газами до нужных параметров. Сушильный агент подают в камеру, где он последовательно проходит через три яруса, отдавая теплоту на испарение влаги. Отверстия в решетке меньше размеров частиц, поэтому материал с нижнего яруса не проходит на верхний, а с верхнего – небольшой унос из-за высокой влажности материала. Материал, загружаемый через питатель 6, проходит по трем зонам сушки, и после обработки конвейером подается на склад готовой продукции. В установках многозонной сушки удельные рас-

ходы ниже и составляют 3500... 5000 кДж/кг испаренной влаги, соответственно ниже и температуры уходящих газов – 60...80 °С.

В сушильных установках кипящего слоя создается высокое объемное напряжение по влаге [150... 250 кг / (м³ • ч)], влажность материала быстро, за несколько минут, падает с 20...25 % до 0,1 %.

Однако в сушилках подобных конструкций для создания кипящего слоя сушильный агент необходимо подавать с большой скоростью и для этого требуется установка высоконапорных вентиляторов. Если же решетку с материалом подвергнуть вибрации, то аэродинамическое сопротивление слоя значительно уменьшается, что дает возможность существенно снизить напор вентилятора. Сушилки с виброкипящим слоем имеют практически одинаковые с другими установками кипящего слоя показатели по расходу теплоты, объемному напряжению, температурам, однако расход электроэнергии значительно ниже.

Удельный расход теплоты 5000...6000 кДж/кг испаренной влаги при перепадах температур газа в сушилке 750...850 °С; производительность 2000...2500 кг испаренной влаги в час.

Барабанные сушилки

Для сушки сыпучих и мелкокусковых строительных материалов применяют экономичные и надежные в эксплуатации барабанные сушильные установки (рис. 9.3).

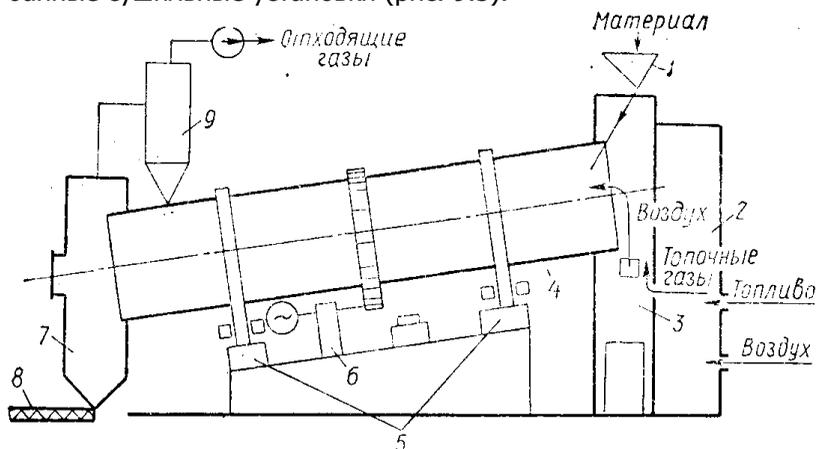


Рис. 9.3. Барабанная сушилка:

1 – бункер-питатель; 2 – топка; 3 – камера смешения; 4 – сушильный барабан; 5 – опоры; 6 – электропривод с редуктором; 7 – концевая камера; 8 – конвейер; 9 – циклон

В топку 2 подают топливо, а дутьевым вентилятором – необходимый для горения воздух. Топочные газы в камере смешения 3 разбавляют наружным воздухом до расчетных параметров и подают в сушильную установку. Барабанная сушилка представляет собой стальной барабан 4 диаметром 1...3,5 м и длиной 5...27 м, установленный под углом 4...6° к горизонту на роликовых опорах 5 и вращаемый электроприводом 6 с частотой вращения 0,5...8 об/мин. Продольному перемещению барабана препятствуют бандажи, закрепленные на барабане и вращающиеся с ним по роликовым опорам. При вращении барабана материал из загрузочного бункера / перемещается в концевую камеру 7, где попадает на конвейер 8.

Для повышения эффективности установки, лучшего перемешивания материала, повышения скорости тепло-и массообмена, сокращения сроков сушки устанавливают *внутренние насадки* (рис. 9.4), конструкции которых зависят от вида, размера частиц и влажности материала.

Подъемно-лопастные насадки (рис. 9.4, а) различных конфигураций применяют при сушке склонных к слипанию крупнокусковых материалов. Материал при вращении барабана захватывается лопастями, поднимается и с высоты, равной диаметру барабана, сбрасывается вниз. Недостатком таких насадок являются пыление и унос материала.

Секторные, или ячеиковые, насадки (рис. 9.4, б) устанавливают для сушки очень мелких материалов, склонных к пылению. Из бункера материал поступает в ячейки и при вращении барабана только переваливается в них или падает с небольшой высоты. Цепные насадки позволяют в сушильном агрегате совмещать при обработке помол и сушку (рис. 9.4, в). Так, увлажненную глину лопастями (или ковшами) загружают в сушильный барабан, начало которого футеровано огнеупором, без каких-либо насадок (во избежание замазывания). В барабане в шахматном порядке навешаны цепи длиной 350...600 мм с шагом по окружности около 500 мм, которые разбивают, перемешивают и перебрасывают куски глины, не давая им налипать на стенки или ячейки.

По основной конструктивной схеме в барабанной сушилке предусмотрен принцип прямотока, т. е. материал и сушильный агент двигаются в одном направлении. Однако возможен и другой вариант – противоток, когда материал сохраняет направление движения, а функции концевых камер взаимозаменяют, в результате сушильный агент движется навстречу материалу. При прямотоке влажный материал на входе в барабан встречается с высоко-

температурным сушильным агентом (600... 900 °С), но в процессе сушки материал нагревается не выше 80...100°С. Этот принцип сушки применяют, например, для глины, так как при противотоке в конце сушки возможен ее перегрев, дегидратация и потеря пластичности. Противоток же обеспечивает первоначальный контакт материала с сушильным агентом более низкой температуры и значительно более высокую температуру материала в конце сушки (например, сушка песка, щебня). При противотоке температура газов на выходе из установки ниже, чем при прямотоке, следовательно, полученная в топочных устройствах тепловая энергия используется более полно.

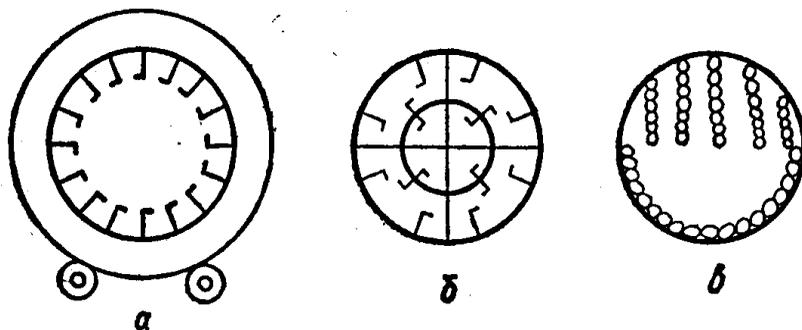


Рис. 9.4 Насадки для сушильных барабанов:
а –подъемно-лопастная, *б*- секторная, *в*-цепная

Для уменьшения потерь теплоты в окружающую среду барабан теплоизолируют различными утеплителями на проволочном каркасе и защищают металлическим кожухом.

Длительность сушки материала в барабанах зависит от вида материала, длины, диаметра и угла наклона барабана, частоты его вращения и составляет 10...40 мин. Размеры барабана выбирают! исходя из допустимого объемного напряжения по влаге, которое колеблется от 30 до 120 кг/(м³ • ч). Расход теплоты на 1 кг испаренной влаги составляет 3700...5800 кДж/кг.

Контактные сушилки

При обработке материалов, загрязняющихся и снижающих свои качества при непосредственном контакте с сушильным агентом, а также при использовании жидких теплоносителей (высококипящих, горячей воды, масла) применяют контактные сушилки, в которых теплоноситель отделен поверхностью нагрева от высу-

шиваемого материала. Процесс сушки проходит при движении материала самотеком или с помощью механических устройств (шнеков, скребков).

Под действием собственного веса материал движется во вращающихся сушильных барабанах, обогреваемых снаружи дымовыми газами, или в сушилках с вращающимся пучком труб, обогреваемых паром (при сушке угля). Механическое продвижение материала обеспечивается тарельчатыми скребковыми или трубчатыми шнековыми установками. При сушке угля, песка, глины, мела нагрев осуществляется дымовыми газами температурой 800...1000 °С; при сушке гипса в качестве теплоносителя применяется пар.

Для контактных сушилок интенсивность и эффективность работы характеризуется напряженностью по испаренной влаге на 1 м² горячей поверхности, зависящей от вида высушиваемого материала, его начальной влажности, типа установки, и составляет 0.1...20 кг/(м² • ч).

Водяной пар давлением до 1,6МПа (температура до 200 °С) используют при контактной сушке в *вальцовых сушилках*, представляющих собой вращающийся полый валец (или два – в двухвальцовых сушилках), частично погруженный в резервуар со шликером. При вращении вальца ($n = 2... 8$ об/мин) на него тонким слоем (около 1 мм) налипают шликер, который затем высушивается до влажности 8...10 %. Шликер в верхней части вальца снимается специальным скребковым устройством и удаляется шнековым конвейером, а испаренная влага – через вытяжной колпак. При этом больших тепловых потерь нет и удельный расход теплоты на 1 кг испаренной влаги составляет 3100... 3800 кДж/кг.

Если контактные сушилки работают на паре, то необходимо обеспечить постоянное удаление из полостей воздуха, в десятки раз снижающего коэффициент теплоотдачи по давлению с чистым паром, а также конденсата, уменьшающего активную поверхность нагрева. Кроме того, для пара, как и для других теплоносителей, необходима достаточная интенсивность циркуляции в греющих полостях.

Конвейерные сушилки

Сыпучие, кусковые и гранулированные материалы могут высушиваться в сушилках непрерывного действия, представляющих собой горизонтальный ленточный или вертикальный ковшовый конвейер. На ленточном конвейере слой материала

толщиной 100...300 мм перемещается вместе с металлической сеткой, прикрепленной к несущим звеньям конвейера. Сушильный агент вентиляторами (или дымососами) подается через распределительные короба под несущую сетку конвейера. При просасывании газа через слой материала достигается высокая интенсивность сушки. Однако для получения качественной продукции требуются высокая равномерность слоя материала и однородность его фракционного состава. Так, при обработке кусковых материалов различных фракций воздушный агент будет проходить в свободные пространства возле больших кусков, не затрагивая лежащую плотную массу мелких. Удельный расход теплоты составляет 6000...7000 кДж/кг испаренной влаги.

При подаче сушильного агента со скоростью псевдоожижения под слой материала, лежащего на ленте, сушилка может работать с кипящим слоем при непрерывном удалении высушенного материала. В этом случае необходимо предусматривать многоступенчатые и эффективные пылеотделительные устройства. С целью снижения уноса сушильный агент подают на слой сверху вниз, в результате чего пылевидные фракции задерживаются материалом и сеткой.

Кроме однократного прососа через слой, не позволяющего полностью использовать теплоноситель, применяют многократное, последовательное, зигзагообразное прохождение одного и того же сушильного агента через отдельные участки слоя.

Сушильный процесс в конвейерных сушилках может быть организован как многозонный, т. е. с подводом теплоносителя в каждую зону, что повышает эффективность процесса и гибкость в его регулировании. Теплообмен можно также осуществлять с помощью инфракрасного излучения от электроизлучателей или от разогретых дымовыми газами металлических коробов. В сушилках данного типа совмещена интенсивная сушка материала (мелко-раздробленного или сыпучего) при равномерном его высушивании и пневмотранспорт к месту использования готового продукта. Пневматические сушилки часто являются составляющей частью пневмо-мельничных установок, предназначенных для одновременного помола и сушки глины, угля, гипса и других материалов. Источником теплоты в таких установках является топка, из которой дымовые газы, полученные при сжигании топлива, поступают в камеру смешения, где их разбавляют наружным воздухом до нужных параметров. Затем сушильный агент подают в рабочую камеру сушилки, представляющую собой вертикальную трубу, плавно сужающуюся сверху, и предназначенную для поддержа-

ния постоянной скорости движения газов. Материал подается непрерывно и совместно с потоком сушильного агента, поступающим из смесительной камеры. Так как материал сушат во взвешенном состоянии при постоянном транспортировании, то скорость газового потока должна быть больше скорости витания твердых частиц на 20...25 %. Скорость движения газов зависит от вида материала и тонкости его помола и составляет 2...30 м/с.

Частицы высушенного материала отделяются от газов в циклонах и шнековыми конвейерами подаются на склад готового продукта.

При использовании пневмомельничной установки для приготовления пылевидного топлива угольную пыль, полученную в мельницах, через трубу-сушилку посредством горячего воздуха подают непосредственно в топочную камеру котельной установки. Совмещенный помол и сушку материалов применяют для получения глиняных порошков, необходимых при изготовлении керамических изделий, переработке гипса – для приготовления сырьевой муки или ее низкотемпературного обжига с получением пол у водного гипса.

Пневматические сушилки работают по принципу прямотока с однократным использованием теплоносителя. Температура газов зависит от вида материала и составляет на входе в сушильную установку 150...400 °С» на выходе–50...150°С. Удельный расход теплоты зависит от влажности материала и находится в пределах 500...1000 кДж/кг испаренной влаги.

УСТАНОВКИ ДЛЯ СУШКИ ИЗДЕЛИЙ

Камерные сушилки

Камерные сушилки являются установками периодического действия и применяются для сушки кирпича-сырца.

Камерная сушилка конструкции института Росстрой-проект имеет рабочую камеру шириной 1,35 м, высотой 3 и длиной около 10 м. Загрузочная вагонетка, состоящая из двух рам, неподвижной и подвижной с десятью полками, груженными кирпичом-сырцом, закатывается в камеру по рельсовому пути. При нажатии рычага подвижная рама вагонетки опускается и полки с кирпичом-сырцом ложатся на специальные выступы, сделанные на стенах рабочей камеры по всей ее длине; пустая вагонетка выходит из камеры.

Под полом сушилки, по всей длине камеры, проходят три продольных канала: два боковых подводят в камеру теплоноситель; средний – отводит его из камеры. Подводящие каналы имеют короткие поперечные щели, отводящий – продольные. Температура газов в подводящих каналах камерных сушилок 100... 150 °С, в отводящем – 30...50 °С. В сечении камеры перепад температуры газов составляет 35...80 °С, что вызывает значительную неравномерность сушки (коэффициент неравномерности около 4). Под действием естественных аэродинамических сил, обусловленных разностью температур и плотности газа, нагретый сушильный агент из боковых каналов поднимается вверх по пристенным участкам и скапливается вверху камеры; в результате эти зоны являются наиболее нагретыми. В средней зоне сечения опускаются вниз охлажденные и насыщенные влагой газы. Аэродинамическое сопротивление садки кирпича затрудняет поступление сушильного агента в центральную зону сечения камеры, температура которой 30...40°С по сравнению с 80...100°С боковых зон. Скорость движения газов 2,5...3,5 м/с, расход теплоты 6400...7000 кДж/кг испаренной влаги, длительность сушки 3...5 сут.

Повышение скорости движения сушильного агента при одновременном увеличении расхода газов (с 40 м³ до 55 м³ на 1 кг испаренной влаги) улучшает качество и равномерность сушки, обеспечивая в камере циркуляцию сушильного агента, более равномерный и интенсивный влагообмен. При этом скорость сушки возрастает в 2...3 раза.

Недостатком камерных сушилок является неравномерность сушки по длине камеры, так как при постоянном сечении подво-

дящих каналов расход сушильного агента в задней части камеры выше и кирпич-сырец высыхает здесь в 1,5... 1,8 раза быстрее, чем в ее начале.

В связи с высоким расходом теплоты и неравномерностью сушки камерные сушилки не соответствуют потребностям современного интенсивного производства и не рекомендуются для строительства на новых заводах.

Тоннельные сушилки

Сушильные установки непрерывного действия, выполненные в виде различных тоннелей, получили широкое распространение при изготовлении кирпича, черепицы, гипсовых изделий, керамической плитки, санитарных керамических изделий, труб и т. п.

В качестве сушильного агента применяют дымовые газы печных установок или специальных топок в смеси с воздухом, а также воздух, нагретый калориферами или системами охлаждения обжиговых печей. Движение сушильного агента и материала может быть организовано по следующим схемам: прямоточной, противоточной, комбинированной (прямоточно-противоточной), струйной, поперечной. Существуют многочисленные схемы подвода сушильного агента и отвода отработавших газов, среди которых наиболее распространены нижний сосредоточенный подвод и нижний сосредоточенный отвод соответственно нагнетающим и отсасывающим вентиляторами.

Тоннельные камеры выполняют из легких теплоизоляционных бетонных плит или блоков; возможны каркасные конструкции с заполнением свободного пространства утеплителем. Камеры имеют длину 25...40 м, ширину 0,8...1,4 и высоту 1...2 м; толщина наружных стен 300...400 мм, перегородок 200...250 мм.

В зависимости от способа транспортировки изделий тоннельные сушилки подразделяются на вагонеточные, монорельсовые и конвейерные.

В работе большинства *вагонеточных тоннельных сушилок*, предназначенных для сушки кирпича-сырца, использована противоточная схема (рис. 10.1).

Кирпич укладывают на вагонетки в 8...10 рядов по высоте. Для повышения производительности сушилки садка должна быть плотной, причем плотность нижних рядов на 25...30 % меньше, чем верхних. Для улучшения равномерности омывания материала сушильным агентом свободный проход между садкой и стенками должен быть минимальным (не более 50 мм), посередине или

внизу садки оставляют свободный канал для прохода газов. Изделия располагают таким образом, чтобы пустоты располагались вдоль оси движения газов.

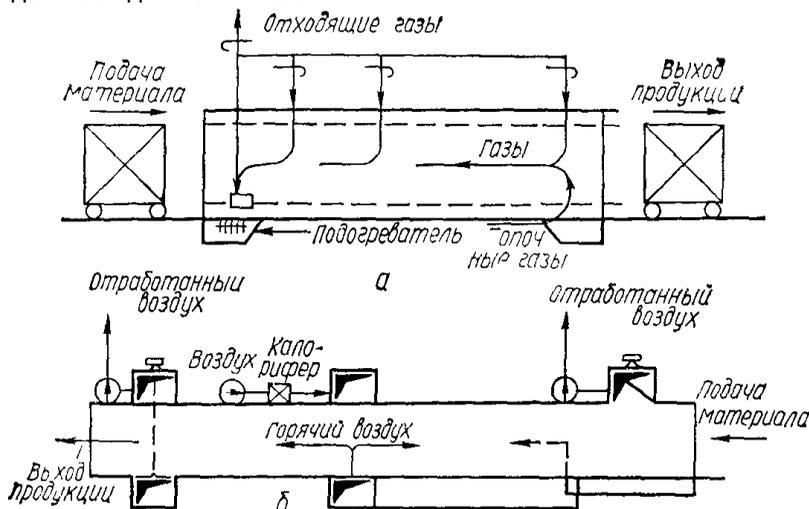


Рис. 10.1. Сушилки для штучных изделий

а – тоннельная с применением вагонеточного конвейера,
б – тоннельная вагонеточная для гипсовых блоков и архитектурных деталей

Топочные газы (сушильный агент) из коллектора поступают в несколько распределительных каналов и через отверстия в разгрузочной стороне тоннеля подаются в сушилку. Проходя по тоннелю, газы забирают влагу у материала и через отверстия в загрузочной зоне выбрасываются в атмосферу, частично направляясь на рециркуляцию. Влажный кирпич сырец встречает остывшие влажные газы, градиенты температур и влагосодержаний которых небольшие, что предупреждает возникновение в изделиях значительных напряжений и трещин. Во избежание конденсации водяных паров на холодном сырце сушилки оборудованы системой рециркуляции или подогрева газов на участке входа сырца.

Начальная температура газов 120...150 °С, отработанные газы имеют температуру 30...50 °С и относительную влажность 80...90 %; расход теплоты 4000... 6000 кДж/кг испаренной влаги; длительность сушки 16...48 ч.

Тоннельная сушилка с печными вагонетками конструкции института Гипростройматериалы имеет длину 50, ширину 1,4 и

высоту 2,6 м, высота тоннеля 1,45 м. Сушилка имеет надпотолочный распределительный канал и принудительную систему рециркуляции. Шесть вентиляторов обеспечивают циркуляцию воздуха как вдоль тоннеля, так и по его высоте, тем самым создавая условия для равномерного процесса сушки. В качестве теплоносителя используют горячий воздух температурой 150 °С, отбираемый из зоны остывания печи для обжига изделий. Длительность процесса сушки около 48 ч, удельный расход теплоты 8000 кДж/кг испаренной влаги.

Прямоточные тоннельные вагонеточные сушилки представляют собой блок из нескольких тоннелей (обычно 4-х) с общим фронтом загрузки и выгрузки, паровым или топочным калорифером. Сушильный агент через распределительные каналы, расположенные под полом подают вдоль камеры (по ходу движения изделий) в загрузочные зоны тоннелей. В зоне выгрузки через вытяжные каналы с помощью отсасывающего вентилятора удаляют отработанные газы. Эти установки предназначены для сушки прокатных гипсобетонных панелей, уста. нов ленных в вертикальном положении на вагонетках кассетного типа. Форсированный режим сушки позволяет снижать влажность панелей от 25 % до 10-12 % за 20 ч; начальная температура газов 130° С, скорость движения газов 1,7...2,0 м/с. Расход теплоты при этом составляет около 4700 кДж/кг испаренной влаги.

Изменение аэродинамической схемы на комбинированное движение газов, повышение начальной температуры сушильного агента до 225 °С и скорости движения газов до 2,8 м/с позволяют сократить длительность сушки гипсобетонных прокатных панелей до 12 ч.

Сушилки для листовых изделий

Для подачи листовых изделий (сухой штукатурки, древесноволокнистых и минераловатных плит) в сушилку и их транспортировки в процессе сушки применяют ленточные и роликовые конвейеры. Для этого сетчатую плетеную или состоящую из отдельных штампованных элементов ленту натягивают на ведущий и ведомый барабаны и пропускают через сушильную камеру. Натяжение ленты и скорость движения регулируются.

Сушилки для листовых изделий выполняют многоярусными с количеством ярусов от 6 до 20 (рис. 10.2). Так, в двухзонной шестиярусной сушилке для сухой штукатурки листы материала подаются последовательно на каждый ярус загрузочным мостиком. В сушилке листы передвигаются с помощью роликового кон-

вейера, движущегося со скоростью 0,9... 1,9 м/мин. По ширине сушилки, длина которой около 40 м, укладывают по два листа штукатурки.

Схема движения сушильного агента в установке предусматривает два циркуляционных контура: противоточный – в первой по ходу материала половине сушилки и прямоточный – во второй. В каждой из двух зон отработанный сушильный агент, смешиваясь с наружным воздухом, поступающим через торцы камеры, засасывается через вытяжные окна 1 в боковых стенках тоннелей в вытяжные короба 2, а затем вентилятором 3 подается в калорифер 4. На выходе из вентилятора установлен клапан, позволяющий избыточную часть смеси выбрасывать в атмосферу. Оставшуюся смесь нагревают до температуры 110... 130 °С и по раздаточным коробам 5 через раздаточные окна 6 подают в тоннели. Паровые калориферы 4 не обеспечивают высокую температуру сушильного агента, поэтому в процессе продвижения по камере он дополнительно подогревается паровыми регистрами 7.

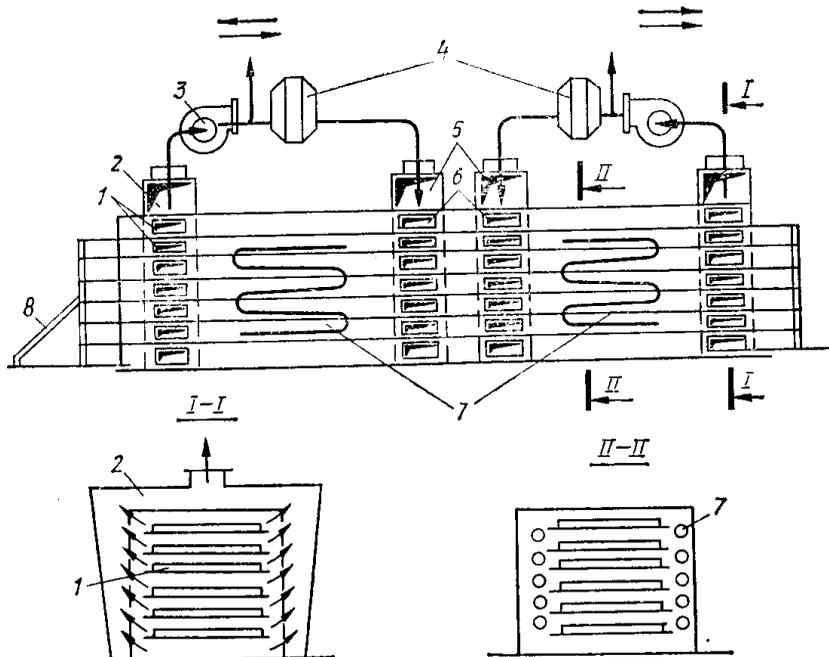


Рис. 10.2. Многоярусная роликовая сушилка:

- 1 – вытяжные окна; 2 – вытяжные короба; 3 – вентилятор;
- 4 – калориферы; 5 – раздаточные короба; 6 – раздаточные окна;
- 7 – паровые регистры; 8 – загрузочный мостик

Так как системы нагрева сушильного агента паровыми калориферами и регистрами не экономичны, в Институте теплоэнергетики АН УССР разработана конструкция сушилки с использованием дымовых газов. В эжекторной установке дымовые газы, выходящие из топки при температуре 1000 °С, смешиваются с атмосферным воздухом и с температурой 450 °С подаются в сушилку между первой и второй зонами. Разбавленный отработанными увлажненными газами сушильный агент температурой 240 °С в первой зоне движется навстречу изделиям, снижая свою температуру до 140 °С. Затем его частично удаляют в атмосферу, а частично – подают на рециркуляцию. Во второй зоне сушильный агент движется параллельно с материалом, а по третьей зоне он прогоняется с помощью вентилятора. Так как влагосодержание сушильного агента достигает 90... 150 г/кг и диффузия влаги в материале столь велика, что поверхность изделий не обезвоживается, гипс не дегидратируется несмотря на высокую (240 °С) температуру газов. Длительность сушки составляет около 40 мин, производительность установки увеличивается на 30 %.

Сжигание топлива непосредственно в сушильных установках возможно в конструкциях конвейерных ленточных радиационно-конвективных сушилок. В рабочей части сушилки над сетчатой лентой, по которой движется материал, на расстоянии 250 мм установлены керамические газовые горелки, расположенные под углом друг к другу и образующие потолок рабочей части тоннеля. Панель каждой горелки имеет излучающую поверхность 0,06 м² и собрана из 20 дырчатых керамических плиток размерами 45 X 65 X 14 мм с 860-ю отверстиями каждая. Подводимый к горелкам природный газ сгорает внутри перфорированных плиток, нагревая панель до 800...850 °С; основная часть теплоты передается излучением (60...70 кДж/ч на 1 см²). Отработанные газы, проходя по сушилке к вытяжным вентиляторам, отдают теплоту конвекцией, ускоряя процесс сушки. Сушка керамических плиток в тоннеле длиной около 18 мм проходит за 8 мин.

Сушилки с использованием электроэнергии, перегретого пара и жидкостей

Сушилки с использованием электроэнергии применяют для передачи энергии и прогрева материала инфракрасным излучением, токами высокой частоты и электромагнитным индукционным прогревом.

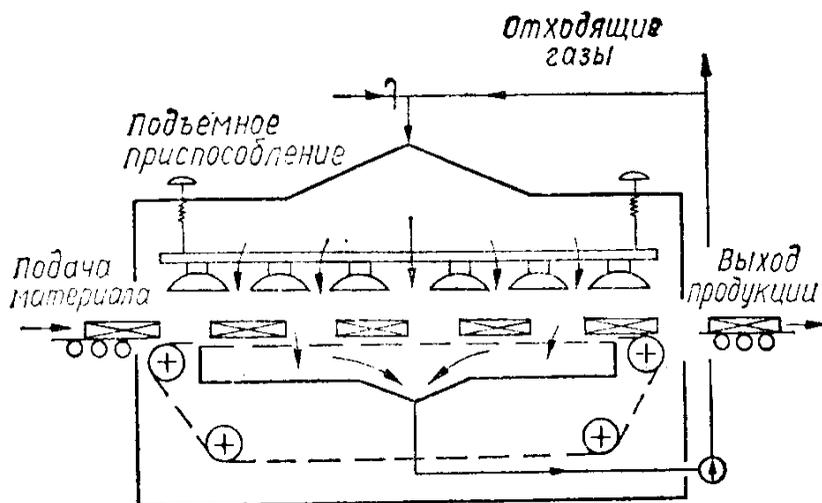


Рис. 10.3. Радиационно-конвективная сушилка

В качестве источников *инфракрасного излучения* используют различные излучатели: ламповые, стержневые, трубчатые, плоские. Так, зеркальные сушильные лампы (тип ЗС) мощностью 250 и 500 Вт и диаметром 180 мм, дают плотность потока энергии 0,2...2,0 Вт/см² в зависимости от расстояния до изделия; они малоинерционны, что положительно сказывается при прерывистом нагреве материала. Эти лампы применяют в ленточных конвейерных радиационно-конвективных сушилках (рис. 55). Секции ламповых излучателей с помощью специальных подъемных приспособлений, позволяющих регулировать плотность лучистого потока изменением расстояния до материала, устанавливаются над лентой с изделиями. Лампы и материал обдуваются потоком воздуха, который охлаждает их и уносит испаренную влагу. Недостатками ламп являются их непрочность и невозможность установки под конвейером из-за возможности попадания на колбу лампы воды или кусков материала. Срок службы лампы до 2000 ч.

Стержневые излучатели изготавливаются из карбида кремния (карборундовые) и работают около 1000 ч при температуре 1150 °С. Плотность лучистого потока составляет 0,8...0,1 Вт/см² на расстоянии до излучателя 0,1... 0,5 м. Повысить плотность потока в 2...3 раза позволяет установка параболического отражателя.

Металлический трубчатый излучатель (ТЭН) состоит из никромовой спирали, помещенной в металлическую трубку, запол-

няемую затем кварцевым песком. Рабочие температуры 400...500 °С. Так как спираль нагревается без воздуха, то срок службы излучателя 5000 ч и выше. Подобные излучатели теплоинерционны, поэтому длительность разогрева составляет около 5 мин. Равномерное распределение лучистого потока возможно при установке отражателей.

Для создания равномерного лучистого потока при сушке плоских изделий изготавливают плоские металлические нагреватели-панели, выполняемые закладкой змеевиковых ТЭНов в керамическую (или чугунную) плиту или намоткой нихромовой проволоки диаметром 1.5...3 мм на плоский металлический лист, покрытый слоем асбеста. Затем поверх проволоки вновь укладывают слой асбеста и помещают нагреватель в металлический чехол. Рабочая температура поверхности – около 400 °С. Плоские нагреватели эффективны при установке их между изделиями или ярусами сушильной установки, так как при этом используется вся энергия излучателя от обеих поверхностей излучателя.

В качестве излучателей применяют также коаксиальные нагреватели, изготовленные из двух труб разного диаметра, вставленных друг в друга и последовательно соединенных сваркой. Зазор между трубами устанавливается фиксирующими шайбами, а свободное пространство заполняют электроизолирующим составом. При прохождении тока по внешней и внутренним трубам, подключенным к источникам тока, создается коаксиальный эффект и выделяется большое количество теплоты. Коаксиальные излучатели нагреваются до температуры 300...400 °С. При использовании радиационно-конвективной схемы обогрева изделий создаются условия для равномерной и быстрой сушки материала, так как кроме лучистой теплоты процессы испарения влаги интенсифицируются и конвективными потоками газов.

Сушка с использованием токов высокой частоты основана на эффекте электрических потерь и выделении теплоты в материале-диэлектрике, помещенном между двумя электродными пластинками, по которым проходит переменный электрический ток высокой частоты. Особенностью этого способа прогрева является то, что выделение теплоты происходит равномерно во всем объеме материала. Так как поверхность материала теряет теплоту, то тепловые потоки, направленные из центра к поверхности, способствуют диффузии влаги.

Препятствием к широкому распространению этого способа сушки является его высокая стоимость и сложность в изготовлении и обслуживании оборудования (генераторов высокой частот).

При сушке в индукционных камерах используются вихревые токи, возникающие при прохождении тока по обмотке, выполненной вокруг металлического сердечника. Тоннельная камера, обшитая внутри металлическими листами, покрывается снаружи тепло- и электроизоляцией, а по ее периметру и длине наматывается обмотка из провода расчетного сечения. При прохождении тока внутренней металлической поверхностью камеры нагревается, передавая теплоту материалу; влага удаляется вытяжным вентилятором. Из-за высоких расходов электроэнергии, необходимости устройства конденсаторных станций для улучшения параметров энергоснабжения этот способ широкого распространения не получил.

При сушке **в среде перегретого пара** материал испытывает меньшие деформации, чем при сушке воздухом, так как при этом способе значительно меньшие градиенты влагосодержания и нет необходимости в регулировании влагосодержания сушильного агента (температура мокрого термометра постоянна). Поскольку в среде перегретого пара повышается температура материала, резко интенсифицируется фазовое превращение, что обуславливает качественное изменение механизма переноса влаги внутри и на поверхности материала, длительность сушки сокращается (для древесины в 2,5...4 раза), а производительность сушильных установок повышается. При этом удельные капиталовложения для строительства установок снижаются почти в 2 раза, а эксплуатационные расходы уменьшаются на 35...40 % по сравнению с сушкой воздухом.

Сушку перегретым паром применяют для материалов, в которых кислород воздуха в сочетании с высокой температурой сушки может вызвать химические изменения (окисление). Это важно при сушке легкоокисляющихся, самовозгорающихся и взрывоопасных материалов. Так, торф при сушке воздухом воспламеняется при температуре около 170 °С, а в среде перегретого пара выдерживает до 500 °С.

Сушка методом сброса давления основана на максимальном использовании эффекта интенсивного молярного переноса пара. Материал прогревается в установке при повышенном давлении (0,8...2,5 МПа) за счет подачи пара из магистрали или нагрева пара, выделившегося из материала. При резком снижении давления во всей массе тела происходит бурное парообразование – вскипание влаги. Возникающий при этом градиент давления центр – поверхность позволяет материалу освободиться от влаги, находящейся в виде пара, и от большинства влаги в жид-



кой фазе.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Общие сведения

В технологии силикатов основные свойства материалов и изделий приобретаются в процессе обжига.

Обжиг – это нагрев и выдержка при высокой температуре различных материалов с целью придания им необходимых свойств. Так получают кирпич, керамическую, фарфоровую, фаянсовую посуду, санитарно-технические изделия, заполнители, вяжущие вещества. Обжиг осуществляется в обжиговых печах. При этом в исходном сырье происходят сложные физические, химические и физико-химические изменения, которые сопровождаются *конструктивными* (конструирующими, т. е. создающими новый материал) и *деструктивными* (разрушающими) процессами. Если в обжигаемом изделии преобладают деструктивные процессы, то нарушения структуры практически необратимы.

От правильного ведения обжига зависят расходы топлива, электроэнергии и затраты труда. Суммарные затраты на обжиг составляют 35...40 %, а потери от брака почти 10 % себестоимости товарной продукт и.

Режим обжига включает такие параметры, как температура, время и характер газовой среды. Процесс обжига состоит из следующих периодов: прогрев до температуры обжига, выдержка при этой температуре и охлаждение. Длительность каждого периода определяют отдельно.

Длительность прогрева тем больше, чем выше влажность полуфабриката, поступающего на обжиг. В противном случае вода внутри материала превращается в пар, требующий значительно большего объема и разрушающий стенки пор и капилляров. Особенно опасен участок температур до 250 °С, так как удаление физически связанной и аллофаноидной воды может привести к аналогичным последствиям. При температурах дегидратации глины также может произойти нарушение структуры и даже взрыв черепка. С потерей влаги связана и усадка сырца, которая может привести к появлению трещин в обжигаемом изделии. Скорость нагрева не должна вызывать недопустимых (перепадов) градиентов массопереноса и теплообмена.

При определении возможной длительности периодов нагрева и охлаждения необходимо учитывать внутренние напряжения, возникающие в материале при изменении его температуры. В связи с этим длительность указанных периодов обжига зависит, главным образом, от механических свойств обжигаемого материала, т. е. от его способности выдерживать большие или меньшие внутренние напряжения.

Максимальную температуру и длительное время обжига назначают с учетом требуемых прочности и водопоглощения черепка. Их устанавливают опытным путем.

Характер газовой среды. Для успешного протекания требуемых реакций или упреждения их возникновения в тепловых установках нужна определенная газовая среда. Она может быть *восстановительной* при содержании кислорода до 1 %, *нейтральной*–1,5...2 %, *окислительной*–2...5 % и *сильноокислительной*–до 10 %.

Окислительная среда необходима для окисления всех органических примесей в керамической массе. Восстановительная газовая среда способствует разложению глинистых минералов и карбонатов, повышает активность освободившихся оксидов и создает благоприятные условия для протекания твердофазовых реакций. Она резко интенсифицирует процессы спекания и понижает их начало на 100... 150 °С, В восстановительной среде Fe_2O_3 переходит в FeO. Последний же плавится при температуре на 150...200 °С ниже чем Fe_2O_3 . Восстановительную среду получают от сгорания топлива, запрессованного в изделия, или при вводе водяного пара (воды) в печь на конечной стадии обжига.

Водяной пар вводится в высокотемпературную зону с целью улучшения качества обжигаемого материала, снижения расхода топлива и понижения температуры обжига. Наиболее эффективно действие паров воды при использовании глин с высоким содержанием оксидов железа. Среда водяного пара способствует разложению глинистых минералов и карбонатов, повышению активности освободившихся оксидов и созданию более благоприятных условий для твердофазовых реакций.

Количество расплава, образующегося при одной и той же температуре, зависит от химического состава глинистых материалов и добавок, реакционной способности и дисперсности компонентов массы, качества печной среды и продолжительности нагрева. При малом количестве жидкой фазы низка и механическая прочность изделий, при излишнем – возможна деформация изделия в процессе обжига. Прочность охлажденного расплава

стекловидной фазы достигает 588 МПа.

Химизация (модификация) материала проводится с целью придания конечному продукту специальных или улучшенных физико-механических свойств. Модификация строительных материалов основана на физико-химическом соединении их с активным веществом, которое можно производить в любом периоде процесса обжига.

Дробленые кремнистые опоки смешивают с водным раствором углекислого натрия концентрацией 10...30 %, высушивают и подают в печь. Это позволяет изменить температуру обжига на 100...300 °С и получить оплавленную корку на поверхности обожженного материала. Полученный в результате этого термолит характеризуется более низкой величиной водопоглощения (в 1,5...2,5 раза) и более высокими прочностью и морозостойкостью (в 1,5...2 раза).

Во вращающейся печи при температуре 1200...1400 °С кварцевый песок обжигают с небольшими присадками оксидов щелочных металлов, которые служат минерализаторами для быстрого структурного перерождения кварца в тридимит и кристобалит. Так получают тридиую-кристобалитовое вяжущее для химически стойкого и жаропрочного бетона.

Выходящий из холодильника искусственный пористый заполнитель модифицируют водными эмульсиями (растворами) кремнийорганических соединений. Гидро-4'юбизация улучшает качество заполнителя: снижается в 2...15 раз количество поглощенной влаги; повышается в 1,2...1,5 раза коэффициент размягчения, в 1,4...2,5 – морозостойкость, а также стойкость в агрессивных средах.

Обжиг вяжущих веществ

По происхождению строительные вяжущие вещества бывают *природными* и *искусственными*, а по составу – *минеральными* (цемент, гипс, известь) и *органическими* (битумы, смолы, дегти, клеи). В производстве строительных материалов применяют в основном искусственные минеральные вяжущие вещества. По способности затвердевать в соответствующей среде вяжущие делят на две группы: *воздушные*, т. е. твердеющие на воздухе (известь и гипс), и *гидравлические* -твердеющие на воздухе и в воде (цементы).

Цемент – один из важнейших строительных материалов. Производство его включает приготовление, обжиг сырьевой смеси и размол обожженного продукта в порошок. Самый важный

процесс – обжиг сырьевой смеси. Цель его – удаление механически связанной влаги и протекание химических превращений: дегидратации, кальцинирования и клинкерообразования. Обжиг сопровождается сложными физическими, химическими и физико-химическими процессами, в результате которых образуется клинкер – спекшиеся зерна размером до 3 см. На характер этих процессов и качество клинкера большое влияние оказывает режим работы печи: скорость продвижения материала по печи; температура пылегазового потока; характер газовой среды; длина подготовительных зон и насыщение их теплообменными устройствами; положение зоны спекания в печи и ее длина.

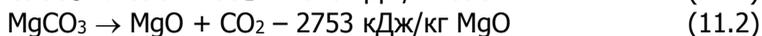
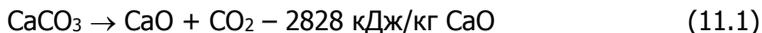
В зависимости от назначения зон температура материала изменяется от 20 до 1450 °С. В *зоне сушки* при нагревании смеси до 100 °С из нее испаряется свободная (химически не связанная) вода. Значительная часть кристаллизационной воды удаляется при 400...700 °С, а ее остатки (2...3 %) - при 900...1000 °С. В *зоне подогрева* температура материала достигает 700...800 °С.

Участок печи, где интенсивно разлагаются карбонаты, т. е. в пределах температур 900... 1100 °С, называется *зоной кальцинирования*. Оптимальная температура спекания определяется свойствами исходного сырья, наличием в нем различных примесей, тонкостью измельчения и однородностью смеси; в этой зоне материал нагревается от 1300 до 1450 °С.

Клинкер охлаждается воздухом и с температурой 1000...1100 °С выходит из печи. Этот участок печи называется *зоной охлаждения*. Режим охлаждения клинкера влияет на качество цемента: быстро охлажденный клинкер легче размалывается, цемент из него дает меньшую усадку и обладает повышенными теплотой гидратации и сульфатостойкостью.

Теоретически на получение 1 кг клинкера из известняка и глины требуется 1676 кДж теплоты. Практически же его расходуется около 5900...6700 кДж. Причина этого в большой (35...42 %) влажности сырьевой смеси (шлама), поступающей на обжиг. При снижении влажности шлама на 1 % расход топлива сокращается на 1...1,5 % и на такую же величину повышается производительность печи.

Известь получают из карбонатных пород CaCO_3 и MgCO_3 . При обжиге они декарбонизируются, диссоциируя с выделением углекислого газа:



Из этих веществ наиболее важно разложение CaCO_3 , что осуществляется при определенной температуре: чем выше температура, тем интенсивнее разложение. Реакции диссоциации CaCO_3 и MgCO_3 обратимы, поэтому необходим интенсивный отвод CO_2 из зоны реакции.

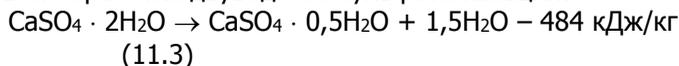
В производственных условиях температура обжига известняка составляет 1000...1200°C и зависит от его плотности, стабильности химического состава, содержания примесей, типа печи и других факторов. Плотные мрамороподобные известняки без примесей обжигаются при 1300 °C и более. Наличие глинистых и магниезальных примесей способствует выделению CO_2 и снижает температуру обжига. Магнезиальное сырье обжигают при 750...1000 °C.

При постоянном режиме обжига куски больших размеров или высокой плотности смеси вызывают *недожог* материала, так как он не успевает декарбонизироваться. Недожог также уменьшает выход теста из кипелки, хотя вредного влияния на качество твердеющей извести не оказывает. Слишком высокая температура ведет к пережогу извести. В результате появляется крупнокристаллический оксид кальция, который медленно гасится и ухудшает качество извести.

Обычно в шахтную печь загружают известняк с размерами кусков 60...200 мм, а топливо – 40...60 мм. При меньших размерах кусков в печах возникает большое сопротивление движению газов и ухудшается тяга. Чем больше куски, тем дольше они должны обжигаться. Поэтому режим обжига назначается по времени обжига кусков средних размеров. Чем однороднее размер кусков известняка и топлива, тем равномернее обжиг, меньше сопротивление печи и выше ее производительность.

Куски известняков с пределом прочности при сжатии 10...50 МПа продуктивнее обжигать в шахтных печах, так как меньшая прочность ведет к истиранию материала при продвижении в шахте, увеличению сопротивления газам и понижению производительности печи.

Гипс – это полуводный сульфат кальция, получаемый при тепловой обработке двухводного сульфата кальция:



Двухводный сульфат кальция начинает дегидратировать уже при нагреве до 50...60 °C. Наиболее интенсивно процесс происходит при 107...115°C, когда упругость паров отщепляю-

щейся воды превышает давление насыщенного пара.

В промышленных условиях гипс варяг в варочных котлах в атмосфере перегретого пара, вращающихся самозапарниках и сушильных барабанах при 170...180 °С, получая в результате *строительный гипс*, в составе которого преобладает β - $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$.

В варочные котлы поступает материал, измельченный до требуемой конечной тонкости помола вяжущего, во вращающиеся печи – зерна 10...35 мм, а в запарочные аппараты – до 400 мм. Выбор аппарата тепловой обработки зависит от свойств исходного сырья, производительности завода и требований к качеству готовой продукции.

Все гипсовые вяжущие вещества делятся на две группы: к первой группе относятся материалы из полуводного гипса, которые обжигаются при низкой температуре и быстро твердеют; ко второй – материалы из безводного гипса (ангидрита), обжигаемые при высоких температурах и медленно твердеющие. К вяжущим из полуводного гипса относятся строительный и формовочный гипс, технический (высокопрочный) и медицинский гипс, к вяжущим из безводного гипса – ангидритовое вяжущее и высокообжиговый гипс.

Обжиг керамических изделий

Керамические изделия готовят из минерального сырья, в основном глинистых пород, которые спекаются при высоких температурах, приобретая камнеподобные свойства. Глинистые породы состоят из глинообразующих минералов (каолинит, монтмориллонит, иллит и др.) и примесей (органических, отошающих, флюсующих), затворяемых водой. Более чувствительны к обжигу монтмориллонитовые глины, содержащие более 20 % Al_2O_3 , менее чувствительны – гидрослюдистые глины (иллит).

При 450...600 °С каолинит теряет воду и переходит в метакаолинит ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), который при 700...800 °С разлагается с выделением аморфных кремнезема и глинозема. Аморфный глинозем сразу же соединяется с оксидом магния и дает шпинель с температурой плавления 2135 °С, которая становится компонентом керамического тела. При температуре выше 900 °С глинозем и кремнезем вновь соединяются, образуя муллит ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) и аморфный SiO_2 . Муллит становится керамическим телом.

Аморфный кремнезем обладает большой реакционной способностью. С флюсующими примесями (плавнями) он дает жидкую фазу – стекловидный силикатный расплав, который цементи-

рует всю систему. Остатки аморфного кремнезема кристаллизуются в кристобалит.

Оксид железа реагирует с органическими примесями и переходит в более реакционноспособную закись железа. Последняя вступает в реакцию с аморфным кремнеземом и образует железистые стекла, также цементирующие систему. Эти реакции идут особенно интенсивно при обжиге в восстановительной среде. Оставшаяся часть оксида железа кристаллизуется в минерал гематит, входящий в состав керамического тела.

В качестве примесей или добавок к глинам используют карбонаты кальция и магния, сернистые и железистые соединения, органические вещества.

Спекание – важнейший процесс при обжиге, при котором формируются свойства керамического черепка. Оно происходит за счет цементирующего действия эвтектоидных расплавов (жидкостное спекание), реакций в твердой фазе и кристаллизации новообразований.

Жидкостное спекание придает керамическим изделиям камнеподобные свойства. При этом около 700 °С образуется жидкая фаза (стекловидный расплав), которая интенсивно развивается с повышением температуры. По мере увеличения количества стекловидного расплава керамическая масса размягчается, не теряя, однако способности сохранять форму, ранее приданную изделию. Это состояние изделия называют пиропластическим.

В период охлаждения, в интервале температур 900... 700 °С, из пиропластического состояния материал переходит в хрупкое. В интервале температур 600...550 °С это сопровождается модификационными превращениями, особенно кристаллического кварца. Быстрое охлаждение в этом интервале приводит к разрыхлению керамического тела и образованию трещин.

Керамические изделия обжигают в кольцевых, тоннельных и других печах.

Процессы вспучивания и спекания

Вспучивание – это увеличение материала в объеме за счет образования и давления газов внутри замкнутых пор. Так получают керамзит из глинистых пород, перлит – из стекловидных водосодержащих пород, вермикулит – из слюды, ячеистое стекло – из искусственных стекол и др.

Глинистое сырье при наличии в нем вязкого силикатного расплава и газообразных продуктов, способных развивать достаточное давление, при быстром нагреве вспучивается. При

нагреве сырья температура должна достигнуть таких значений, при которых оболочка поры размягчается и спекается, что сопровождается ее уплотнением, в результате чего пора становится газонепроницаемой. Оболочка поры находится в пиропластическом состоянии, т.е. способна к пластическим деформациям без разрыва сплошности. Если в этот момент внутри поры начнут выделяться газы, то они не пройдут сквозь уплотненную оболочку. Накапливаясь в поре, газы создают избыточное давление, под действием которого размягченная от высокой температуры оболочка расширяется. Этот процесс и является вспучиванием элементарной ячейки (поры) глиняной гранулы (рис. 11.1).

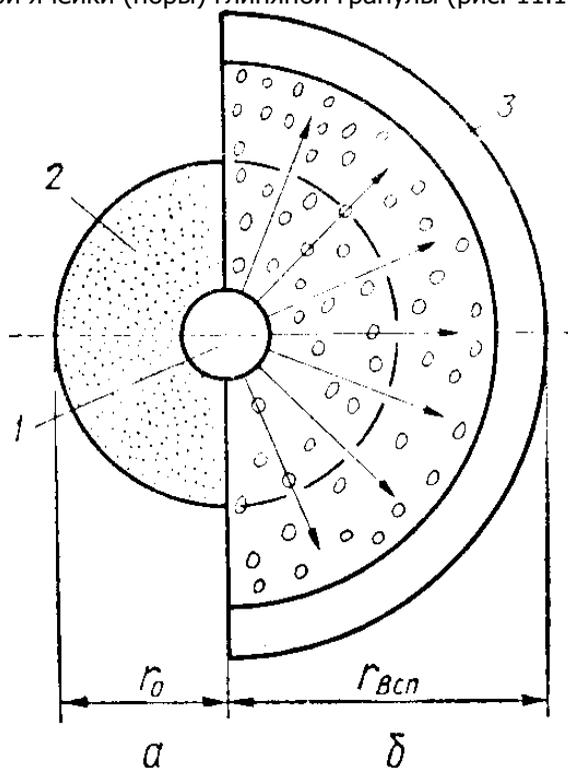


Рис. 11.1. Вспучивание элементарной ячейки глиняной гранулы:

a – гранула до обжига; b – вспученная при обжиге гранула;
 1 – пора; 2 – сухая гранула; 3 – спекающаяся оболочка

Для осуществления процесса вспучивания необходимо, чтобы глина обладала достаточной интенсивностью газовыделения и

была приведена в пиропластическое состояние, а также факторы должны совпадать во времени.

Источниками газовой выделения в глинах являются реакции разложения и восстановления оксидов железа и химически связанная вода глинистых минералов. Карбонаты, встречающиеся в глинах в виде известняка, доломита и сидерита, диссоциируют с выделением CO_2 . Так, при разложении содержащихся в 1 т глинистого сырья 2...4 % карбонатов кальция и магния выделяется 20...60 м³ CO_2 . Разложение сернистых соединений в глине в присутствии углерода сопровождается выделением SO_2 и CO_2 . В процессах вспучивания участвует и воздух, заключенный в замкнутых порах гранул, а также газы от сгорания органических веществ.

Пиропластическое состояние глины определяется количеством жидкой фазы (силикатного расплава). Интенсивность накопления ее зависит от химического состава глины. С увеличением количества кремнезема и глинозема глины становятся более тугоплавкими, удлиняется температурный интервал образования расплава и количество его уменьшается.

Процесс формирования структуры при обжиге керамических материалов развивается в три температурных этапа.

I этап (интервал температур 100...800 °С) – это удаление физически и химически связанной воды, частичное выгорание органических добавок и примесей. За счет этого образуются поры различных размеров от 0,1 до 10 мк.

II этап (800...1050 °С) характеризуется образованием наружной спекшейся оболочки и началом процесса вспучивания. Развиваются твердофазовые реакции и повышается количество жидкой фазы. За счет этого продолжается процесс образования пор, размеры которых становятся более однородными.

III этап (1050...1200 °С) – интенсивно развиваются и завершаются процессы вспучивания, растет количество средних и крупных пор радиусом до 50 мк. Общая пористость вспученного материала достигает 70...90 %.

Процесс вспучивания носит взрывной характер. Разность между температурами начала оплавления гранул и той, при которой насыпная плотность гранул снижается до 0,95 г/см³, – это температурный интервал вспучивания. Так, у длинноплавких глин он составляет 150...200 °С, короткоплавких – 30...50 °С. Чем больше интервал вспучивания, тем лучше условия для порообразования.

Интервал вспучивания увеличивают оксиды железа, алюминия, чугуна, кремнезем в составе глинистых минералов

и в аморфном состоянии, органические примеси и добавки. При вспучивании глин во вращающихся печах интервал вспучивания должен быть не меньше 50 °С. Если невозможно удлинить интервал вспучивания, то во избежание слияния при обжиге гранулы опудривают огнеупорной пиной или молотым песком.

Вспучиваемость глин зависит от многих факторов, основными из которых являются режим нагрева и характер газовой среды. Режим нагрева создает определенную интенсивность генлообмена, т. е. определенный температурный перепад между поверхностью и центром обжигаемого материала, например, гранул.

Характер газовой среды печного пространства и внутри пор материала определяет качество вспучивания. Восстановительная среда понижает температуру вспучивания и повышает вспучиваемость глин. Важно, чтобы такая среда была в порах гранул, достигаемая наличием восстановительных реакций в обжигаемом материале. Для этого модифицируют исходное сырье, вводят в его состав специальные добавки. Так, введение железосодержащих добавок в количестве 5...10 % от массы глины повышает вспучиваемость в 1,5...2 раза.

Спекание – это соединение мелкозернистые и порошкообразных материалов в куски при повышенных температурах. В качестве исходного сырья используют глины, глинистые породы и смеси на их основе. Из пористого конгломерата получают искусственный пористый наполнитель – аглопорит. На агломерационной решетке слой материала (20...30 см) чередуется со слоем топливосодержащего материала, масса которого составляет 6...10% от массы сухой шихты. Сквозь эти слои и решетку интенсивно просасываются продукты горения топлива и воздуха.

Процессы плавления

Плавление – процесс перехода твердого вещества в жидкотекучее состояние (в расплав), сопровождающийся поглощением теплоты.

При постоянном внешнем давлении материал плавится при определенной температуре – температуре плавления, зависящей от природы вещества и давления.

Температура плавления зависит так же от минералогического состава исходного сырья и характера газовой среды. В восстановительной среде температура плавления существенно понижается.

Теплота, затрачиваемая на переход единицы массы ве-

щества из твердого состояния в жидкое при температуре плавления, называется *удельной теплотой плавления*.

Если в составе смеси имеются туго- и легкоплавкие компоненты, то соотношение их должно быть таким, чтобы тугоплавкие компоненты успели расплавиться за время пребывания смеси в плавильной установке. Тугоплавкие компоненты должны иметь более тонкий помол, чем легкоплавкие.

При плавлении кусковых материалов расплав появляется на их поверхности, стекает с нее и обнажает расплавленную поверхность, за счет этого уменьшаются размеры и площадь кусков. При плавлении порошковых сырьевых смесей первые капли расплава появляются при эвтектических температурах на контактах отдельных зерен. Поэтому порошки сначала спекаются (омоноличиваются), приобретая пиропластическое состояние, а затем при дальнейшем нагреве спек переходит в расплав.

Теплообмен при плавлении имеет специфические особенности для каждого типа установок. Общим для всех является зависимость теплообмена от лучепрозрачности расплава. Стекольные расплавы наиболее лучепрозрачны и поэтому излучаемые на поверхность расплава тепловые волны проникают в толщу слоя, осуществляя объемный прогрев. Расплавы горных пород менее лучепрозрачны и воспринимаемый ими тепловой поток концентрируется на поверхности расплава, что предопределяет целесообразность плавления горных пород и шлаков в тонком слое.

При производстве минеральной ваты расплавы получают в вагранках, ваннных и электродуговых печах. Для получения расплава фриттовых глазурей применяют ваннные и вращающиеся печи.

КОНСТРУКЦИИ УСТАНОВОК ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Классификация печей

Печи – это энерготехнологические агрегаты (установки или сооружения), предназначенные для термической обработки исходного сырья с целью придания ему необходимых заданных свойств. Исходное сырье в печах подвергается следующим видам тепловой обработки:

нагреву, сушке, обжигу, спеканию, вспучиванию, плавлению или варке. Основными элементами промышленных печей являются топочные (горелочные) устройства, рабочее пространство (камера), устройства для использования теплоты отходящих газов и продукта, тяговое и дутьевое устройства.

1). В зависимости от устройства рабочей камеры различают следующие основные группы печей:

- *шахтные* (рис. 12.1, а), высота которых больше ширины не менее чем в 4,5 раза; загруженный сверху материал опускается под собственной массой, проходя зоны подогрева, обжига и охлаждения; в зоне охлаждения воздух нагревается и движется навстречу материалу;
- *камерные* (рис. 12.1, б) – рабочее пространство состоит из камеры и материала; блок таких камер образует многокамерные и кольцевые печи (рис. 59, в);
- *вращающиеся* (рис. 12.1, г) – имеют рабочую камеру в виде наклонного вращающегося барабана, внутри которого перемещается и перемешивается материал; навстречу ему движутся газы;
- *тоннельные* (рис. 12.1, д) – это горизонтальный канал большой длины, в котором материал перемещается на вагонетках или конвейером;
- *горшковые, • или тигельные* (рис. 11.2, е) – в рабочей камере расположены сосуды (горшки, тигли);
- *ваннные* (рис. 12.1, ж) – рабочая камера имеет вид ванны (бассейна), в которой плавят исходное сырье.

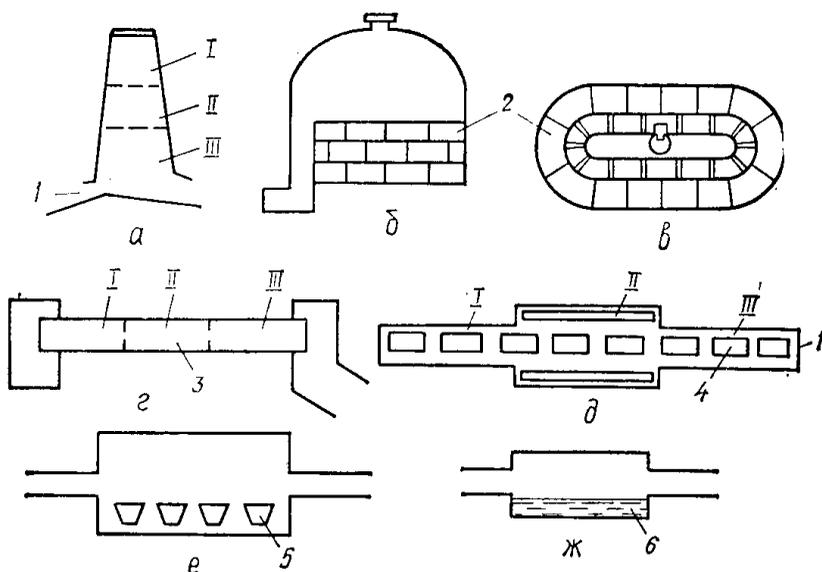


Рис. 12.1. Печи с различным устройством рабочей камеры:
а – шахтная; *б, в* – камерная; *г* – вращающаяся; *д* – тоннельная; *е* – тигельная; *ж* – ванная; I...III – соответственно зоны подогрева, обжига и охлаждения; 1 – выгрузка; 2 – материал; 3 – барабан; 4 – вагонетка; 5 – тигель; 6 – ванна

2). В зависимости от режима работы печи могут быть *периодического* и *непрерывного* действия.

3). По технологическому признаку различают печи для выполнения следующих операций:

- обжига кусковых и порошкообразных материалов (шахтные, вращающиеся);
- обжига керамических изделия (камерные, тоннельные, газокамерные, кольцевые);
- плавления исходного сырья (ванные, горшковые).

4). В зависимости от теплового режима бывают печи с постоянной и переменной тепловой нагрузкой, а также постоянным и переменным температурным режимом. В печах непрерывного действия с непрерывной загрузкой исходного сырья и выгрузкой горячего продува тепловая нагрузка и температурный режим постоянны, а в печах периодического действия – переменны. Кольцевые и многокамерные печи работают с «подвижным огнем», т. е. в них температурная кривая неизменна во времени, но пере-

мещается по длине печи; также изменяется и место, куда вводится топливо.

5). По способу выделения и передачи теплоты классифицируют в зависимости от вида сжигаемого топлива (пылевидного, кускового, жидкого, газообразного) и электрические.

Вращающиеся печи

Для производства цемента мокрым способом применяют вращающиеся печи с внутренними теплообменными устройствами размерами 3,6x150, 4x150, 4,5x150, 5x185 и 7x230 м, а сухим – печи с внешними теплообменными устройствами размером 4x60, 4,5x75 и 6,4x95 м.

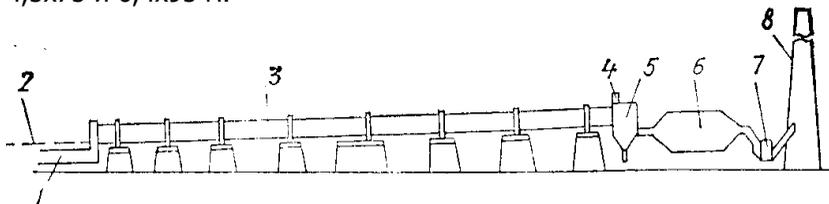


Рис. 12.2. Печной агрегат с вращающейся печью 7 x 230 м:
 1 – холодильник клинкера; 2 – клинкерный конвейер; 3 – вращающаяся печь; 4 – шлампитатель; 5 – пыльная камера; 6 – элоктропофильтр; 7 – дымосос; 8 – дымовая труба

Печи мокрого способа производства цемента (рис. 12.2). Вращающаяся печь состоит из цилиндрического корпуса с бандажами и венцовых шестерней, привода вращения, роликовых опор, встроенных и выносных теплообменников, холодной и горячей головок с уплотнительными устройствами.

Корпус состоит из металлических секции (обечаек), сваренных из листов толщиной 24...50 мм, на которых через прокладки крепятся массивные кольца прямоугольного сечения – бандажи. Их готовят литыми для печей диаметром менее 4 м или сварными из двух половин. Бандажи на подшипниках качения опираются на роликовые опоры. Печь монтируется с уклоном к горизонту 3...4°, а для удержания ее в определенном положении на роликовых опорах монтируется система гидравлических упоров. Роликовые опоры собирают на металлической раме, которая устанавливается на массивном железобетонном фундаменте. Печь приводится во вращение от электродвигателя через редуктор, подвенцовую и венцовую шестерни.

Корпус печи защищен футеровкой из огнеупорного кирпи-

ча. В местах соединения корпуса с пыльной камерой и горячей головкой ставят уплотняющие устройства.

Движение материала и газов в таких печах противоточное. Сырьевая смесь перемещается к нижнему концу печи за счет ее уклона и вращения. Навстречу движется тепловой (газовый) поток. Теплоту газового потока лучеиспусканием и конвекцией воспринимают открытые поверхности футеровки печи и материала. Закрытые поверхности материала получают теплоту путем теплопроводности. Скорость движения материала должна соответствовать необходимой длительности пребывания исходного сырья при оптимальной температуре обжига. Для увеличения продолжительности пребывания обжигаемого материала в печи часть ее расширяют, но это расширение вызывает задержки материала в местах стыков обечаек различных размеров. При этом повышается истирание гранул, и они превращаются в пыль, следовательно, повышается пылеунос.

Тепло- и массообмен в значительной мере определяются степенью развитости поверхности теплопередачи. На участке вращающейся печи, где находится сухой шлам, заполняющий 7...15 % сечения печи, интенсивность нагревания материала снижается. Для повышения теплообмена устанавливают различные теплообменные устройства для увеличения поверхности соприкосновения материала с газовым потоком и интенсифицирования передачи теплоты. Эти устройства различают по конструкции и способу передачи теплоты, основными из которых являются звеньевые и гирляндные, ячейковые металлические и керамические, в виде пересыпающих лопастей, циклоидные и экранирующие.

Цепные завесы навешивают в зоне подогрева и сушки. При вращении печи цепи омываются газовым потоком и аккумулируют теплоту. Погружаясь в сырьевую смесь (шлам) они отдают часть теплоты, улучшая таким образом контакт газового потока со шламом и повышая степень открытой поверхности материала, из которого интенсивнее испаряется влага.

Применяют в основном завесы двух видов: свободно висящие и гирляндные. Свободно висящая навеска цепей используется при обработке шламов с высокой начальной влажностью. Эффективность теплообмена повышается прямо пропорционально плотности навеса печей. Несмотря на простоту конструкции, недостатком таких навесок является их высокое гидравлическое сопротивление, что требует мощных дымососов и ведет к перерасходу электроэнергии. Свободно висящие цепные завесы навешивают, используя способ коридорной системы, в шахматном поряд-

ке на равном расстоянии друг от друга или на продольных полках, несколько смещенных по отношению к оси печи. Более рационален второй вариант, так как при нем интенсифицируется продвижение вязкого шлама вдоль печи.

Направление навески цепей должно соответствовать направлению движения материала, т. е. при вращении печи первыми должны подниматься концы цепей ближние к головке печи. При этом они вытягиваются из материала в направлении его движения и помогают ему перемещаться, а также цепями поднимается часть материала, что способствует более интенсивному перемешиванию шлама.

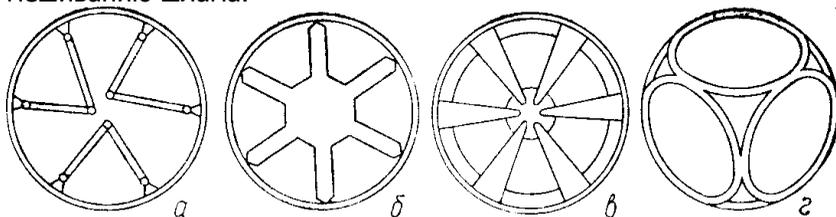


Рис. 12.2. Ячейковые теплообменники:
а, б, в – металлические; г – керамические

Ячейковые теплообменники, т. е. печь разделена на ячейки (рис. 12.2), по которым вдоль полок теплообменника проходит расчлененный поток обжигаемого материала, что уменьшает термическое сопротивление слоя и улучшает перемешивание материала. Полки теплообменников аккумулируют теплоту газового потока и передают ее путем излучения и теплопроводности материалу. Для керамических теплообменников характерно повышенное гидравлическое сопротивление по сравнению с металлическими, связанное со значительным сужением поперечного сечения печи. Металлические теплообменники устанавливаются в той части вращающейся печи, где температура газового потока не превышает 1000 °С.

Недостатками таких теплообменников являются их значительная масса, что может повлечь разрушение корпуса печи и повышенное пылеобразование.

Звеньевые и гирляндные теплообменники – это набор массивных звеньев, сочлененных между собой шарнирами, ячейки теплообменника крепятся к корпусу печи. Точки крепления каждого последующего ряда ветвей смещены на 15° по окружности. Ими перекрывается полное условное сечение печи.

Во время прохода газового потока по печи звенья теплооб-

менника накапливают теплоту, а при погружении в слой материала отдают. Более полно погружается в материал гирляндная конструкция, поэтому она эффективнее в тепловом отношении.

Теплообменники в виде пересыпающих лопастей изготавливают из металла или керамики. К ним относятся также различные типы рифленых футеровок. В момент пересыпки материал находится во взвешенном состоянии и поэтому интенсивность его нагрева максимальна.

Экранирующие теплообменники – это грибовидные башмаки, установленные непосредственно над керамической футеровкой и выполненные из стали или чугуна. В результате повышения поверхности теплоотдачи и изменения теплопроводности поверхностного слоя футеровки количество переданной материалу теплоты повышается на 20...25 %. Основным недостатком является замазывание поверхности теплообменников шламом, вследствие чего резко сокращается их эффективность.

Циклоидный теплообменник – это набор трапециевидных металлических лопастей, изогнутых, но определенному радиусу. Обжигаемый материал скользит по внешней поверхности элементов теплообменника без отрыва, что обеспечивает минимальное пылеобразование.

Теплообменные устройства, встроенные в печь, несколько сокращают удельный расход, топлива на обжиг клинкера, однако в целом проблемы не решают. Поэтому применяют метод предварительного механического обезвоживания шлама в фильтр-прессах до остаточной влажности 18...19 %. Производительность автоматизированных фильтр-прессов 50...60 т/ч клинкера на один агрегат. При этом удельный расход теплоты составлял 3500...4600 кДж/кг клинкера. Отфильтрованный продукт поступает во вращающуюся печь с короткой цепной завесой.

Печи сухого способа производства цемента конструктивно несколько отличаются от печей мокрого способа. Так, в них значительно меньше отношение длины к диаметру, венцовая шестерня монтируется ближе к холодному концу, выше температура отходящих газов.

В печах такого типа для сушки и подогрева сырьевой смеси применяют конвейерные кальцинаторы и циклоидные теплообменники, и которых сырьевая смесь высушивается, подогревается, дегидратируется и частично декарбонизируется. Так как в печь подается только сухое сырье, то используют только запеченные теплообменники, позволяющие утилизировать теплоту отходящих газов. Поэтому удельный расход теплоты на обжиг 1 кг

глинкера составляет 3100 кДж.

Шахтные печи

К шахтным относятся печи, рабочая камера которых имеет форму вертикального полого ствола. Их классифицируют по месту сжигаемого топлива, способам обжига и перемещения обжигаемого материала.

По месту сжигаемого топлива шахтные печи делятся на две группы. К первой группе относятся печи, в которых топливо сгорает в среде материала. Топливо и материал в виде кусков загружают в печь послойно или топливо и материал совместно размалывают, брикетируют и загружают в печь. При этом топливо не должно содержать значительного количества летучих веществ, так как они выделяются в бескислородной зоне при температуре более низкой, чем температура воспламенения и при этом теряется их потенциальная теплота. Воздух для горения топлива подается в печь снизу вентилятором. Газы отсасываются через дымовую трубу, расположенную сверху печи.

Вторая группа печей снабжена различными выносными топками: полного сгорания, полугазовыми или газогенераторными, в которых сжигается любое, в том числе и местное топливо (торф, дрова, сланцы и др.). Часть воздуха подается в топку или газогенератор для горения топлива, а другая часть – в топку для сжигания горючих газов и охлаждения материала. Такие печи работают только на искусственной тяге.

По способу обжига различают следующие шахтные печи: пересыпные, в которых слой обжигаемого материала пересыпан слоями твердого короткопламенного топлива; полугазовые – топливо поступает в зону обжига в виде газообразных продуктов газификации твердого длиннопламенного топлива в выносных топках; на газообразном топливе, оборудованные устройствами для ввода и распределения в шахте природного, искусственного или смешанного газа; на жидком топливе, оборудованные устройствами для ввода, распыления и газификации мазута.

По способу перемещения обжигаемого материала шахтные печи подразделяются на печи гравитационного и принудительного действия

В шахтных печах трудно обеспечить равномерность обжига, которая зависит от равномерности загрузки сырья и выгрузки готового продукта, а также равномерности газов по сечению шахты. Для обеспечения этих параметров используют сырьевые материалы низкой влажности, твердое короткопламенное топливо

(например, антрацит, кокс, тощий уголь), содержащее до 7 % летучих веществ.

При низкой производительности и высоких удельных затратах рабочей силы шахтные печи, однако просты в изготовлении, требуют меньших капитальных вложений при строительстве и удельном расходе топливно-энергетических ресурсов на обжиг. Это обуславливает их применение для производства местных вяжущих из натурального сырья (мергель, сланцевый кокс) близких по составу к вяжущему и содержащему достаточное количество горючего.

Основными конструктивными элементами шахтных печей являются следующие: шахта, загрузочные и выгрузочные механизмы, топливосжигающие и тягодутьевые устройства. Шахта печи состоит из стального кожуха и кладки. Металлический сварной кожух из углеродистой стали имеет толщину 8...10 мм. Пространство между кладкой и кожухом для улучшения теплоизоляции засыпают молотым шамотом или трепелом с толщиной слоя засыпки 50...65 мм. Кладка печи состоит из наружной теплоизоляции и слоев футеровки, выполняемой из материалов высокой огнеупорности, термостойкости, малой пористости и достаточной прочности. Качество футеровки влияет на технико-экономические показатели процесса обжига, т. е. чем качественнее футеровка, тем выше температура обжига, длительное время эксплуатации печи, а, следовательно, выше производительность печи и ниже затраты на выпуск единицы продукции. Толщина футеровки в зонах подогрева и охлаждения составляет 210...230 мм, обжига – 345...460 мм.

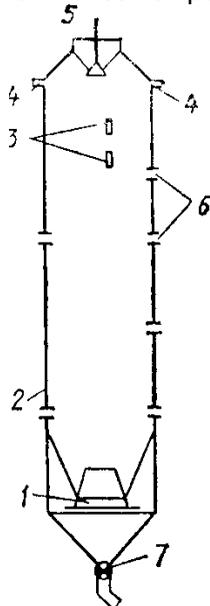
Загрузочное и выгрузочное устройства должны обеспечивать герметичность верха и низа шахты и предупреждать прорыв из печи подаваемого под давлением воздуха. При помощи загрузочного устройства материал равномерно распределяют по поперечному сечению шахты, а также оно предотвращает расслоение сырья по крупности зерен.

Шахта имеет вид полого цилиндра или двух усеченных конусов с совмещенными основаниями. Так как круглое сечение имеет меньшую поверхность и потому минимальны потери теплоты в окружающую среду. В печах полугазовых, на газообразном и жидком топливе применяют эллипсоидное и прямоугольное сечения шахты. Такие сечения позволяют улучшить условия равномерного распределения газообразного топлива в слое обжигаемого материала.

Часть общей высоты печи, соответствующая среднему нор-

мальному уровню засыпки в нее материала, называется рабочей высотой шахты. Она составляет 18...20 м и влияет на удельный расход топлива и качество продукции. Диаметр шахты достигает 6 м.

Рис. 12.3. Схема шахтной пересыпной печи:



1 – Выгрузочный механизм. 2 – корпус печи; 3 – отверстия для датчиков уровня шихты; 4 – патрубки для отвода газов (воздуха), 5 – загрузочное устройство 6 – гляделки, 7 – барабанный затвор

Пересыпные шахтные печи (рис. 12.3) применяют в основном для производства извести. Эти печи не имеют отдельного топочного устройства, поэтому обжигаемый материал загружают в них вместе с твердым топливом послойно или в смеси. В пересыпных печах применяют топливо только с малым содержанием летучих компонентов, дающим при горении короткое пламя. Топливо опускается вниз по шахте вместе с материалом и постепенно нагревается. В зону подогрева подают воздух из зоны обжига, где большая часть его уже израсходована. Поэтому из-за низкой температуры и недостатка воздуха горючие вещества в зоне подогрева не сгорают, а уносятся вместе с отходящими газами в дымовую трубу.

Производительность пересыпных шахтных печей 50...400 т в сутки и зависит от размера печи, вида обжигаемого материала и топлива, условий дутья и тяги.

Расход условного топлива 13...18 % от массы извести. Такие печи отличаются простотой конструкции, высокой удельной производительностью и малым расходом топлива по сравнению с шахтными печами иных конструкций. Недостатком является то, что обжигаемый материал за- грязняется золой топлива.

Шахтные печи с полугазовыми топками представляют собой шахту круглого, овального или прямоугольного сечения высотой 12...22 м. Симметрично относительно шахты располагаются 2...4 топки. Более распространены шахтные полугазовые топки с наклонными (под углом 40...50°) или ступенчатыми колосниками, нижняя часть которых оборудована горизонтальной колосниковой решеткой. Горючие элементы полугаза догорают в шахте при температуре 1300 °С. Для равномерного обжига материала по поперечному сечению печи к стенкам загружают мелкий материал, а к центру – крупный.

Шахтные печи гравитационного типа работают по принципу противотока. Столб материала в шахте – постоянный. Так как непрерывно подпитывается сверху загрузкой исходного сырья за счет выгрузки готового продукта, и движется сверху вниз под действием силы тяжести Газовый поток движется снизу-вверх, проходя через межзерновые пустоты или сквозь толщу материала, т. е. движется по фильтрационному режиму.

Такие шахты имеют три технологические зоны: подогрев, обжига и охлаждения. Через зону подогрева (верхняя часть печи) проходит газовый поток с продуктами горения из зоны обжига. Загружаемый материал подогревается, а газы, охлаждаясь, удаляются из печи. В зоне обжига (средняя часть печи) осуществляется горение топлива и достигается конечная температура обжига. В зону охлаждения (нижняя часть печи) подается атмосферный воздух, который перемещается вверх, охлаждая движущийся навстречу горячий материал и, в свою очередь, нагреваясь при этом. Затем, уже нагретым, воздух уходит в зону обжига и участвует в горении топлива. В результате повышается тепловая экономичность печи.

Общими тенденциями в работе шахтных печей гравитационного типа являются следующие: переход к обжигу материала мелких фракций, увеличение скоростей газов, повышение давления дутья, что сокращает длительность обжига и способствует снижению высоты и диаметра шахт. При этом повышается равномерность загрузки и выгрузки, а также распределение газов по сечению печи, что облегчает и удешевляет постройку шахтной печи. Такие печи применяют для обжига цементного клинкера, извести, глины, перлита и других подобных материалов.

Шахтные печи с принудительным перемещением материала подразделяются на печи, в которых материал находится во взвешенном состоянии, с падающим слоем или кипящим (рис. 12.4).

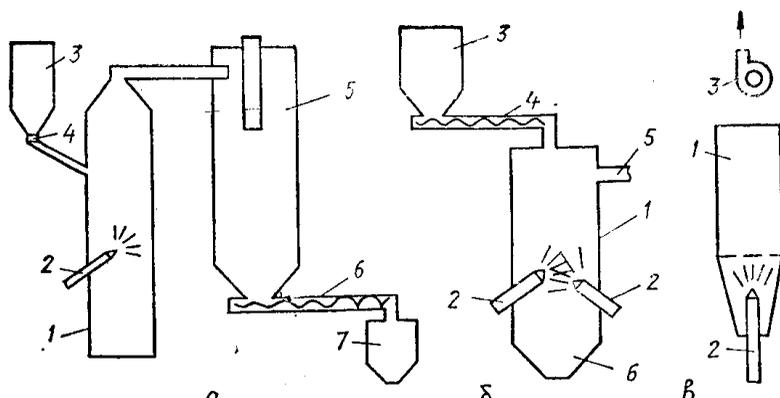


Рис. 12.4. Схемы шахтных печей с принудительным перемещением материала:

а – печь с обжигом материала во взвешенном состоянии 1 – шахта; 2 – топливосжигающее устройство; 3 – расходный бункер сырьевого порошка; 4 – питатель; 5 – винтовой конвейер; 6 – газоочистительное устройство; 7 – бункер обожженного порошка);

б – печь с падающим слоем 1 – шахта; 2 – топливосжигающие устройства; 3 – расходный бункер сырьевого порошка; 4 – питатель; 5 – сборник обожженного материала; б – отвод отходящих газов);

в – печь с кипящим слоем материала 1 – шахта; 2 – топливосжигающее устройство; 3 – воздуходувка

Шахтные печи при обработке зернистых материалов, находящихся во *взвешенном состоянии*, работают по принципу прямотока. Загружаемый материал подхватывается потоком раскаленных продуктов горения, нагревается им и обжигается. При этом скорость газового потока превышает скорость витания частиц (зерен) обжигаемого материала, т. е. кинетическая энергия газового потока, действующего на частицу, превышает ее силу тяжести.

Зернистые материалы обжигают также в печах с *падающим слоем*, которые работают по принципу противотока. Здесь перемещение материала сверху вниз притормаживается газовым потоком, движущимся снизу-вверх. Скорость газового потока и его кинетическая энергия несколько ниже скорости витания частиц материала, что позволяет увеличить длительность нахождения материала в данной зоне и улучшить теплообмен между ним и газовым потоком.

В *печах кипящего слоя* (рис. 12.5) через слой сыпучего материала, находящегося на решетке, пропускают восходящий поток газа. Скорость газов такова, что под действием кинетической энергии газового потока частицы материала начинают совершать различные движения (колебательные, вращательные, поступательные). При этом скорость газового потока достаточна, чтобы оторвать частицы материала друг от друга, но мала для удержания их в потоке и вынесения за пределы слоя. Такое состояние воспринимается как *состояние кипения*, а слой называется *кипящим*. Материал в результате становится текучим (псевдоожженным) и подчиняется законам гидравлики. Материал с размером зерен до 15 мм обжигают пофракционно, что способствует резкому увеличению поверхности соприкосновения материала с газом и высокому теплообмену между ними. Постоянное перемешивание зерен материала газовым потоком содействует выравниванию температур по всему слою. В связи с этим, температура газов, как правило, близка к температуре разложения материала, тогда как в других типах печей она на 200...300 °C выше.

Печи кипящего слоя применяют для производства извести, дегидратированной глины, заполнителей.

Известняк через патрубок 9 загружается в верхнюю камеру 8 печи, где сжигается газами с температурой 600...650 °C (I зона термоподготовки). Высушенный и подогретый известняк по переточному устройству 12 поступает в камеру 7, где поддерживается температура 700...750 °C (II зона термоподготовки). Здесь известняк частично декарбонизируется (разлагается $MgCO_3$), после чего по перетоку 5 поступает в камеру 3 (зону обжига) с температурой 900...950 °C. Из зоны обжига известь по внешнему переточному устройству 17 выводится в холодильник 2 кипящего слоя. В холодильнике воздух нагревается за счет физической теплоты извести и поступает в смесители газогорелочного устройства. Из холодильника известь по перетоку 1 попадает на пластинчатый конвейер 19. Выходящий из зоны обжига запыленный газовый поток проходит очистку в циклоне 14, а затем через газораспределительную решетку 13 поступает в камеру 7. Осажденные в циклоне частицы извести шнеком 18 периодически подаются на конвейер 19. Выходящие из камеры 8 газы с пылевидными фракциями известняка по патрубку 10 направляются в пылеулавливающую установку, состоящую из циклонов и водяного скруббера.

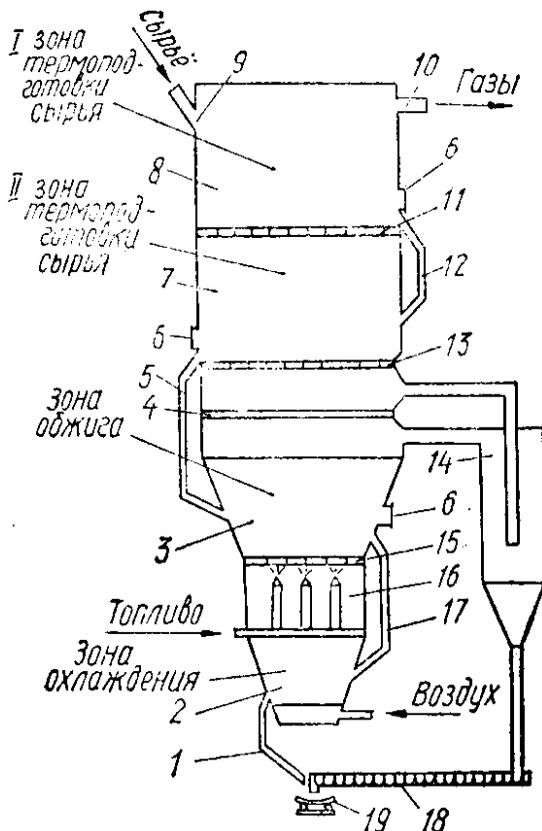


Рис. 12.5. Шахтная печь кипящего слоя:

1, 5, 12, 17 – внешние переточные устройства; 2 – холодильник; 3, 7, 8 – камеры; 4 – сплошная перегородка; 6 – люк; 9 – загрузочный патрубок; 10 – патрубок отвода газов; 11, 13, 15 – газораспределительные решетки; 14 – циклон; 16 – газогорелочное устройство; 18 – шнек; 19 – конвейер

С увеличением размера обрабатываемых гранул производительность печей повышается, так как возрастают критическая скорость псевдооживления и, следовательно, количество газов, подаваемых в печь. У печей кипящего слоя высокая интенсивность теплообмена, а значит и высокая удельная производительность. Расход условного топлива на обжиг 1 т воздушной извести активностью 85 % составляет около 175 кг. Такие печи имеют большую единичную мощность. Технологический процесс можно полностью автоматизировать. Время обжига в кипящем слое

10...15 мин.

К недостаткам печей кипящего слоя относят значительный (до 30 %) пылеунос мелких фракций материала, возможность обжига малых фракций известняка (0,3...2,5; 2,6...10; 3...12 мм), что усложняет технологию подготовки сырья и систему газоочистки, а также при изготовлении нижних решеток используют только жаропрочные материалы.

Агломерационные машины

Аглопоритовый щебень и гравий готовят на агломерационных машинах периодического (агломерационные чаши) и непрерывного (карусельные и ленточные) действия.

Агломерационные чаши изготавливаются съемными и стационарными (опрокидывающимися). Они состоят из собственно чаш, вакуум-камер, газоходов, эксгаустера с циклонами и зажигательного устройства. Производительность составляет около 0,2 м³/ч аглопорита с 1 м² решетки. Расход воздуха на 1 м² площади спекания 0,5...1,1 м³/ч. Эти установки малопроизводительны, трудоемки в обслуживании, имеют неудовлетворительные условия труда, поэтому рекомендуется применять их на заводах мощностью не более 20...25 тыс. м³ аглопорита в год.

Кarusельная агломерационная машина представляет собой поворотный стол из 8-и агломерационных чаш, которые гидроприводом перемещаются по окружности с частотой вращения 1,25 об/ч. Чаши заполняются шихтой, подаваемой ленточным питателем. Поверхность шихты разравнивают скребком при повороте стола на 1/3 окружности. Затем чаша перемещается под зажигательный горн, снабженный газовой горелкой. На последующих трех позициях шихта спекается в течение 35...45 мин. После охлаждения чаши спек выгружается на пластинчатый конвейер путем поворота чаши вокруг своей оси.

По сравнению с чашами периодического действия машины карусельного типа имеют более высокий (до 75 %) коэффициент использования колосниковой решетки. Однако они малопроизводительны, конструкция сложна и потому их можно применять на заводах при годовом выпуске аглопорита не более 30 тыс. м³.

Ленточные агломерационные машины (СМ-961, СМ-417) – это горизонтальный конвейер, днище которого состоит из отдельных тележек (палет) с балочными колосниками (рис. 12.6).

Количество палет 82...176, длина машины 30,79...48,67 м, ширина решетки 1,5 м, скорость движения конвейера 0,3... 1,7 м/мин, высота спекаемого слоя 250 мм.

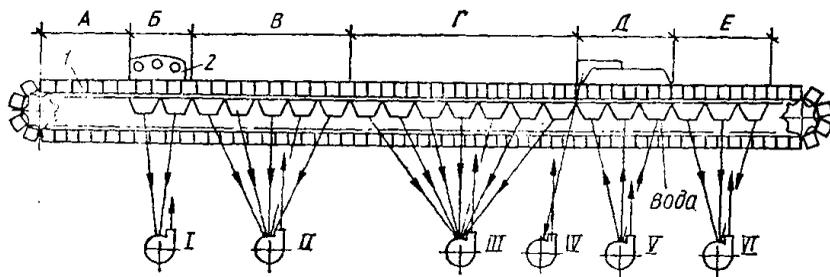


Рис. 12.6. Схема ленточной агломерационной машины: технологические зоны: А – загрузки; Б – воспламенения; В, Г – агломерации; Д – доводки; Е – охлаждения; I...IV, VI – дымососы; V – вентилятор; 1 – палеты; 2 – горн

Конвейер по длине условно делится на несколько участков. На первом участке укладывают подстилающий слой «возврат» (недожог) толщиной 20...30 мм. На него загружают шихту и разравнивают ее специальным скребком. На низ решетки укладывают более- крупные гранулы, а на верх – мелкие, что обеспечивает равномерное горение топлива по высоте шихты. Второй участок (длиной 4...6 м) предназначен для зажигания топлива в верхнем слое шихты (зоне зажигания). Топливо зажигается в горне, оборудованном тремя топками циклонного типа с газовыми или мазутными горелками. Рабочая температура горна 1100...1200 °С. Следующие два участка – зоны спекания (агломерации), и доводки. В зоне доводки воздух подается снизу-вверх, т. е. в обратном направлении, что выравнивает температуру над колосниками и устраняет опасность образования в этих местах недожога. Длина зоны охлаждения спека около 6 м.

Вакуум-камеры всех зон соединены с дымососами. Движение газов нисходящее. При восходящем (дутьевом) способе движения газов скорость спекания более чем в 2 раза превышает скорость в машинах вакуумного типа. Этот способ целесообразно применять при агломерации тонкодисперсного сырья или плохо поддающегося грануляции (например, глинистые материалы).

Машина комплектуется из отдельных секций. Длина одной секции 6 м, площадь – 9 м². В зависимости от количества секций площадь спекания составляет 33...60 м². Производительность машины 50...200 тыс. м³ в год, однако она может быть увеличена, если процесс агломерации проводить при более высоком (в 1,5...2 раза) разрежении. При этом общая продолжительность процесса

агломерации снижается от 35...45 до 30 мин.

Модернизированный вариант машины СМ-961, имеющий марку СМС-117, дополнительно укомплектован роликовым питателем, укладчиками сырых гранул, конвейерами для отбора, отсева, просыпи и механизмом чистки колосников. Зона доводки отсутствует. Эта машина предназначена для обжига аглопоритового гравия с частичным омоноличиванием коржа (15...20 % гранул). Производительность машины 14 м³/ч.

Печи для обжига керамических изделий

На предприятиях строительной индустрии керамические изделия обжигаются в печах периодического и непрерывного действия. Печи периодического действия могут быть напольными, т. е. состоящими из стен без свода, и камерными – перекрытыми сводом. В таких печах в одном и том же объеме последовательно осуществляется весь цикл обжига, включая загрузку исходного сырья и выгрузку готового продукта.

В настоящее время керамические изделия обжигают только в печах непрерывного действия: кольцевых, тоннельных (обычных и щелевых).

Кольцевые печи (рис. 12.7) состоят из замкнутого канала овальной формы с полусферическим сводом. Размеры печи, м: длина 50...20; ширина 1,7...5; высота 1,95...2,6; объем канала 160...170 м³. Внутри канала футеруют огнеупорным кирпичом. Свод двойной: первый – несущий – из красного кирпича с воздушной прослойкой толщиной 5...6 см; второй – огневой – из огнеупорного кирпича.

Печной канал 1 условно (без перегородок) разделен на 12...36 камер. Каждая камера имеет входной проем – ходок 2 размером 1,2х1,3 м. Через ходки в печь загружают сырец (стрелка А) и выгружают обожженные изделия (стрелка Б). Во внутренней стене печи расположен дымовой канал 3 с отверстиями 4 (фуксами), соединяющими дымовой канал с дымососом 11. Обжиговой канал соединяется с дымовым отверстием (очелком) 5, расположенным во внутренней стене печи. Дымовые очелки снабжены подъемными коническими клапанами (дымовыми конусами) 6, через которые дымовой канал подключается к обжиговому или отключается от него. Часть обжигательного канала между двумя поперечными рядами топливных трубок называют *подсадкой*. Над дымовым расположен жаровой канал 7, который может быть подключен к обжиговому с помощью жаровых очелков 8 и конических подъемных клапанов 9 – жаровых конусов. Жаровой

канал предназначен для подвода воздуха, охлаждающего обожженные изделия.

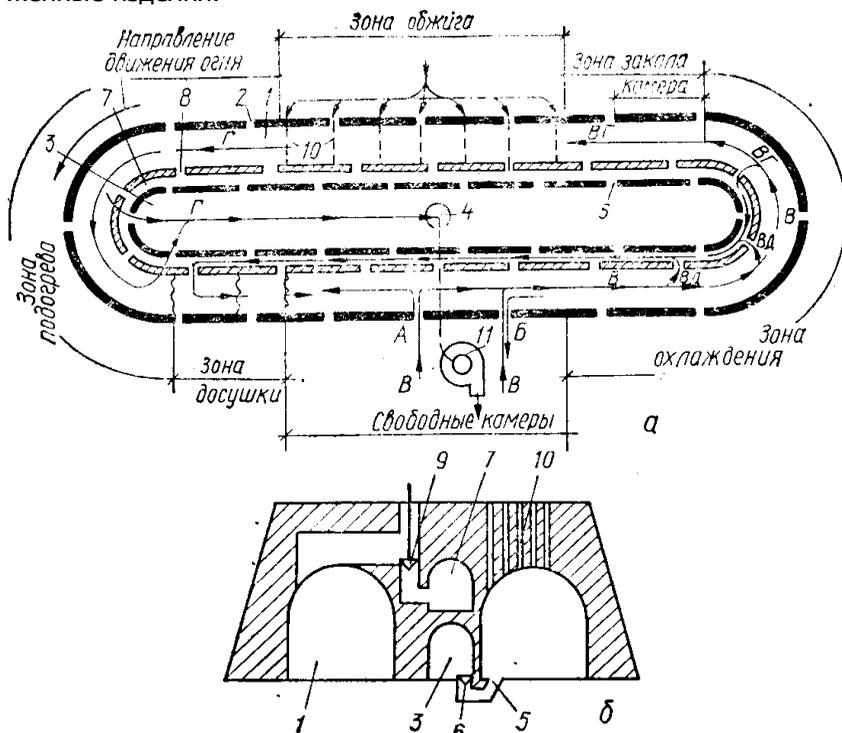


Рис. 12.7. Схема работы (а) и поперечный разрез (б) кольцевой печи:

1 – печной канал; 2 – ходок; 3 – дымовой канал; 4 – фуксы; 5 – дымовые очелки; 6 – дымовые конусы; 7 – жаровой канал; 8 – жаровые очелки; 9 – жаровой конус; 10 – люфты; 11 – дымосос

В кольцевых печах используется любой вид топлива – твердое, газообразное или жидкое. Твердое топливо загружают сверху (стрелка Т) через специальные топливные трубочки (люфты) 10 диаметром 150...200 мм. В зависимости от размеров печного канала бывает 3...6 рядов топливных трубочек по ширине и до 6-и рядов по длине камеры.

Газ к горелкам печи подают под давлением 11...20 кПа по различным схемам: комбинированно (снизу и сверху, с боков и сверху), только сверху или только снизу. Работа на газообразном топливе сокращает продолжительность обжига на 15...20%, а расход условно топлива не менее чем на 25 %, также при этом

снижается стоимость изделий на 17...20%, появляется возможность автоматизировать процесс обжига и улучшить условия труда.

Жидкое топливо (мазут) подают к печи по нефтепроводу подогретым до 80...90 °С и очищенным от примесей. Форсунки монтируют в крышки топливных трубочек и по мере продвижения огня новые трубочки вступают в работу.

В процессе работы печи весь обжиговой канал (за исключением 2...3 камер) заполнен обжигаемым материалом. Через 2...3 свободные камеры непрерывно загружают сырец и выгружают обожженные изделия. В этих камерах ходки открыты, а в остальных они заложены временными кирпичными стенками или закрыты специальными щитами. Управление процессом обжига сводится к регулированию подачи топлива в печь, изменению положения дымовых и жаровых клапанов и поддержанию стабильности постоянного режима.

Для кольцевых печей характерна неравномерность обжига, особенно по высоте обжигового канала. Причина этого в подсосах холодного воздуха и температурном расслоении горизонтально движущихся газовых потоков. Во избежание этого рекомендуется в сырец запрессовывать до 80 % топлива от его общего расхода па обжиг. Тогда сырец превращается в многозольный горючий брикет и в зоне взвара горит вся садка. Загружают и выгружают кирпич электрокарами, используя поддоны или пакеты.

Тоннельные печи (рис. 12.8) представляют собой рабочий тоннель (канал) 1, по которому с заданным ритмом перемещаются навстречу печным газам вагонетки 2 или платформы с изделиями 3. Тепловые зоны в печи размещены стабильно, а обрабатываемый материал перемещается относительно их.

Тоннель длиной 48... 160, шириной 1,4...4,5 и высотой 1,5...2,5 м монтируется из обычного кирпича или сборных железобетонных конструкций. В зоне высоких температур он футеруется шамотным кирпичом

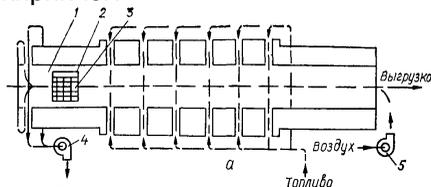


Рис. 12.8. Схема работы тоннельной печи:

1 – рабочий тоннель; 2 – вагонетка; 3 – изделия; 4 – дымосос; 5 – вентилятор

Тоннель оборудован сетью газо- и воздухопроводов различных сечений. В начале и конце печи имеются входные и выходные камеры на длину одной вагонетки, изолирующие рабочее пространство печи в момент заталкивания и выталкивания вагонеток из нее. Это также способствует поддержанию устойчивого режима газовых потоков в рабочем канале печи. Вагонетку с сырцом подают к загрузочному торцу и заталкивают в печь толкателем непрерывного или периодического действия. При этом в тоннеле перемещается весь поезд на длину одной вагонетки. Одновременно, с противоположного конца печи, выталкивается вагонетка с охлажденными изделиями. Дымовые газы перемещаются навстречу движению изделий.

Тоннельные печи классифицируют, учитывая различные параметры: форма тоннеля (прямолинейная, кольцевая, щелевая, многоканальная); способ перемещения материала в тоннеле (вагонеточные, ленточные, роликовые, печи со скользящими подкладками, с шагающим и вращающимся подом); способ теплообмена (открытого огня и муфельные); источник теплоснабжения (пламенные и электрические печи). Размещают тоннельные печи как внутри здания, так и вне его.

В качестве топлива используют газ, мазут и уголь. Продуктивными являются газомазутные форсунки, работающие на обоих видах топлива, а также через них можно подавать пар для создания восстановительной среды. Твердое топливо загружают через топливные трубки, смонтированные в перекрытии камеры. Однако это создает трудности с золоудалением, поэтому лучше использовать уголь в виде пыли или применять другой вид топлива. Для экономии топлива, независимо от его вида, рекомендуется запрессовка угля или углесодержащих отходов в сырец.

Тоннельные печи имеют три зоны: подготовки (подогрева), обжига (взвара) и охлаждения. Продолжительность тепловой обработки изделий стеновой керамики составляет 18...48 ч.

К садке кирпича предъявляются еще более высокие требования, чем к садке в кольцевых печах. Она должна быть прочной и устойчивой, исключаяющей возможность завалов в печи, достаточно плотной и в то же время равномерно проницаемой для печных газов как по длине, так и по ширине. Садка сырца прямая, плотность ее 200...280 шт. на 1 м³ объема канала печи. Вместимость печи 45...175 тыс. шт. условного кирпича. Для равномерного прогрева всего сырца, избежания перепада температур в садке (более 20...30 °С), а также в целях подвода во внутреннюю часть достаточного количества воздуха для полного сгорания запрессо-

ванного в сырец топлива в садке устраивают поперечные и продольные каналы, а верх садки несколько уплотняют. Живое сечение садки 20...38 %.

Аэродинамика, т. е. движение газов и воздуха тоннельных печей, разнообразна. Самой простой является схема с одним дымососом (см. рис. 12.8). В конец зоны охлаждения воздух нагнетается вентилятором 5. Затем перемещаясь, он омывает обожженные изделия, охлаждает их и сам нагревается. Уже горячий воздух поступает в зону обжига, где используется для горения топлива. Отработанные газы удаляются в атмосферу дымососом 4.

Недостатки тоннельных печей – это длительность цикла обжига, сложность отопительно-вентиляционной системы и садочных автоматов. По сравнению с другими печами керамической промышленности тоннельные более экономичны по расходу топлива (160... 180 кг на 1000 шт.) и потребности в рабочей силе, в них возможна полная автоматизация процесса обжига, высокий съем кирпича с 1 м³ печного канала (3000...7000 шт. в месяц).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кокшарев В.Н., Кучеренко А. А. Тепловые установки. - К.: Вища шк., 1990. - 335 с.
2. Почапский Н.Ф. и др. Расчет и конструирование тепловых установок. К., 1980. - 188 с.
3. Тихомиров Н.В., Сергеенко Э.С. Теплотехника, теплогазоснабжение и вентиляция. - М.: Стройиздат, 1991. – 480 с.
4. Справочник по технологии сборного железобетона /Под ред. Б.В.Стефанова. - К. : Вища шк., 1978. - 256 с.
5. Кучеренко А. А. Тепловые установки заводов сборного железобетона. К.: Вища шк., 1977. - 277 с.
6. Справочник по производству сборных железобетонных изделий /Под ред. К. В. Михайлова, А.А.Фоломеева. - М.: Стройиздат, 1982. - 440 с.