

В. В. Перегудов

ТЕПЛОТЕХНИКА И ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

ПОД РЕДАКЦИЕЙ КАНД. ТЕХН. НАУК
Н. Ф. ЕРЕМИНА

Допущено

Управлением кадров и учебных заведений

*Мосгорисполкома в качестве учебника для техникумов
по специальности «Производство строительных деталей
и железобетонных конструкций»*



МОСКВА
СТРОЙИЗДАТ
1990

ББК 31.3

П 27

УДК 536.24+666.04 (075.32)

Рецензенты: Г. Л. Собко (политехникум
им. В. И. Ленина),
канд. техн. наук Г. А. Объщенко (ВНИИжелезобетон).
Редактор — З. П. Злобина

Перегудов В. В.

П 27 Теплотехника и теплотехническое оборудование:
Учеб. для техникумов/Под ред. Н. Ф. Еремина. —
М.: Стройиздат, 1990. — 336 с.: ил.
ISBN 5-274-00940-9

Изложены основы технической термодинамики, аэро- и гидродинамика тепловых установок, тепло- и массообменные процессы в материалах. Тепловая обработка материалов рассмотрена с позиций работы технологического комплекса, включающего материал, тепловую установку и систему автоматического регулирования.

Для учащихся техникумов, обучающихся по специальности «Производство строительных деталей и железобетонных конструкций».

П 3306000000—402
047(01)—90 129—90

ББК 31.3

Учебное издание

ПЕРЕГУДОВ ВЛАДИМИР ВАСИЛЬЕВИЧ
ТЕПЛОТЕХНИКА И ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОЕ
ОБОРУДОВАНИЕ

Редактор **З. П. Злобина**
Технические редакторы **Т. В. Кузнецова, Л. Ю. Калева**
Корректор **Е. А. Степанова**
ИБ № 4640

Сдано в набор 13.06.89. Подписано в печать 29.01.90. Т-05240. Формат 84×108^{1/32}.
Бумага тип. № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 17,64.
Усл. кр.-отт. 17,64. Уч.-изд. л. 17,75. Тираж 18 000 экз. Изд. № А. III-2506.
Заказ № 512. Цена 85 коп.

Стройиздат, 101442, Москва, Каляевская, 23а
Набрано и сматрицировано в Московской типографии № 13 ПО «Периодика»
Государственного комитета по печати, 107005, Москва, Денисовский пер., д. 30.
Отпечатано с матриц во Владимирской типографии Госкомитета СССР по
печати, 600000, г. Владимир, Октябрьский проспект, д. 7.

ISBN 5-274-00940-9

© Стройиздат, 1990

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящий учебник написан в соответствии с утвержденной программой курса «Теплотехника и теплотехническое оборудование» и предназначен для учащихся техникумов по специальности «Производство строительных деталей и железобетонных конструкций».

Программа и построение курса ориентируют учащихся на самостоятельность при проработке представленного в книге материала.

При выборе способа изложения автор стремился к тому, чтобы как можно полнее и доступнее рассмотреть сложные физические процессы, происходящие в тепловых установках.

Большое место в книге отведено теоретическим вопросам: первому и второму законам термодинамики, процессам парообразования, тепло- и массообмена и др., причем процессы парообразования и изменения состояния газа объяснены доступным для усвоения графическим методом с использованием Ts -, is -, Id - диаграмм.

Тепло- и массообменные процессы при сушке материалов и изделий изложены с позиции технологического комплекса, состоящего из тепловой установки, материала и системы автоматического регулирования. Работа технологического комплекса предусматривает создание физической модели и математическое описание теплотехнических процессов, на основе которых составляются программы для управляющих ЭВМ.

Учитывая возможные трудности в понимании сложных термодинамических процессов, происходящих в тепловых установках, в учебнике представлены не конструкции, а принципиальные схемы конструкций тепловых установок и показаны пути их совершенствования. При описании пропарочных камер даны направления конструктивного совершенствования стен, пола, крышек, систем снабжения паром, позволяющие не только снизить удельный расход пара, но и наметить пути дальнейшего совершенствования этих камер с целью создания гибких управляемых систем тепловой обработки.

Достаточно просто изложены причины возникновения и развития напряженного состояния в материалах и изделиях при их тепловой обработке. Известно, что напряженное состояние, возникающее в материалах и изделиях, не только определяет режим тепловой обработки, но и во многом влияет на качество готовой продукции. Напряженное состояние, в свою очередь, является следствием создаваемых при тепловой обработке условий тепло- и массообмена. Поэтому изучению этих процессов уделено большое внимание.

В целях закрепления знаний в конце каждой главы даны вопросы для самостоятельной работы. Последовательность вопросов соответствует последовательности изложения учебного материала. Смысл этих вопросов заключается в том, чтобы научить учащихся главному — умению самостоятельно решать вопросы технологии. Такой принцип проверки знаний, по нашему мнению, способствует улучшению подготовки специалистов и развивает их творческое мышление.

Автор выражает глубокую благодарность рецензентам: Г. Л. Собко и канд. техн. наук Г. А. Обьещенко за замечания, сделанные при рецензировании рукописи.

РАЗДЕЛ 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕПЛОТЕХНИКИ

Теплотехника — научная дисциплина, изучающая методы получения, преобразования, передачи и использования теплоты. Теплотехника является также отраслью техники, охватывающей конструирование, производство и эксплуатацию теплового оборудования. В теплотехнике существуют два направления использования теплоты: энергетическое и технологическое. *Энергетическое* предусматривает использование теплоты для преобразования ее в механическую работу, *технологическое* предполагает использование теплоты с целью изменения свойств различных тел.

В технологии строительных изделий теплота применяется для сушки, обжига, плавки, тепловлажностной обработки и других процессов с целью придания материалу новых механических, физических и химических свойств.

Науку, изучающую законы теплового равновесия и превращения теплоты в другие виды энергии и обратно, называют *термодинамикой*. Основу термодинамики составляют два принципа термодинамики. Первый, в приложении к тепловым явлениям, рассматривает закон сохранения и превращения энергии, второй устанавливает особенности превращения теплоты в работу.

Термодинамику подразделяют: на *общую*, *химическую*, *техническую*. Общая или, как ее называют, физическая термодинамика рассматривает общие закономерности превращения различных видов энергии в физических явлениях. Химическая термодинамика изучает закономерности применительно к физико-химическим превращениям, техническая — закономерности превращения тепловой и механической энергии в тепловых установках.

В соответствии с программой курса в учебнике излагаются только основы технической термодинамики.

ГЛАВА 1. ОСНОВЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ

1.1. Общие понятия и определения

Превращение тепловой энергии в механическую в тепловых двигателях осуществляется при помощи так называемого рабочего тела, в качестве которого исполь-

зуются газы и пары, так как они обладают значительным коэффициентом объемного расширения.

Энергией называют количественную меру форм движения материи. Поэтому применяемое в технической литературе разделение энергии на тепловую, механическую, электрическую, атомную и другие виды носит условный характер.

При изучении термодинамических явлений в качестве объекта исследования выбирают группу тел (или тело), обладающих способностью обмениваться энергией. Этот объект и называют *термодинамической системой*. В зависимости от условий взаимодействия этой системы с другими системами различают открытую и изолированную термодинамические системы. *Открытой* называют систему, которая имеет возможность обмениваться энергией с другими системами, *изолированной* — не имеющей возможности обмениваться энергией с другими системами.

Величины, характеризующие состояние тел, — давление, температура, удельный объем — называют *термодинамическими параметрами*.

В технической термодинамике изучают только *равновесные процессы*. Под равновесным понимают процесс, в котором при подведении энергии к рабочему телу (газу, пару) или ее отборе в каждый момент времени давление, плотность и температура рабочего тела (газа, пара) одинаковы по всей его массе или, что то же самое, находятся в каждый момент времени в равновесном состоянии. С точки зрения поведения молекул газа и пара равновесным состоянием считают такое, при котором молекулы газа и пара равномерно распределены по всему объему. Именно в этом случае рабочее тело (газ, пар) будет иметь одинаковые давления, плотность и температуру по всему объему.

Равновесные процессы одновременно являются и обратимыми. Обратимым является такой процесс, в котором при подаче энергии к рабочему телу или ее отборе газ в процессе расширения и в процессе сжатия проходит через промежуточные равновесные состояния.

Все протекающие вокруг нас процессы являются *необратимыми* и их изучают путем замены на такие обратимые процессы, которые приводят термодинамическую систему к одинаковым конечным состояниям рабочего тела. Указанная замена необратимых процессов на

обратимые выполняется на практике с целью значительного упрощения математических расчетов. Процесс, при котором рабочее тело путем расширения и последующего сжатия приходит в первоначальное состояние, называют циклом.

1.2. Основные параметры состояния газов

Условимся, что под понятием «газ» будем подразумевать собственно газ, а также пар.

Изучение свойств газов с учетом сил сцепления между их молекулами очень сложно. Поэтому обратимся к изучению воображаемого газа, у которого нет сил сцепления между молекулами, а сами молекулы представляют собой материальные точки, не имеющие объема. Такой газ называли *идеальным газом*.

В практике допускается относить к идеальным все газы, с которыми приходится встречаться в теплотехнических расчетах, а также водяной пар, входящий в состав паровоздушных или парогазовых (продукты горения топлива) смесей. Однако водяной пар, применяемый в качестве рабочего тела в паровых двигателях или как теплоноситель для тепловлажностной обработки бетона, не принято относить к идеальным газам; в этом случае водяной пар находится в состоянии, близком к жидкости.

Газы, в которых нельзя пренебречь силами сцепления между молекулами и объемом этих молекул, называют *реальными*. Рассмотрим основные термодинамические параметры состояния газов.

Температура — мера средней кинетической энергии молекул тела. По представлениям молекулярно-кинетической теории, при одной и той же температуре газа отдельные его молекулы движутся с разными скоростями. Поэтому понятие «абсолютной температуры» принято относить ко всей массе молекул и, следовательно, к средней их кинетической энергии. Соответственно указанному между средней кинетической энергией идеального газа и абсолютной температурой устанавливается следующее соотношение.

$$mv^2/2 = KT, \quad (1.1)$$

где $mv^2/2$ — средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул; K — коэффициент пропорциональности; T — абсолютная температура.

В СССР применяют две температурные шкалы: *термодинамическую* (ТК), в которой отсчет ведется от состояния полного покоя молекул, называемой шкалой Кельвина, и *международную практическую* (°С). По международной практической шкале (шкала Цельсия) отсчет ведется от состояния тающего льда при нормальном давлении. Цена деления градуса по обеим шкалам одинакова, поэтому пересчет с одной шкалы на другую производится по формуле

$$T = t^{\circ} + 273,15. \quad (1.2)$$

Под *удельным объемом* v понимают объем V в кубических метрах, занимаемый 1 кг массы газа m , т. е. $v = V/m$ кг/м³. Величину, обратную удельному объему v , называют плотностью и обозначают ρ , кг/м³. Из определения понятий v и ρ следует, что

$$v\rho = 1. \quad (1.3)$$

Под *давлением газа* понимают средний результат ударов молекул газа о стенки сосуда, в который заключен газ. Измеряют давление результатом действия этих ударов на единицу поверхности сосуда — в Паскалях; 1 Паскаль равен давлению силы 1 Н на площадь в 1 м², 1 Па = 1 Н/м².

Согласно молекулярно-кинетической теории газов, изучаемой в курсе физики, давление газа численно равно 2/3 средней кинетической энергии поступательного движения молекул газа, заключенных в единице объема, т. е.

$$p = 2/3 n \left(\frac{mv^2}{2} \right), \quad (1.4)$$

где n — количество молекул в единице объема газов; m — масса молекулы; v — средняя скорость движения молекул.

Уравнение (1.4) называют *основным уравнением кинетической теории газов*.

Умножив обе части уравнения (1.4) на заданный объем газа V , м³, получим $pV = 2/3 nV (mv^2/2)$, где $nV = N$ — число молекул в заданном объеме газа. Заменив $mv^2/2$ на равную ей величину KT по (1.1), получим

$$pV = 2/3 NKT. \quad (1.5)$$

Различают давление *абсолютное* ($p_{\text{абс}}$), отсчитываемое от нуля (полного вакуума), и *избыточное* ($p_{\text{изб}}$) или, как его еще называют, *манометрическое*.

Уравнение состояния идеального газа. Пусть идеальный газ находится в цилиндре с подвижным поршнем. В результате подведения к нему определенного количества тепловой энергии газ переходит из одного равновесного состояния в другое равновесное состояние. Для каждого равновесного состояния газа, согласно (1.5), можно написать:

$$p_1 v_1 = 2/3 N K T_1 \quad \text{и} \quad p_2 v_2 = 2/3 N K T_2$$

или

$$(p_1 v_1)/T_1 = 2/3 N K \quad \text{и} \quad (p_2 v_2)/T_2 = 2/3 N K.$$

Откуда

$$(p v)/T = \text{const.} \quad (1.6)$$

Постоянную величину, получаемую в результате деления произведения $p v$ на абсолютную температуру T , называют *газовой постоянной* и обозначают R . Тогда уравнение (1.6) принимает вид $(p v)/T = R$ или

$$p v = R T. \quad (1.7)$$

Уравнение (1.7) называют *уравнением состояния идеального газа* или уравнением Клапейрона. Заменив в уравнении (1.7) удельный объем v его значением через отношение объема V к массе m , получают уравнение Клапейрона для массы газа m , кг

$$p V = m R T. \quad (1.8)$$

Если обе части уравнения (1.7) умножить на относительную молекулярную массу μ , получим уравнение состояния для 1 киломоля газа

$$p \mu v = R_\mu T, \quad (1.9)$$

называемое *уравнением Менделеева—Клапейрона*. В этом уравнении $R_\mu = 8314$ Дж/(кмоль·К) называется *универсальной газовой постоянной*, так как она одинакова для всех газов.

1.3. Смеси идеальных газов

В теплотехнике строительной индустрии приходится иметь дело не с отдельным газом, а с газовыми смесями, т. е. с продуктами горения топлива и нагретым воз-

духом. В эти смеси в качестве компонентов входят воздух, водяные пары, оксид углерода и др.

При рассмотрении газовых смесей исходят из того, что отдельные газы (компоненты) не вступают между собой в химическое взаимодействие. При этом каждый газ (компонент) ведет себя так, как будто он один при данной температуре занимает весь объем. Давление газа, входящего в состав газовой смеси, которое он оказывал бы, занимая весь объем смеси и находясь при температуре смеси, называют *парциальным* и обозначают p'_{ki} , где i — порядковый номер компонента в смеси. Общее давление газовой смеси $p_{см}$ на стенки сосудов складывается из суммы парциальных давлений всех компонентов, входящих в смесь. Это положение и составляет содержание закона Дальтона, установленного им опытным путем в 1807 г., т. е.

$$p_{см} = \sum_{i=1}^{i=n} p'_{ki}, \quad (1.10)$$

где n — число компонентов смеси.

Для теплотехнических расчетов необходимо знать состав смеси и количество каждого содержащегося в смеси компонента. Количественно каждый компонент смеси может быть выражен массовой или объемной долей.

Массовой долей называют отношение массы компонента к массе всей смеси и обозначают M_k . Если обозначить массу компонента m_k , а массу смеси $m_{см}$, то можно выразить массовую долю этого компонента как $m_k/m_{см}$. Тогда сумма массовых долей всех компонентов смеси с числом компонентов n должна составить единицу. Следовательно,

$$\sum_{i=1}^{i=n} M_k = M_{k1} + M_{k2} + \dots + M_{kn} = 1. \quad (1.11)$$

Объемный состав — понятие более сложное. Для определения объемной доли компонента предположим, что в сосуд помещено несколько газов и что объем каждого компонента (газа) равен объему сосуда. Чтобы выразить объемную долю компонента, учитывают его объем из условия, что компонент занимает весь объем, находясь при давлении смеси. Таким образом, объем, который занимал бы газ, входящий в состав газовой смеси,

если бы он находился при тех же температурах и давлении, что и вся смесь, называют *парциальным*. Отсюда *объемной долей компонента* (r_k) называют *отношение парциального объема компонента* (V_k) *к объему смеси* ($V_{см}$),

$$r_k = V_k / V_{см}. \quad (1.12)$$

Если число составляющих смесь компонентов n , то можно записать

$$\sum_{l=1}^{l=n} r_{kl} = r_{k1} + r_{k2} + \dots + r_{kn} = 1. \quad (1.13)$$

Вычисление парциальных давлений. Если компонент, занимающий парциальный объем, находится под давлением смеси, то согласно закону Бойля-Мариотта, при неизменной температуре каждому давлению постоянной массы газа соответствует определенный объем, т. е. для двух таких состояний газа при $T = \text{const}$ на основании (1.6) можно написать

$$p_k V_{см} = p_{см} V_k. \quad (1.14)$$

Разделив обе части уравнения на $V_k / V_{см}$ и заменив по (1.12) на r_k , получим

$$p_k = p_{см} r_k. \quad (1.15)$$

Следовательно, парциальное давление компонента равно произведению давления смеси $p_{см}$ на объемную долю этого компонента. Если равенство (1.14) написать для всех компонентов смеси и сложить их, то получим

$$\sum_{l=1}^{l=n} p_k V_{см} = \sum_{l=1}^{l=n} p_{см} V_k \quad (1.16)$$

или

$$V_{см} \sum_{l=1}^{l=n} p_k = p_{см} \sum_{l=1}^{l=n} V_k, \quad (1.17)$$

но $\sum_{l=1}^{l=n} p_k = p_{см}$, тогда

$$V_{см} = V_{k1} + V_{k2} + \dots + V_{kn}, \quad (1.18)$$

т. е. объем смеси равен сумме парциальных объемов ее компонентов.

Удельный объем газовой смеси равен сумме произведений удельных объемов компонентов на их массовые доли

$$v_{см} = v_{к1}M_{к1} + v_{к2}M_{к2} + \dots + v_{кn}M_{кn}, \quad (1.19)$$

где $v_{кn}$ — удельный объем n -го компонента.

Плотность газовой смеси представляет собой величину, обратную удельному объему смеси. Масса каждого компонента смеси есть произведение его плотности ρ_k на объемную долю r_k . Тогда плотность газовой смеси компонентов составит

$$\rho_{см} = \rho_{к1}r_{к1} + \rho_{к2}r_{к2} + \dots + \rho_{кn}r_{кn}. \quad (1.20)$$

Молекулярная масса смеси ($\mu_{см}$) по отношению к газовой смеси носит также условный характер, так как это понятие относится не к действительно существующим молекулам, а к воображаемой «средней» молекуле. Поэтому молекулярную массу смеси называют *средней*, или *кажущейся*. Молекулярная масса смеси представляет собой сумму произведений молекулярных масс компонентов на их объемную долю в смеси. Следовательно, для смеси из n газов можно записать

$$\mu_{см} = \sum_{k=1}^{i=n} \mu_k r_k = \mu_1 r_1 + \mu_2 r_2 + \dots + \mu_n r_n. \quad (1.21)$$

Газовая постоянная смеси газов $R_{см}$ через объемные доли определяется из соотношения

$$\begin{aligned} R_{см} = R_{\mu} / \mu_{см} &= 8314 \left/ \sum_{k=1}^{i=n} \mu_k r_k \right. = 8314 \left/ \left[\sum_{k=1}^{i=n} r_k (8314 / R_k) \right] \right. = \\ &= 1 \left/ \left[\sum_{k=1}^{i=n} (r_k / R_k) \right] \right. . \end{aligned} \quad (1.22)$$

Газовая постоянная смеси газов $R_{см}$ через массовые доли получается из выражения

$$\begin{aligned} R_{см} = \frac{R_{\mu}}{\mu_{см}} &= \frac{8314}{1 \left/ \sum_{k=1}^{i=n} (M_k / \mu_k) \right.} = 8314 \sum_{k=1}^{i=n} [M_k / (8314 / R_k)] \\ &\text{или } R_{см} = \sum_{k=1}^{i=n} M_k R_k, \end{aligned} \quad (1.23)$$

Выражение для относительной молекулярной массы через массовые доли:

$$\begin{aligned}\mu_{\text{см}} &= \frac{m_{\text{см}}}{R_{\text{см}}} = \frac{m_{\text{см}}}{\sum_{i=1}^n R_K} = \frac{m_{\text{см}}}{\sum_{i=1}^n (m_K/\mu_K)} = \\ &= \frac{m_{\text{см}}}{\sum_{i=1}^n \frac{M_K m_{\text{см}}}{\mu_K}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n (M_K/\mu_K)}.\end{aligned}\quad (1.24)$$

1.4. Теплоемкость газов

Теплоемкостью называют количество теплоты, необходимое для изменения температуры единицы массы или объема вещества на один градус. *Удельной массовой теплоемкостью* применительно к газам называют теплоемкость, отнесенную к единице массы газа, т. е. с, [кДж/(кг·К)]. *Удельной объемной теплоемкостью* называют теплоемкость, отнесенную к 1 м³ газа, взятой при нормальных физических условиях, с', кДж/(м³·К); *мольной* называют теплоемкость, отнесенную к 1 кмолью газа, μc , кДж/(кмоль·К).

Теплоемкость газов непостоянная величина, зависящая от температуры газов, поэтому различают теплоемкости *истинную*, характерную для определенной температуры, и *среднюю*, которую с достаточной точностью принимают для расчетов одинаковой при нагревании газов в пределах заданного интервала температур от T_1 до T_2 .

Теплоемкость газов зависит также от того, как протекает процесс нагревания или охлаждения газа. Если нагревание проводят при постоянном объеме, то применяемую в этом случае теплоемкость называют *объемной* и обозначают соответственно c_v , c'_v , μc_v . Нагревание, осуществляемое при постоянном давлении, требует применения теплоемкости при постоянном давлении, которую обозначают c_p , c'_p , μc_p . Обычно для расчетов используют средние значения теплоемкостей. Например, для расчета удельного количества теплоты q (кДж/кг)

на нагревание газа от температуры T_1 до температуры T_2 в формуле

$$q = c(T_2 - T_1)$$

берется среднее значение c в интервале температур от T_1 до T_2 .

При нагревании газ расширяется и совершает работу, в которую превращается часть подведенной теплоты. Для его нагревания на 1 градус при постоянном давлении необходимо затратить больше теплоты, чем при постоянном объеме, т. е. $c_p > c_v$. Соотношение между ними определяется уравнением Майера.

$$c_p - c_v = R. \quad (1.25)$$

При нагревании газовой смеси происходит нагревание каждого ее компонента на один градус. Тогда *массовая теплоемкость смеси* выражается суммой произведений массовой теплоемкости каждого компонента на его массовую долю, т. е.

$$c_{см} = c_1 M_{к1} + c_2 M_{к2} + \dots + c_n M_{кn}, \quad (1.26)$$

где $c_1, c_2, \dots, c_n$ — массовые теплоемкости компонентов смесей; $M_{к1}, M_{к2}, \dots, M_{кn}$ — массовые доли компонентов.

Объемная теплоемкость смеси выражается суммой произведений объемной теплоемкости каждого компонента на его объемную долю, т. е.

$$c'_{см} = c'_1 r_{к1} + c'_2 r_{к2} + \dots + c'_n r_{кn}, \quad (1.27)$$

где $c'_1, c'_2, \dots, c'_n$ — объемные теплоемкости компонентов смеси; $r_{к1}, r_{к2}, \dots, r_{кn}$ — объемные доли компонентов смеси.

1.5. Понятие о внутренней энергии

Для работы тепловых двигателей важное значение имеет *внутренняя энергия газа*. Если внутреннюю энергию газа обозначить E_i , то ее изменение будет ΔE_i . Когда в процессе теплообмена внутренняя энергия какого-либо газа уменьшается или увеличивается на ΔE_i , принято говорить, что газ отдает в окружающую среду или получает от нее или от другого тела *количество теплоты* q , равное ΔE_i . Такое выражение надо понимать условно, так как любое тело может получать и отдавать энергию, а количество теплоты является лишь численным выражением переданной или полученной энергии в процессе теплообмена.

Внутренняя энергия — функция основных параметров состояния p , v и T , но поскольку они связаны между собой характеристическим уравнением, то внутреннюю энергию можно представить как функцию только двух основных параметров состояния газа. Например: $E_i = f_1(p, T)$ или $E_i = f_2(v, T)$, или $E_i = f_3(p, v)$.

Температура газов определяет, как было сказано, кинетическую энергию движения молекул, а также энергию внутримолекулярных колебаний. Давление и объем газа определяют потенциальную энергию — энергию взаимодействия молекул. Поэтому внутренняя энергия рабочего тела E_i состоит из внутренней кинетической энергии $E_{ик}$ и внутренней потенциальной энергии $E_{ип}$, т. е.

$$E_i = E_{ик} + E_{ип}. \quad (1.28)$$

При рассмотрении идеальных газов указывалось, что в рабочем теле отсутствуют силы взаимодействия молекул, а объем молекул исчезающе мал. Следовательно, внутренняя потенциальная энергия идеальных газов равна нулю ($E_{ип} = 0$) и внутренняя энергия E_i определяется только энергией кинетической, т. е. $E_i = E_{ик}$.

В термодинамических системах обычно абсолютную величину внутренней энергии не определяют, а пользуются величиной ее изменения для различных состояний системы, т. е. находят разность

$$E_{i2} - E_{i1} = \Delta E_i = c_v(T_2 - T_1). \quad (1.29)$$

Для идеального газа внутренняя энергия является функцией температуры и определяется только температурой.

1.6. Работа газа при его расширении

Рассмотрим изолированную термодинамическую систему, состоящую из рабочего тела — газа, находящегося в цилиндре 1; цилиндр снабжен подвижным поршнем — приемником механической энергии 2 и источником теплоты 3 (рис. 1.1, а, б).

Для анализа изменения состояния газа будем считать, что его расширение или сжатие идет с бесконечно малой скоростью, а разность температур между источником теплоты и газом в цилиндре бесконечно мала. В этом случае можно принять, что давление газа и его температура в любой точке по всей массе газа одинако-

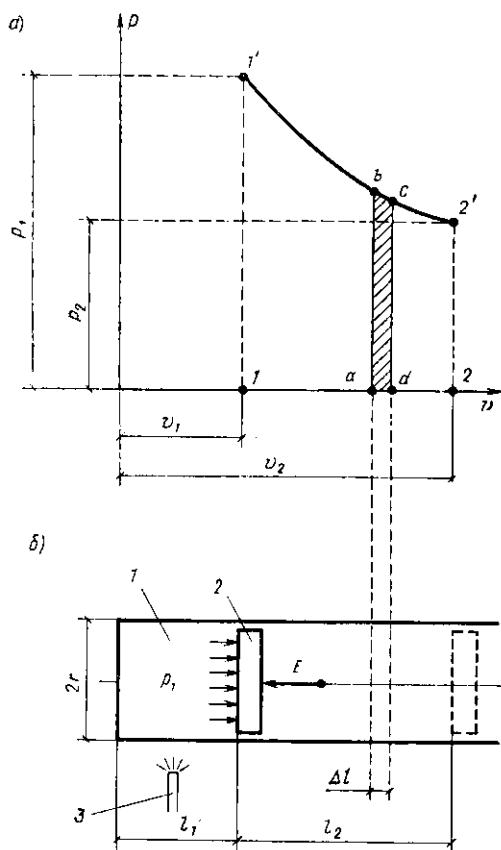


Рис. 1.1. Процесс изменения состояния газа в p - v -диаграмме (а); схема цилиндра с подвижным поршнем (б)

ва в каждый момент времени, т. е. газ находится в равновесном состоянии, и для него применимо уравнение Клапейрона $p\nu=RT$.

В рассматриваемой системе к подвижному поршню приложена сила F . Газ находится в цилиндре диаметром $2r$ и при удельном объеме ν_1 занимает часть длины цилиндра, равную l_1 . Сила F , приложенная к поршню, должна уравниваться давлением газа p_1 , оказываемым на площадь поршня A . Тогда начальное равнове-

сие такой термодинамической системы можно записать в виде

$$F = p_1 A. \quad (1.30)$$

Пусть рабочему телу — газу от источника 3 сообщается некоторое количество теплоты. Равновесие нарушается, так как p_1 возрастает, и давление газа на поршень $p_1 A$ станет больше, чем сила F , т. е. $p_1 A > F$. За счет этого поршень 2 начнет передвигаться вправо, совершать работу W , и передвинется на расстояние l_2 .

Для определения работы, совершенной 1 кг газа при его расширении в соответствии с предположением о бесконечно малой скорости перемещения поршня в цилиндре, разобьем процесс расширения газа на бесконечно малые участки — элементы пути Δl и проанализируем процесс в $p\upsilon$ -диаграмме (см. рис. 1.1, а). По оси абсцисс отложим объемы, которые будет занимать газ в процессе работы, а по оси ординат соответствующее удельному объему давление газа.

В начальной точке 1, соответствующей объему υ_1 , давление газа p_1 . При перемещении поршня вправо объем начнет возрастать, а давление уменьшаться по кривой 1'—2' и в точке 2' удельный объем будет υ_2 , а давление p_2 .

Для выделенного элементарного участка Δl элементарная работа ΔW может быть определена как произведение силы на путь: $\Delta W = p A \Delta l$, но $A \Delta l = \Delta \upsilon$, тогда $\Delta W = p \Delta \upsilon$. Здесь Δl — путь, пройденный поршнем; A — площадь поршня; $\Delta \upsilon$ — величина, на которую возрос объем цилиндра при перемещении поршня на Δl . Графически ΔW выразится в координатах $p\upsilon$ площадью элементарного прямоугольника $abcd$.

Чтобы вычислить работу на всем пути движения поршня от точки 1 до точки 2, нужно сложить все произведения $p \Delta \upsilon$, следовательно, работа расширения газа W при n -числе элементарных процессов составит

$$W = \sum_1^n p \Delta \upsilon. \quad (1.31)$$

Отсюда работа газа может быть измерена в $p\upsilon$ -координатах 1'-2'-2-1, т. е. площадью, ограниченной кривой процесса, крайними ординатами и отрезком оси абсцисс, определяющими длину пути, проделанного

поршнем при расширении газа. Эту площадь определяем интегрированием в пределах v_1 — v_2 по формуле

$$W = \int_{v_1}^{v_2} p dv. \quad (1.32)$$

Мы рассмотрели равновесный процесс изменения состояния газа, который является обратимым процессом. Обратимые процессы — это идеализированные процессы. В них считаются отсутствующими потери, затрачиваемые на трение, потери теплоты в окружающую среду и не учитываются возможные изменения химического состава рабочего тела.

В реальных, необратимых, процессах, которые протекают с определенными скоростями, параметры газа не могут быть постоянными в каждый момент времени по всей его массе. Работа, затрачиваемая на преодоление трения, превращается в теплоту, значительная часть теплоты теряется в окружающую среду. Поэтому необратимые процессы могут протекать только в одном направлении, и после совершения необратимого процесса система может быть возвращена в первоначальное положение только при затратах дополнительной энергии извне.

1.7. Первый закон термодинамики

Закон сохранения и превращения энергии в приложении к тепловым и механическим явлениям формулируется так: если исчезает некоторое количество тепловой энергии, возникает эквивалентное ему количество механической энергии (в виде совершенной работы) и, наоборот, при совершении какой-либо работы появляется эквивалентное ей количество тепловой энергии.

Согласно этому закону рассмотрим термодинамический процесс, в котором к единице массы газа, находящегося в равновесном состоянии, подводится q единиц теплоты, при этом изменение внутренней энергии единицы массы газа составляет ΔE_i . Остальное количество теплоты, выражаемое как $q - \Delta E_i$, затрачивается на совершение работы W . Указанное можно записать в виде

$$q - \Delta E_i = W \quad (1.33)$$

или изменение внутренней энергии ΔE_i равно количеству

ву подведенной теплоты q за вычетом совершенной работы единицей массы газа W

$$\Delta E_i = q - W. \quad (1.34)$$

Уравнение (1.34) — математическое выражение первого закона термодинамики.

Энтальпия газа. В теплотехнических расчетах часто встречается выражение $E_i + pv$, где E_i — внутренняя энергия газа, а pv — потенциальная энергия давления газа. Сумму этих величин обозначают буквой i и называют *энтальпией газа*. При постоянном давлении изменение энтальпии равно количеству теплоты, подведенной к системе. Поэтому энтальпию иногда называют теплосодержанием и измеряют в Дж/кг. Тогда, согласно определению,

$$E_i + pv = i. \quad (1.35)$$

Величины (E_i, p, v) , входящие в математическое выражение энтальпии, являются параметрами состояния, следовательно, и энтальпия — параметр состояния газа.

Энтропия. В термодинамических расчетах широко пользуются физической величиной, называемой *энтропией*. Измерить энтропию невозможно, так как это бесконечно малая величина. Ее изменение можно определить только из уравнений термодинамики. Энтропия обозначается буквой s (Дж/К) и представляет собой отношение количества подводимой теплоты dQ к абсолютной температуре системы T , т. е.

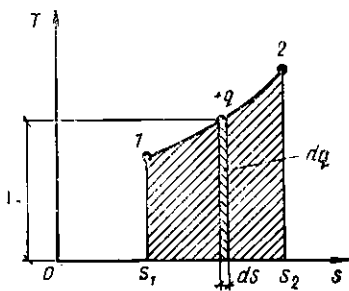
$$ds = dQ/T. \quad (1.36)$$

Отношение энтропии рабочего тела к его массе называют *удельной энтропией* и обозначают ds , Дж/кг·К.

Обычно определяют не энтропию, а изменение энтропии Δs в процессе изменения состояния рабочего тела. Величина Δs позволяет установить направление течения термодинамического процесса. Например, если $\Delta s > 0$, то $\Delta q > 0$ и, наоборот, при $\Delta s < 0$, Δq тоже < 0 . Следовательно, если в термодинамическом процессе $\Delta s > 0$, то рабочему телу сообщается теплота, если $\Delta s < 0$, то теплота отбирается.

Рассмотрим использование энтропии при изменении состояния газов. Для этого в прямоугольной системе координат по оси абсцисс отложим значение энтропии s , а по оси ординат — температуры T (рис. 1.2). Анализу

Рис. 1.2. Термодинамический процесс в Ts -диаграмме



подвергнем процесс, изображенный в виде кривой 1—2, для единицы массы газа.

В дифференциальной форме записываем первый закон термодинамики

$$dq = dE_i + pdv. \quad (1.37)$$

Элементарное изменение энтропии газа в дифференциальной форме представляется равенством

$$ds = dq/T. \quad (1.38)$$

Будем считать, что разность температур между источником теплоты и газом бесконечно мала. Для вычисления q разобьем процесс 1—2 на бесконечно большое число элементарных процессов и подведем бесконечно малое количество теплоты dq к каждому. В этом случае энтропия также изменится на бесконечно малую величину ds . Температуру элементарного процесса принимаем постоянной (с точностью до бесконечно малой первого порядка). Количество подведенной теплоты dq в каждом элементарном процессе представим в виде площади элементарного прямоугольника со сторонами T и ds .

Количество теплоты, подведенной к системе, находим интегрированием элементарных площадей прямоугольника в пределах от s_1 до s_2 , т. е.

$$q = \int_{s_1}^{s_2} T ds. \quad (1.39)$$

1.8. Процессы изменения состояния газа

Для исследования состояния газа (рабочего тела) в тепловых установках рассмотрим вначале частные случаи процесса изменения его состояния: при постоян-

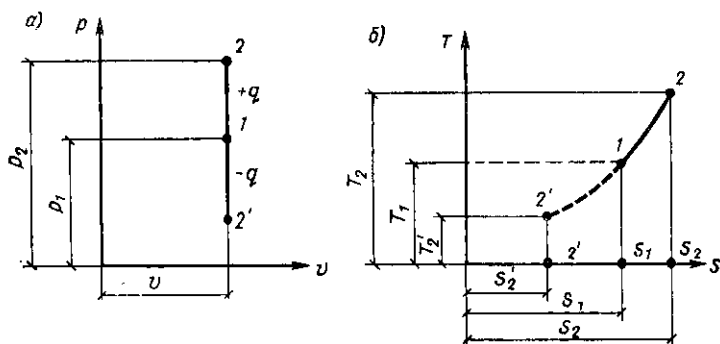


Рис. 1.3. Изохорный процесс изменения состояния газа
а — в p - v -диаграмме; б — в T - s -диаграмме

ном объеме (изохорный); постоянном давлении (изобарный); постоянной температуре (изотермический); при отсутствии теплообмена между рабочим телом и окружающей средой (адиабатный).

Изохорный процесс изменения состояния газа. Примером изохорного процесса может быть нагревание или охлаждение газа в закрытом сосуде. Уравнение процесса в координатах p - v записывается в виде $v = \text{const}$. Пусть газ в начальном состоянии занимает объем v и находится под давлением p_1 (точка 1 на рис. 1.3, а). При нагревании давление в сосуде возрастает и становится p_2 при том же объеме, следовательно, процесс нагревания для изохорного процесса изобразится вертикальной прямой 1—2. Процесс охлаждения идет вниз от точки 1 до точки 2' и изобразится вертикальной прямой 1—2'.

В T - s -диаграмме при нагревании газа в сосуде с объемом v и начальной температурой T_1 процесс протекает с увеличением энтропии. При увеличении от T_1 до T_2 (кривая 1—2 на рис. 1.3, б) охлаждение идет соответственно по кривой 1—2', при этом температура снижается до T_2' .

Зависимость между параметрами p и T в изохорном процессе идеального газа получаем из уравнения (1.6) $p v / T = \text{const}$ или $p_1 v_1 / T_1 = p_2 v_2 / T_2$. Учитывая, что в изохорном процессе $v_1 = v_2$, и сократив поэтому уравнение на v , получим

$$p_1 / T_1 = p_2 / T_2. \quad (1.40)$$

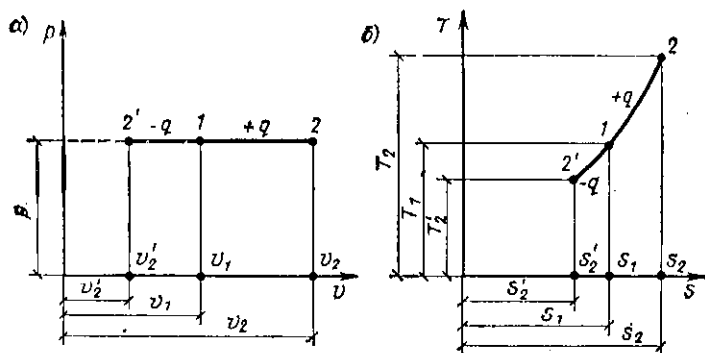


Рис. 1.4. Изобарный процесс изменения состояния газа
а — в p - v -диаграмме; б — в T - s -диаграмме

Эта зависимость носит название закона Шарля.

Уравнение первого закона термодинамики (1.33) $q = \Delta E_{iv} + W$ при $c_v = \text{const}$ может быть записано в форме

$$q_v = \Delta E_{iv} = c_v \Delta T, \quad (1.41)$$

так как $W_v = p dv = 0$.

Для определения подведенного количества теплоты, которое можно вычислить для изохорного процесса по T - s -диаграмме, необходимо в уравнении энтропии $ds = dq/T$ заменить dq на его значение $dq_v = c_v dT$ и получить $ds = c_v dT/T$, тогда для процесса, протекающего в пределах температур от T_1 до T_2 ,

$$s_2 - s_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_v dT/T = c_v \ln (T_2/T_1). \quad (1.42)$$

Графически количество подведенной теплоты q_{1-2} будет равно площади фигуры $s_1-1-2-s_2$ (см. рис. 1.3, б).

Изобарный процесс изменения состояния газа. Примером изобарного процесса может быть нагревание газа в цилиндре с подвижным поршнем. Уравнение процесса в координатах p - v при $p = \text{const}$ выражается прямой, параллельной оси абсцисс. Пусть единица массы газа в цилиндре с подвижным поршнем занимает объем v_1 и находится под давлением p_1 . Отложив эти параметры в координатах p - v (рис. 1.4, а), получим точку 1. При нагревании газ расширяется. Энергия газа, действуя на поршень, заставляет его перемещаться в сторону увели-

чения объема. При этом совершается работа, поршень передвигается в точку 2 и объем газа соответственно изменится до v_2 . При отведении теплоты от газа поршень передвигается в сторону уменьшения объема цилиндра, соответственно уменьшается объем газа, например, до v'_2 (точка 2').

Если в уравнении (1.6) $p v/T = \text{const}$ или $p_1 v_1/T_1 = p_2 v_2/T_2$ принять $p_1 = p_2$, то получим

$$v_1/T_1 = v_2/T_2. \quad (1.43)$$

Полученное уравнение называется законом Гэя — Люсака.

Работу газа в $p v$ -диаграмме можно графически представить как площадь прямоугольника $v_1-1-2-v_2$ при нагревании газа и как площадь прямоугольника $v_1-1-2'-v'_2$ при охлаждении.

Высота прямоугольника — p_1 , а основание $\Delta v = v_2 - v_1$. Отсюда работа, произведенная газом при нагревании, может быть записана в виде

$$W_p = p_1(v_2 - v_1). \quad (1.44)$$

Подставив W_p в уравнение первого закона термодинамики $q_p = \Delta E_i + W_p$, получим $q_p = (E_{i2} - E_{i1}) + p_1(v_2 - v_1)$. Это уравнение легко привести к виду

$$q_p = (E_{i2} + p_1 v_2) - (E_{i1} + p_1 v_1). \quad (1.45)$$

Из (1.35) известно, что полученное выражение $E_i + p v$ — энтальпия газа i , тогда уравнение (1.45) может быть переписано в виде

$$q_p = i_2 - i_1 = \Delta i. \quad (1.46)$$

По значениям энтальпии конечного и начального состояния, взятым из теплотехнических таблиц, находят количество теплоты q_p при $p = \text{const}$, необходимое для нагревания и охлаждения газов, работающих в тепловых установках промышленности строительных изделий и конструкций.

В координатах $T s$ уравнение изобары изображается логарифмической кривой 2'—2 (рис. 1.4, б). С ростом температуры T возрастает и энтропия газа по равенству

$$s_2 - s_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_p dT = c_p \ln T_2/T_1.$$

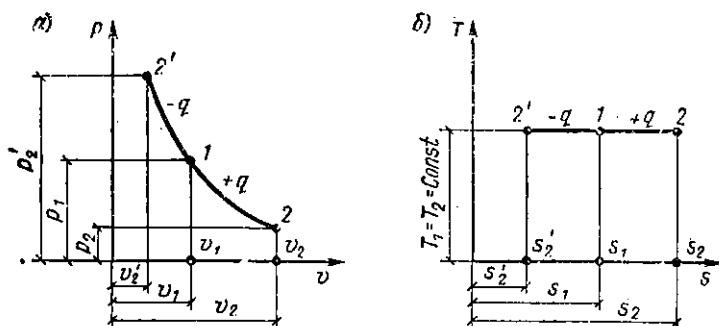


Рис. 1.5. Изотермический процесс изменения состояния газа
а — в p - v -диаграмме; б — в T - s -диаграмме

Если вести отсчет значения энтропии от нормального состояния газа, т. е. если для состояния 1 считать $v_1 = v_n$, $T_1 = 273$ К, $p = p_n$ и $s_1 = 0$, то для любого процесса изменения состояния идеального газа с параметрами v , p и T значение энтропии можно определить по формулам

$$s = c_v \ln (T/273) + R \ln (v/v_n); \quad (1.47)$$

$$s = c_p \ln (T/273) + R \ln (p/p_n). \quad (1.48)$$

Площадь фигуры s_1 -1-2- s_2 выражает количество подводимой теплоты ($+q$), площадь фигуры s'_2 -2'-1- s_1 выражает количество отданной теплоты ($-q$).

Изотермический процесс изменения состояния газа. Этот процесс протекает при постоянной температуре, $T = \text{const}$. Если в уравнении (1.6) $p v / T = \text{const}$ или, что то же самое, $p_1 v_1 / T_1 = p_2 v_2 / T_2$ принять $T_1 = T_2$, то после их сокращения получим

$$p_1 v_1 = p_2 v_2 \text{ или } p v = \text{const}, \quad (1.49)$$

что является выражением закона Бойля — Мариотта. В p - v -диаграмме изотермический процесс представляет собой кривую, называемую равнобочной гиперболой. Очевидно, что при увеличении объема газа за счет подводимой теплоты (условие $T = \text{const}$) его давление падает (рис. 1.5). Это показывает, что в изотермическом процессе вся подводимая к идеальному газу теплота ($+q$) расходуется на работу газа. При отдаче газом теплоты ($-q$) происходит его изотермическое сжатие ($q_T = W_T$, так как $\Delta E_{iT} = c_v \Delta T = 0$).

В координатах Ts изотермический процесс изображается прямой ($T=\text{const}$), поскольку расширение газа при постоянной температуре возможно при получении им теплоты ($+q$) и, наоборот, сжатие газа при постоянной температуре возможно при отдаче им теплоты ($-q$).

Количество подведенной или отведенной теплоты в изотермическом процессе определяют в координатах Ts соответственно площадью прямоугольников $s_1-1-2-s_2$ и $s_1-1-2'-s'_2$ и находят по формуле

$$q_T = T\Delta s_T = RT \ln (v_2/v_1) = RT \ln (p_1/p_2). \quad (1.50)$$

Работу расширения газа W_T можно представить как площадь фигуры $v_1-1-2-v_2$, и ее можно определить по формуле

$$W_T = \int_{v_1}^{v_2} p dv = RT \ln (v_2/v_1). \quad (1.51)$$

Сравнение формул (1.50) и (1.51) показывает, что при изотермическом расширении или сжатии вся подводимая или отводимая теплота затрачивается только на работу газа.

Адиабатный процесс изменения состояния газа. Адиабатным называют процесс изменения состояния газа, проходящий без теплообмена с окружающей средой ($dq=0$ и $q=0$). Так как мы рассматриваем идеальные газы с обратимыми процессами, то из уравнения, определяющего понятие энтропии: $dq/T=ds$, следует, что и $Tds=0$. Следовательно, для обратимых адиабатных процессов $s=\text{const}$, и в координатах Ts этот процесс должен выражаться прямой, параллельной оси T , с постоянной энтропией s (рис. 1.6, а).

Для графического изображения адиабатного процесса в p - v -диаграмме устанавливаем соотношение между давлением p и объемом v .

Из уравнения первого закона термодинамики: $dq = dE_i + dW$, приравняв dq нулю, получим $dE_i + dW = 0$ или $c_v dT + p dv = 0$.

Для идеального газа $p v = RT$ и $dT = 1/R (p dv + v dp)$, тогда $c_v/R (p dv + v dp) + p dv = 0$; разделив последнее выражение на c_v/R , получим $p dv + v dp + R/c_v p dv = 0$. Сложив одноименные члены, получим

$$(1 + R/c_v) p dv + v dp = 0, \quad (1.52)$$

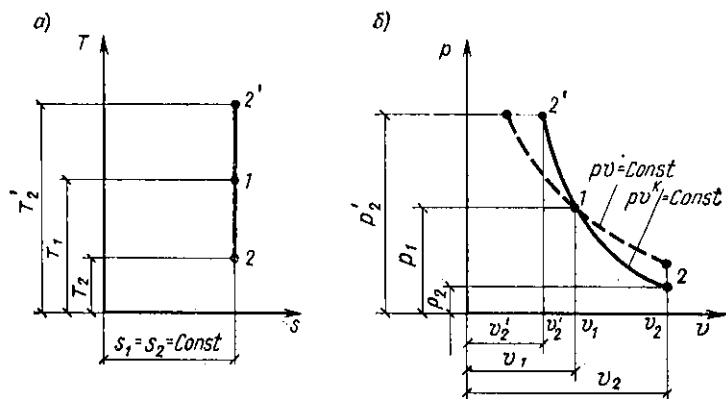


Рис. 1.6. Адиабатный процесс изменения состояния газа
а — в Ts -диаграмме; б — в p - v -диаграмме

однако $1 + R/c_v = (c_v + R)/c_v = c_p/c_v$, тогда подставив это равенство в (1.52), получим

$$(c_p/c_v) p dv + v dp = 0; \quad (1.53)$$

обозначив $c_p/c_v = k$ и разделив уравнение (1.53) на p , получим

$$k(dv/v) + dp/p = 0. \quad (1.54)$$

Интегрируя при постоянном значении k получим

$$pv^k = \text{const}, \quad (1.55)$$

где k — показатель адиабаты ($k > 1$, так как $c_p > c_v$).

Тогда в отличие от уравнения изотермы $pv = \text{const}$, представленной в координатах p - v в виде равнобочной гиперболы, кривая $pv^k = \text{const}$ должна идти круче (рис. 1.6, б). Для сравнения кривая изотермического процесса показана пунктиром.

Зависимость между переменными параметрами T и v в адиабатном процессе можно получить из уравнения адиабаты $p_1 v_1^k = p_2 v_2^k$. Напишем $p_2/p_1 = (v_1/v_2)^k$, далее по уравнению $p v = R T$ представим $p_2/p_1 = (v_1/v_2) \times (T_2/T_1)$, тогда $(T_2/T_1) = (v_1/v_2)^{k-1}$ или

$$T v^{k-1} = \text{const}. \quad (1.56)$$

Аналогично для параметров T и p получим равенство

$$T^k p^{1-k} = \text{const}. \quad (1.57)$$

Работу расширения газа в адиабатном процессе можно измерить площадью фигуры 1-2- v_2 - v_1 (см. рис. 1.6, б) и подсчитать по формулам первого закона термодинамики: $dE_i + dW = dq = 0$, тогда

$$dW = -dE_i. \quad (1.58)$$

После интегрирования получим уравнение

$$W = E_{i1} - E_{i2}. \quad (1.59)$$

Таким образом, в адиабатном процессе работа расширения газа совершается за счет внутренней энергии и равна: $(E_{i1} - E_{i2})$.

Для процесса сжатия изменим знак у W

$$-W = E_{i1} - E_{i2}, \text{ или } W = E_{i2} - E_{i1}. \quad (1.60)$$

Тогда в адиабатном процессе работа сжатия газа полностью направлена на увеличение его внутренней энергии.

Политропный процесс изменения состояния газов. Все рассмотренные выше процессы изменения состояния газов описываются общим уравнением

$$pv^m = \text{const}. \quad (1.61)$$

Однако каждый процесс характеризуется своим значением m . Уравнение (1.61) называют уравнением политропы, а m — показателем политропы. Путем варьирования показателя политропы m можно получить любое ранее рассмотренное уравнение, например: приняв $m=0$, получим $pv^0 = \text{const}$ или $p = \text{const}$. В этом случае уравнение (1.61) описывает изобарный процесс; приняв $m=1$, получим $pv = \text{const}$, следовательно, уравнение (1.61) показывает изотермический процесс; при $m=k$ уравнение (1.61) представляет адиабатный процесс; при $m=\pm\infty$ (так как $pv^m = \text{const}$ или $p^{1/m}v = \text{const}$) и при $m \rightarrow \infty$ $p^{1/m} \rightarrow 1$ и $v = \text{const}$ уравнение (1.61) соответствует изохорному процессу.

На рис. 1.7, а представлены все частные случаи изменения состояния газа в координатах pv и Ts уравнения (1.61) при разных показателях m . Все линии четырех термодинамических процессов с показателями $m=0$; 1; k ; $\pm\infty$ проведем через точку 1. Очевидно, что через эту точку можно провести бесчисленное множество линий термодинамических процессов, которые будут так-

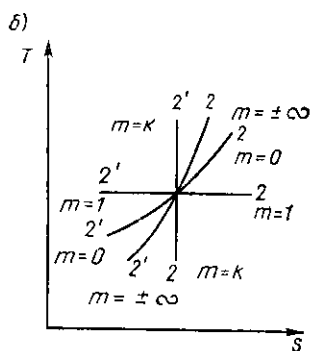
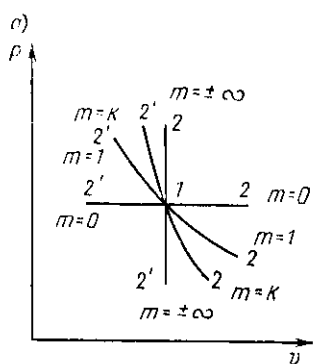


Рис. 1.7. Политропный процесс изменения состояния газа

а — в p - v -диаграмме; б — в T - s -диаграмме

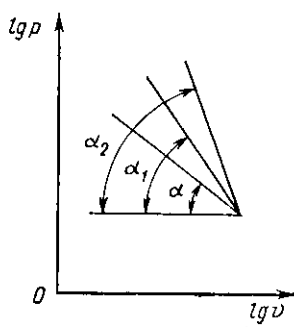


Рис. 1.8. Определение показателя политропы по углу наклона

же являться *политропами* с любым значением *показателя политропы* в пределах от $+\infty$ до $-\infty$ ¹.

Значения показателя политропы удобнее вычислять в логарифмических координатах (рис. 1.8). Для этого прологарифмируем политропный процесс $p v^m = \text{const}$ и получим $\lg p + m \lg v = \text{const}$, откуда

$$\lg p = \text{const} - m \lg v. \quad (1.62)$$

Обозначив угол наклона политропы α в логарифмических координатах (рис. 1.8), из уравнения (1.62) получим

$$m = \lg \alpha. \quad (1.63)$$

Зависимость между объемом и давлением для политропного процесса можно представить в виде

$$p_2/p_1 = (v_1/v_2)^m, \text{ или } p v^m = \text{const}. \quad (1.64)$$

¹ Во всех действительных процессах $0 \leq m \leq +\infty$.

Зависимость между объемом и температурой для политропного процесса

$$T_2/T_1 = (v_1/v_2)^{m-1} \text{ или } Tv^{m-1} = \text{const.} \quad (1.65)$$

Зависимость между температурой и давлением для политропного процесса

$$T_2/T_1 = (p_2/p_1)^{(m-1)/m} \text{ или } T^m p^{1-m} = \text{const.} \quad (1.66)$$

Работа W' для политропного процесса:

$$W' = (p_1 v_1 - p_2 v_2) / (m-1). \quad (1.67)$$

1.9. Второй закон термодинамики

Второй закон термодинамики касается условий и направлений протекания термодинамических процессов. Существует несколько формулировок этого закона, однако их сущность сводится к следующему: тепловая энергия, подводимая к рабочему телу, не может полностью превращаться в механическую.

Анализируя эту формулировку, отметим, что рабочее тело получает тепловую энергию при более высокой температуре, а отдает при более низкой температуре. Отданная тепловая энергия для дальнейшего преобразования в механическую энергию оказывается потерянной. В этом и заключается суть второго закона термодинамики применительно к работе тепловых двигателей.

Если обозначить тепловую энергию, полученную рабочим телом, q_1 , а отданную q_2 , то в механическую энергию преобразуется разность, выражаемая $q_1 - q_2 = q_0$. Согласно первому закону термодинамики, преобразованная тепловая энергия в механическую соответствует совершенной работе. Следовательно, $q_0 = W_0$. Однако q_0 меньше q_1 , отсюда можно определить *коэффициент полезного действия* (КПД), который обозначают η_T и называют термическим КПД, т. е.

$$\eta_T = (q_1 - q_2) / q_1 = q_0 / q_1 = W_0 / q_1. \quad (1.68)$$

Все приведенные рассуждения относятся к идеальному двигателю, в котором отсутствуют какие-либо потери на трение, излучение теплоты в окружающую среду и др.

Работа идеального теплового двигателя возможна при перепаде температур от T_1 до T_2 и только циклично, по принципу непрерывно повторяющихся циклов,

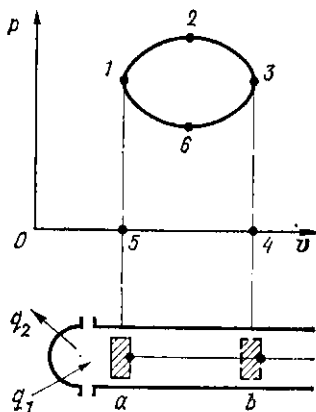
возвращающих рабочее тело в первоначальное состояние. Замкнутый циклический процесс должен состоять из прямых и обратных процессов. На обратные процессы тепловые двигатели не требуют какой-либо работы от окружающей среды, а используют долю производимой ими работы расширения. Поэтому работа расширения в цикле теплового двигателя должна превышать работу сжатия.

1.9.1. Круговые процессы

Рассмотрим схему работы идеального теплового двигателя в pV -диаграмме (рис. 1.9). Пусть рабочее тело (в данном случае газ) расширяется по кривой $1-2-3$. К нему подведена тепловая энергия q_1 . При расширении газ совершает работу, равную площади фигуры $1-2-3-4-5$, которую мы назвали работой расширения W_1 . При этом поршень теплового двигателя передвинулся из положения a в положение b . Для завершения цикла поршень должен вернуться в свое первоначальное состояние a , и рабочее тело также будет возвращено в исходное положение — точку 1 .

На сжатие газа необходимо затратить работу W_2 , которая, как уже выяснено, меньше работы W_1 , полученной при расширении газа. Этого можно добиться за счет отбора тепловой энергии от газа. Процесс сжатия с отбором тепловой энергии q_2 можно представить в виде кривой $3-6-1$.

Рис. 1.9. Схема работы идеального теплового двигателя в pV -диаграмме



В результате расширения и сжатия рабочего тела получена работа $W_0 = W_1 - W_2$, равная исчезнувшему количеству теплоты. Следовательно, процесс $1-2-3-4-1$ — круговой процесс, или цикл.

Работу, полученную от теплового двигателя, используют для приведения в движение машин и механизмов. Поэтому ее называют *полезной работой* теплового двигателя, а теплоту q_0 , за счет которой эта работа совершена, называют *полезной теплотой*.

1.9.2. Цикл Карно

Пусть рабочее тело (единица массы газа) находится в цилиндре, стенки которого полностью теплоизолированы. Газ при необходимости приходит в соприкосновение с источниками теплоты, имеющими температуру T_1 и T_2 и, следовательно, отдает или получает теплоту. Рассмотрим цикл Карно в pV - и Ts -диаграммах (рис. 1.10). Начальное состояние газа характеризуется точкой 1. От этой точки Карно предложил сначала осуществлять изотермический процесс расширения за счет подвода теплоты q_1 от источника с температурой T_1 . Этот процесс в pV -диаграмме показан изотермой 1-2, а в Ts -диаграмме — прямой, параллельной оси s . От точки 2 дальнейшее расширение совершается в pV -диаграмме по адиабате 2-3, а в Ts -диаграмме по линии 2-3 при постоянной s . От точки 3, которая характеризует конечное состояние рабочего тела (газа) при его расширении, обратный процесс — сжатие осуществляется в pV -диаграмме по изотерме 3-4 (см. рис. 1.10, а), при этом от газа отводится теплота q_2 за счет соприкосновения его с источником, имеющим температуру T_2 . Изотермический процесс 3-4 с отводом теплоты q_2 в Ts -диаграмме изобразится линией, параллельной оси s (см. рис. 1.10, б). Окончание изотермического процесса 3-4 наступает тогда, когда газ, продолжая сжиматься, возвращается в исходную точку 1.

Очевидно, что полезная работа в pV -диаграмме выражается фигурой 1-2-3-4. Ее площадь ограничена двумя изотермами 1-2 и 3-4 и двумя адиабатами, причем 2-3 соответствует процессу расширения, а 4-1 — процессу сжатия. В Ts -диаграмме полезно затраченная теплота q_0 измеряется площадью прямоугольника 1-2-3-4.

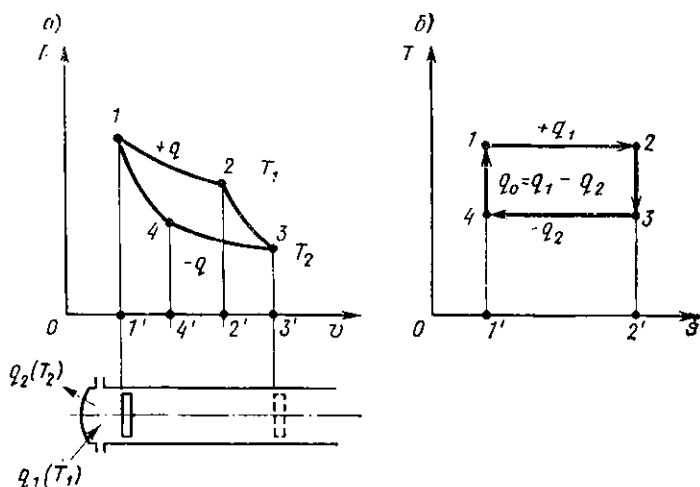


Рис. 1.10. Цикл Карно
а — в p - v -диаграмме; б — в T - s -диаграмме

Термический КПД для рассмотренного обратимого цикла Карно можно выразить в виде

$$\eta_T = (q_1 - q_2)/q_1 = (T_1 - T_2)/T_1 = 1 - (T_2/T_1). \quad (1.69)$$

Из (1.69) следует, что η_T цикла Карно зависит только от разности температур источника подводимой теплоты T_1 и холодильника T_2 . Термический КПД цикла Карно не может быть равным единице, ибо T_2/T_1 не может равняться нулю.

Реальные процессы не могут происходить по обратимому циклу. За счет потерь на трение, теплообмен с окружающей средой и др. они необратимы. Поэтому КПД необратимого цикла Карно будет всегда меньше $1 - (T_2/T_1)$.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

1. Сформулируйте понятие о технической термодинамике.
2. Дайте определение энергии.
3. Что такое термодинамическая система? Какие термодинамические системы по условиям взаимодействия с другими термодинамическими системами вы знаете?
4. Дайте определение понятия «идеальный газ».
5. Что называют термодинамическим параметром и какие основные термодинамические параметры вы знаете?

6. Объясните уравнение состояния идеального газа?
7. Дайте определение теплоемкости вещества. Какие ее виды существуют?
8. Расскажите о смесях газов, параметрах смеси газов.
9. Представьте внутреннюю энергию как функцию параметров состояния.
10. Рассмотрите работу, совершаемую термодинамической системой.
11. Сформулируйте первый закон термодинамики и на его основе расскажите о термодинамических процессах изменения состояния газа.
12. Постройте процессы изменения состояния газа в p - и T -диаграммах.
13. Расскажите о политропном процессе изменения состояния газа и постройте его в p - и T -диаграммах.
14. Сформулируйте второй закон термодинамики и дайте понятие о круговом процессе.
15. Из каких процессов складывается цикл Карно. Напишите зависимость термического КПД цикла Карно.

ГЛАВА 2. ВОДЯНОЙ ПАР

Водяной пар широко применяется в различных отраслях народного хозяйства, причем в основном в качестве теплоносителя в теплообменных аппаратах и как рабочее тело в паросиловых установках. В промышленности строительных изделий и конструкций водяной пар используется для тепловлажностной обработки бетонных и силикатных изделий, для подогрева воздуха в процессах сушки и пароувлажнения изделий. Кроме того, водяной пар идет на нужды отопления и вентиляции производственных зданий и на горячее водоснабжение.

2.1. Понятие о процессе парообразования

Представим себе, что мы заключили 1 кг воды в цилиндр с подвижным поршнем. Температура воды составляет 273 К, абсолютное давление p_0 и удельный объем v'_0 . Для невысоких давлений можно принять энтальпию i'_0 , тоже равную нулю ($i'_0 = E_{i0} + p_0 v'_0$).

При нагреве воды в цилиндре температура ее и удельный объем будут увеличиваться¹. Однако рост температуры прекратится, когда она достигнет некото-

¹ От 0 до 3,98 °С удельный объем воды уменьшается. Этим свойством воды пренебрегаем. После 3,98 °С ее удельный объем начинает увеличиваться.

рой величины, зависящей от давления в цилиндре. При нормальном давлении (0,01013 МПа) эта температура составляет 373 К. Прекращение роста температуры (несмотря на дальнейшую подачу теплоты) объясняется изменением состояния воды — парообразованием, а достигнутая температура — *температурой кипения* — T_k . Каждому давлению соответствует определенная температура кипения. Эта зависимость приводится в справочной литературе.

Так как энтальпия воды при 273 К равна нулю, то энтальпия при нагреве до любой температуры в пределах от 273 до T_k будет измерять количество теплоты, которое было подведено, чтобы получить воду заданной температуры, т. е.

$$i' - i'_0 = i' - 0 = i' = q_p. \quad (2.1)$$

Если по достижении температуры кипения (T_k) продолжать при $p = \text{const}$ подводить теплоту, вода начнет переходить в газообразное состояние — водяной пар. При этом температура воды остается постоянной, а ее объем увеличивается. Это объясняется возрастанием скорости движения молекул воды, которые, преодолевая силу сцепления, переходят в газообразное состояние. При дальнейшем нагревании вся вода превращается в пар с такой же температурой, с которой начинался процесс парообразования. Этот пар как бы насыщает объем, в котором он находится, и поэтому назван *насыщенным паром*, а его температура, равная температуре кипения, названа *температурой насыщения* T_n , следовательно, $T_k = T_n$.

Обозначим удельный объем сухого насыщенного пара v'' , плотность ρ'' , энтальпию i'' . Так как энтальпия кипящей воды i' , то при переходе кипящей воды в насыщенный пар при $p = \text{const}$ подведенное количество теплоты $q_p = i'' - i' = r$. Это количество теплоты r называют *теплотой парообразования*,

$$i'' = i' + r. \quad (2.2)$$

Рассмотрим состояние воды, при котором в пар перешла только часть кипящей воды в количестве x кг. Тогда единица рабочего тела состоит из x кг насыщенного пара и $1 - x$ кг кипящей воды. Такая смесь названа *влажным насыщенным паром*. Состояние рабочего тела,

при котором вся кипящая вода перейдет в пар, называют *сухим насыщенным паром*.

Для характеристики влажного насыщенного пара в разных состояниях по количеству испаренной воды вводят понятия: *степень сухости* x , и *степень влажности* $1-x$. Степенью сухости влажного насыщенного пара называют массовую долю влаги во влажном насыщенном паре.

Обозначим характеристики влажного насыщенного пара v_x , i_x , ρ_x , тогда при условии, что из кипящей воды перешло в пар x кг, количество подведенной для этого теплоты составит rx , т. е. $q_{px} = i_x - i' = rx$, и энтальпия влажного насыщенного пара может быть вычислена по формуле

$$i_x = i' + rx. \quad (2.3)$$

В практике при вычислении объема влажного насыщенного пара или влажного пара пренебрегают объемом воды, находящейся во влажном паре, и объем влажного насыщенного пара считают равным объему x кг сухого насыщенного пара, находящегося в 1 кг влажного насыщенного пара. Тогда удельный объем влажного насыщенного пара подсчитывают по формуле

$$v = v''x. \quad (2.4)$$

Плотность влажного насыщенного пара при тех же условиях составит

$$\rho = 1/(v''x) = \rho''/x. \quad (2.5)$$

Если к сухому насыщенному пару продолжать подводить теплоту при $p = \text{const}$, то его температура и удельный объем начнут возрастать. Образующийся пар с более высокой температурой, чем температура насыщения при данном давлении, называют *перегретым паром*.

Разность между температурой перегретого пара и температурой насыщения называют *степенью перегрева пара*. Следовательно, для перегрева до температуры T_{Π} к сухому насыщенному пару необходимо подвести количество теплоты, равное количеству теплоты для его перегрева, т. е.

$$i = i'' + c_p(T_{\Pi} - T_{\Pi}). \quad (2.6)$$

2.2. Построение процесса парообразования в Ts - и is -диаграммах

Рассмотренный выше процесс парообразования 1 кг воды при 273 К, давлении p_0 , удельном объеме v'_0 при условии нахождения ее в цилиндре с подвижным поршнем представим сначала в Ts -диаграмме (рис. 2.1).

Начальное состояние воды при $i'_0=0$, s'_0 будет равно нулю, и начало кривой процесса пройдет через координаты (273 К; 0) точки 1. Далее идет процесс подогрева воды при $p=\text{const}$ до температуры кипения T_k . Построение изобарного процесса в Ts -диаграмме было рассмотрено ранее, поэтому на этой диаграмме нанесем изобару 1—2. Точка 2 соответствует температуре кипения T_k при давлении p_0 . Дальнейшее подведение теплоты определяет процесс парообразования, который проходит при постоянной температуре T_k , причем этот процесс (см. прямую 2—3) — изотермический. Вся подведенная теплота в этом случае затрачивается на теплоту парообразования.

В точке 3 последняя капля кипящей воды перейдет в пар, и состояние рабочего тела будет соответствовать сухому насыщенному пару. Дальнейший нагрев (см. кривую 3—4) определяет процесс перегрева пара до необходимой температуры перегрева, например до T_n .

В Ts -диаграмме, как установлено ранее, площадь фигуры под кривой обратимого процесса 1-2-3-4 соответствует количеству теплоты, подведенному к рабочему телу. Тогда площадь под изобарой 1—2 соответствует теплоте q' , подведенной к жидкости, площадь под изотермой 2—3 — теплоте r , израсходованной на парообразование, а площадь под изобарой 3—4 — теплоте, затраченной на перегрев пара q_n .

Далее процесс парообразования ведем при более высоком давлении $p_1 > p_0$ и при условии, что $p_1 = \text{const}$. В этом случае процесс нагрева воды, хотя и начнется в точке 1, но изобара будет идти не до точки 2, а до точки 2', так как температура кипения воды повысится. В точке 2' начнется процесс парообразования. На процесс парообразования при более высокой температуре требуется меньше теплоты. Уменьшение теплоты идет как за счет снижения теплоты парообразования r , так и за счет повышения температуры, ибо $\Delta s = s'' - s' = r/T$,

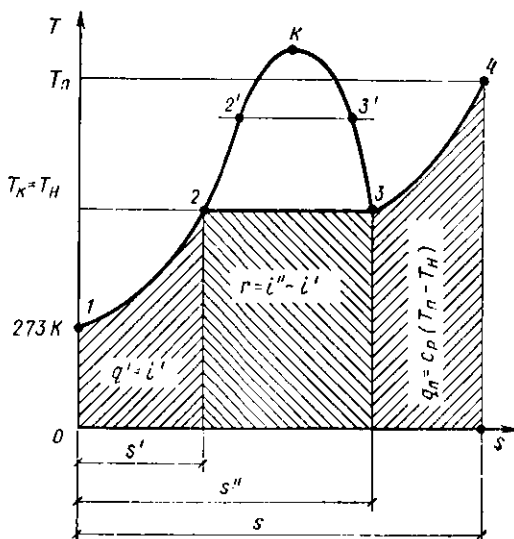


Рис. 2.1. Процесс парообразования в Ts -диаграмме

снижается. В этом случае процесс парообразования идет до точки $3'$.

При нанесении на диаграмму изобар с более высоким давлением тенденция снижения расхода теплоты на парообразование сохраняется. В какой-то критической точке, назовем ее K , изотерма $2-3$ исчезнет и превратится в точку K . Такое давление называют *критическим*. Процесс испарения при критическом давлении приводит к тому, что закипевшая вода мгновенно обращается в сухой пар.

Кривая $1-K$ получила название *нижней пограничной кривой*, а $K-3$ — *верхней пограничной кривой*. Нижняя пограничная кривая характеризует состояние кипящей воды. Область левее нижней пограничной кривой — жидкость, область верхней пограничной кривой — сухой насыщенный пар, а область правее и выше этой кривой — перегретый, но ненасыщенный пар. Между нижней и верхней пограничными кривыми расположена область влажного пара.

Для анализа процессов и циклов водяного пара широко применяется is -диаграмма (рис. 2.2). В ней, в отличие от Ts -диаграммы, параметрами состояния являют-

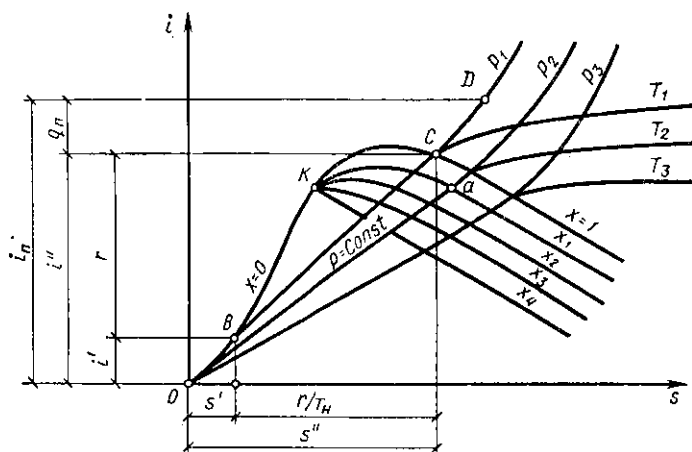


Рис. 2.2. is -диаграмма водяного пара

ся: теплота нагрева жидкости до кипения q' , теплота парообразования r , энтальпия кипящей воды i' , энтальпия сухого насыщенного пара i'' , а также энтальпия перегретого пара i_n представлены не площадями, а линиями. В is -диаграмме на оси абсцисс откладываем значения энтропии s , на оси ординат значения энтальпии i . За начало отсчета принята нулевая точка — начало осей координат.

При составлении is -диаграммы по данным таблиц водяного пара сначала наносим нижнюю пограничную кривую ($x=0$). Координатами точек нижней пограничной кривой являются значения величин i' и s' , т. е. значения энтальпии и энтропии кипящей воды. Получаем кривую $0-K$. Координаты точек верхней пограничной кривой ($x=1$) обозначают значения величин i'' и s'' сухого насыщенного пара. Возьмем на нижней пограничной кривой точку B с координатами s' и i' , соединим ее прямой линией с точкой C на верхней пограничной кривой, координаты которой s'' и i'' .

Точки C и B , лежащие на пограничных кривых, характеризуются одинаковым давлением. В этом случае расстояние между точками C и B по горизонтали равно $s''-s'=r/T_n$, а по вертикали равно $i''-i'=r$. Прямая, соединяющая точки B и C , — изобара ($p=\text{const}$). При $p=\text{const}$ величины s', i' и T_n постоянны, следовательно,

уравнение, связывающее координаты s'_i и i' , должно быть уравнением прямой линии. В области перегретого пара, т. е. над верхней пограничной линией, изобары переходят в кривые с небольшой выпуклостью к оси абсцисс.

Кривые постоянной степени сухости пара получают путем деления отрезков изобар (например, $B-C$) между пограничными линиями на равное число долей и соединяют одноименные точки деления. Линии постоянной сухости пара x_1, x_2, x_3 и т. д. берут свое начало от критической точки K .

Изотермы на is -диаграмме показаны линиями, идущими слева направо, но более полого, чем изобары. На практике is -диаграмму применяют не для всей области насыщения, а для части, используя более крупный масштаб.

С помощью is -диаграммы определяют параметры пара по двум известным параметрам для влажного насыщенного и перегретого пара. Параметры сухого насыщенного пара могут быть определены по одному, известному, параметру (вторым параметром является $x=1$). Например, чтобы определить температуру влажного пара, заданного его давлением p_2 и степенью сухости x (точка a), необходимо из точки a подняться по изобаре p_2 до верхней пограничной кривой. В этом случае изотерма T_2 , ведущая свое начало в точке пересечения изобары p_2 с верхней пограничной кривой, определит искомую температуру влажного пара, одинаковую с температурой сухого насыщенного пара.

На диаграмме легко определить и количество теплоты, затрачиваемое на испарение в изобарном процессе от точки B до точки C : $r=i''-i'$. Если в этом же изобарном процессе перегревать пар до точки D , то необходимо затратить на перегрев количество теплоты $q_{\text{п}}=i_{\text{п}}-i''$ (см. рис. 2.2).

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

1. Дайте характеристику видам водяного пара.
2. Перечислите параметры, определяющие каждый вид пара.
3. Как построить процесс парообразования в Ts -диаграмме?
4. Рассмотрите принцип построения is -диаграммы?
5. Расскажите о применении водяного пара в промышленности строительных изделий, материалов.

ГЛАВА 3. ВЛАЖНЫЙ ВОЗДУХ

Смесь воздуха с водяным паром называют влажным воздухом. Влажный воздух широко применяется в технологии строительных изделий для сушки, охлаждения материалов после обжига и других целей. Для расчетов, в которых участвует влажный воздух, с достаточной точностью могут быть применены все теоретические положения, приведенные в гл. 1, о смеси идеальных газов. Однако необходимо помнить, что сухой воздух может быть только в виде газа, а влажный при различных температурах может встречаться в жидком, твердом и газообразном состояниях.

3.1. Основные определения влажного воздуха

В соответствии с законом Дальтона для газовых смесей общее давление влажного атмосферного воздуха

$$p = p'_n + p'_n, \quad (3.1)$$

где p — барометрическое давление; p'_n и p'_n — соответственно парциальные давления сухого воздуха и водяного пара в смеси.

Обычно в технике приходится иметь дело с ненасыщенным влажным воздухом, в котором водяной пар находится в перегретом состоянии. В таком воздухе находится не максимальное количество водяного пара при данной температуре, и этот воздух способен к дальнейшему увлажнению. Основные параметры влажного воздуха: абсолютная влажность, относительная влажность, влагосодержание.

Абсолютной влажностью воздуха Φ называют количество водяного пара, содержащегося в единице объема влажного воздуха. Так как объем пара в смеси равен объему смеси, то абсолютная влажность воздуха представляет собой плотность водяного пара ρ_n при его парциальном давлении p'_n и температуре смеси.

Относительной влажностью воздуха ϕ называют отношение его абсолютной влажности ρ_n к максимально возможной $\rho_{\max}$ при данном давлении и температуре

$$\phi = \rho_n / \rho_{\max}. \quad (3.2)$$

Учитывая, что при атмосферном давлении парциальное давление водяного пара в насыщенном воздухе мало, такой пар можно считать идеальным газом, и по

закону Бойля—Мариотта отношение $p_n/p_{\max}$ можно заменить отношением парциальных давлений

$$\varphi = p'_n / p'_{\max}, \quad (3.3)$$

где $p'_{\max}$ — парциальное давление пара при максимальном его содержании в смеси для данных условий.

Относительную влажность воздуха измеряют в долях единицы или в процентах.

Температуру, до которой необходимо охладить ненасыщенный влажный воздух при постоянном давлении, чтобы он стал насыщенным, называют *точкой росы*.

Влагосодержанием воздуха d называют количество водяных паров в граммах, содержащихся в 1 кг сухого воздуха.

Если обозначить массу водяного пара в 1 кг влажного воздуха m_n и массу сухого воздуха также в 1 кг влажного воздуха m_v , то влагосодержание d можно выразить

$$d = m_n / m_v, \quad (3.4)$$

Обе массы выразим с помощью уравнения Клапейрона

$$m_n = (p'_n v_n) / (R_n T); \quad m_v = (p'_v v_v) / (R_v T), \quad (3.5)$$

где v_n и v_v — объемы обоих компонентов при своих парциальных давлениях p'_n и p'_v , равные объему влажного воздуха $v_{nv} = v_n = v_v$.

Подставим в формулу (3.4) значения m_n и m_v из (3.5), примем $R_n = 462 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ и $R_v = 287 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$, а $p'_v = p - p'_n$, получим для d , кг/кг,

$$d = 287/462 p'_n / (p - p'_n) = 0,622 p'_n / (p - p'_n); \quad (3.6)$$

для d , г/кг,

$$d = 622 p'_n / (p - p'_n). \quad (3.7)$$

Энтальпию влажного воздуха J_{vv} относят к 1 кг сухого воздуха в паровоздушной смеси и определяют как сумму энтальпий сухого воздуха i_v и водяного пара di_n , т. е.

$$J_{vv} = i_v + di_n, \quad (3.8)$$

где i_n — энтальпия 1 кг водяного пара; d — количество влаги, содержащейся в 1 кг влажного воздуха.

Если $c_p = \text{const}$, то энтальпия сухого воздуха $i_v = c_p t^0_v$, где t^0_v — температура воздуха.

Тогда

$$J_{\text{вв}} = c_p t_n^0 + d t_n, \quad (3.9)$$

Энтальпия водяного пара l_n может быть определена по теплотехническим таблицам.

3.2. Jd -диаграмма влажного воздуха

Удельный расход теплоты и влажного воздуха в сушильных установках проще всего рассчитывать графическим методом с помощью Jd -диаграммы. В Jd -диаграмме¹ строят теоретический и действительный процессы работы влажного воздуха (в качестве сушильного агента) по отбору (*ассимиляции*) влаги от материала, подвергаемого сушке.

По оси ординат (рис. 3.1) откладывают значения энтальпий J , по оси абсцисс, расположенной под углом 135° к оси ординат, значения влагосодержаний воздуха d . Значения d указывают не на самой оси, а на вспомогательной горизонтальной оси. Перенос значений с оси абсцисс на вспомогательную выполнен по вертикали. Для определения координат точки I проводят из нее линии, параллельные осям координат, и читают значения так, как показано на рис. 3.1. Кроме этих осей

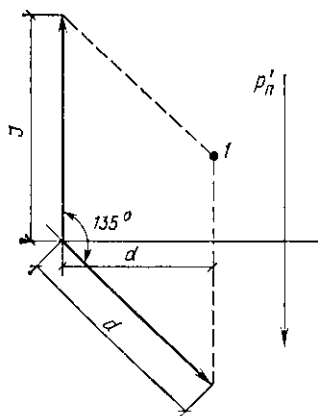


Рис. 3.1. Схема расположения осей координат в Jd -диаграмме

¹ Jd -диаграмма была предложена проф. Рамзиным Л. К. для расчета сушильных процессов.

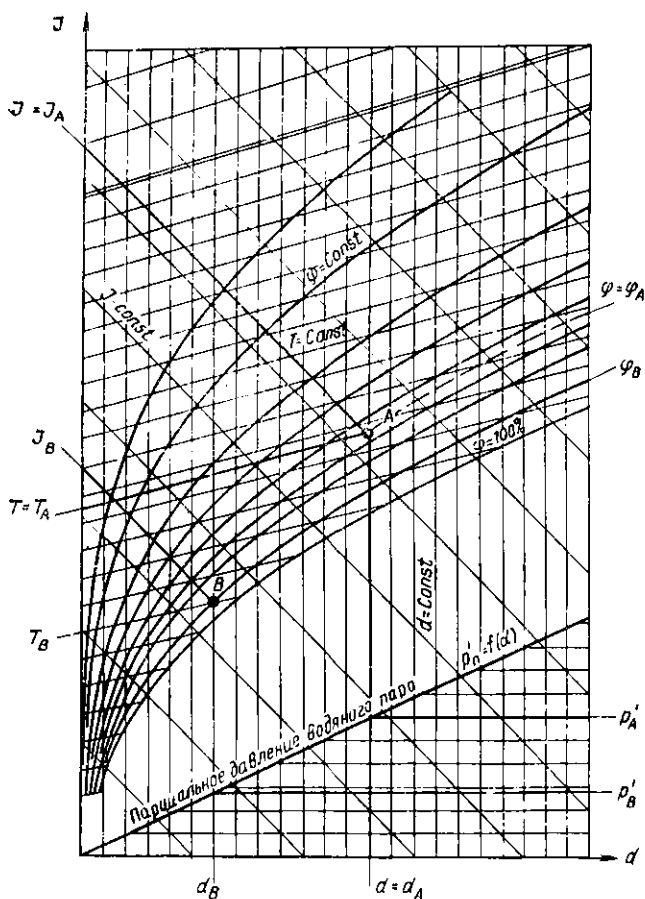


Рис. 3.2. Схема определения параметров паровоздушной смеси в I - d -диаграмме

справа проводят ось ординат, на которой откладывают значения парциальных давлений пара, находящегося во влажном воздухе.

На рис. 3.2 представлена схема I - d -диаграммы. Кроме значений энтальпий I , влагосодержаний d , парциальных давлений водяного пара в воздухе $p'_n = f(d)$ на рис. 3.2 нанесены линии равнозначных относительных влажностей $\varphi = \text{const}$ и изотерм $T = \text{const}$.

Если в I_d -диаграмме задана какая-либо точка, например A , то по ее положению можно определить все параметры состояния влажного воздуха: энтальпию I_A , влагосодержание d_A , относительную влажность ϕ_A , температуру T_A , парциальное давление водяного пара во влажном воздухе p'_A .

Наоборот, если состояние воздуха задано двумя какими-либо параметрами (чаще всего ϕ и T), на пересечении их линий находим точку, а по этой точке — другие параметры. Например, задано ϕ_B и T_B , найдем точку B , по точке B определим (аналогично с точкой A) все другие параметры.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

1. Дайте понятие о влажном воздухе и его применении при тепловой обработке строительных изделий.
2. Расскажите о влагосодержании воздуха и параметрах, его определяющих.
3. Что называют абсолютной и относительной влажностью воздуха?
4. Опишите принцип построения и координируемые параметры I_d -диаграммы.

ГЛАВА 4. ОСНОВЫ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА. ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ

Тепловая обработка материалов и изделий во многом определяет качество готовой продукции. При тепловой обработке материала в нем происходят физико-химические превращения, формируется его структура, идут процессы тепло- и массообмена, возникает напряженное состояние. Эти процессы подчиняются основным законам физики и химии.

В каждой установке, в которой производится тепловая обработка материалов и изделий, создается свой тепловой режим.

Тепловой режим представляет собой совокупность создаваемых для обработки материалов и изделий тепловых, массообменных и гидродинамических процессов. За счет созданного теплового режима в материалах происходят физико-химические процессы, например твердение, спекание, вспучивание и т. п.

4.1. Основные понятия о тепловой обработке

При тепловом режиме рабочее тело (газ, воздух, пар) воздействует на обрабатываемый материал. Это воздействие принято называть *тепло- и массообменным процессом*. Тепло- и массообменный процесс — *закономерная совокупность теплового и массообменного воздействия на материал (исходное сырье) с целью придания ему заданных свойств*.

Тепловые и массообменные процессы проводят в специально предназначенных для этого устройствах: печах, сушилках, камерах тепловой обработки. Так как массообменные процессы зависят от количества переданной теплоты материалу, то установки, в которых проходят тепло- и массообменные процессы, в целом принято называть *тепловыми установками*. Главное отличие тепловой установки от любого теплообменного аппарата или теплового двигателя — использование в ней тепловой энергии для технологической переработки материала. Эффективность работы тепловой установки оценивается количеством полезно использованной в ней тепловой энергии.

4.2. Классификация способов тепловой обработки

Существует много способов тепловой обработки строительных материалов (изделий). Следует выделить два. Первым способом обрабатывают материалы, из которых не надо удалять влагу для придания им строительных свойств, например бетонные и железобетонные изделия, твердеющие только во влажных условиях, ибо при их твердении требуется влага для гидратации цемента.

Первый способ, предусматривающий тепловую обработку материалов с сохранением в нем влаги, называют *тепловлажностным*.

Вторым способом обрабатывают материалы, в которых тепловая обработка начинается с удаления влаги. Процесс удаления влаги из материала называют *сушкой*. Сушка может быть конечной стадией тепловой обработки (например, при получении теплоизоляционных, декоративно-акустических и гипсовых изделий, заполнителей бетона и др.) или промежуточной, сопровождающейся последующей высокотемпературной обработ-

кой (например, при обжиге, вспучивании, спекании и плавлении).

Обжигу подвергают керамические и некоторые теплоизоляционные изделия. *Обжигом* называют тепловую обработку изделия с целью придания ему заданных свойств в результате физико-химических превращений, проходящих в изделии при высоких температурах. Так, при обжиге кирпича-сырца за счет удаления влаги и сближения в результате этого частиц материала, вследствие фазовых и физико-химических превращений, а также частичного образования жидкой фазы изделие получает новые свойства.

Вспучивание применяют для получения высокопористой структуры материалов с преобладанием закрытой пористости. *Вспучиванием* называют процесс увеличения объема сформованного изделия (или частиц материала), происходящий за счет внутреннего газовыделения при высокой температуре; так, например, получают керамзит — легкий заполнитель бетона.

Спекание применяют для получения высокопористой структуры материалов с преобладанием открытой пористости. Спеканием называют соединение в конгломерат сыпучего материала вследствие сжигания распределенного внутри его топлива при интенсивном просасывании воздуха. Например, при сжигании топлива внутри глиняной шихты за счет фазовых, физико-химических процессов, частичного газовыделения и прососа воздуха образуется спекшийся конгломерат, из которого путем дробления получают аглопорит — легкий заполнитель бетона.

Плавление. Для тепловой изоляции широко используют шлаковую и минеральную вату, получаемую различными методами из расплавленного шлакового или минерального сырья. Плавлением называют перевод минерального сырья из твердого в жидкотекучее состояние в результате теплового воздействия.

4.3. Влажный материал, подвергаемый тепловой обработке

Все материалы, подвергаемые тепловой обработке, представляют собой неоднородные (гетерогенные) системы, в которых одновременно присутствуют три фазы агрегатного состояния. Твердая фаза — основа структуры

изделия, жидкая фаза — вода, заполняющая поры материала, газообразная — воздух, пары воды и газы.

Газы могут быть продуктом химических реакций, происходящих в материале. Они также образуются в результате испарения воды или вовлечения воздуха при перемешивании массы и формовании изделий.

Влажные материалы в зависимости от их свойств делят на три вида, условно называемые телами.

Первый вид — *коллоидные тела*. Они характеризуются сохранением эластичных свойств даже после удаления из них влаги. Эти тела (например, желатин) в строительстве пока не применяются.

Второй вид — *капиллярно-пористые тела*. При удалении влаги из таких тел они становятся хрупкими. К ним относятся кварцевый песок и древесный уголь.

Третий вид — *капиллярно-пористые коллоидные тела*. Для таких тел характерны процессы набухания и усадки. При увлажнении они (за счет увеличения слоя воды между отдельными частицами) увеличиваются в размерах — набухают. При отборе влаги эти тела уменьшаются в объеме, претерпевают усадку. При погружении в жидкость они могут либо ограниченно набухать, либо растворяться в ней. К этому виду относятся все материалы, подвергаемые тепловой обработке.

Увлажнение материала и отбор от него влаги сопровождают практически все технологические процессы (формование, сушку, тепловлажностную обработку и др.). Увлажняя материал или отбирая от него влагу мы изменяем его энергетическое состояние. Поэтому в технологии широко используется *энергетическая классификация форм связи влаги с материалом*, предложенная академиком П. А. Ребиндером.

По этой классификации существуют три формы связи влаги с материалом.

Первая — *химическая связь* влаги с материалом. Химически связанная влага входит в состав кристаллических решеток материала, прочно удерживается материалом и разрушается только с разрушением кристаллических решеток при высоких (900—1100 К) температурах. На разрушение этой связи затрачивается наибольшее количество энергии.

Вторая менее прочная — *физико-химическая связь* влаги с материалом, осуществляемая адсорбционными и осмотическими силами. Эту влагу называют *адсорб-*

ционной и осмотической. Адсорбционная влага захватывается внешней поверхностью материала под действием нескомпенсированного силового поля молекул, находящихся на этой поверхности. Осмотическая влага проникает в капиллярно-пористое коллоидное тело, состоящее из замкнутых пор, через стенки путем избирательной диффузии за счет сил осмотического давления.

Физико-химически связанная влага также достаточно прочно удерживается материалом, однако для ее удаления тратится значительно меньше энергии. Поэтому процесс удаления физико-химически связанной влаги идет при температурах, не превышающих 373 К.

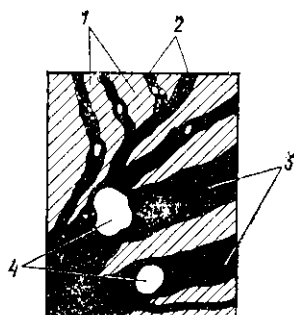
Третья — *физико-механическая связь* влаги с материалом. Она осуществляется за счет влаги, заполняющей макро- и микрокапилляры, а также влаги смачивания. Макрокапилляры — капилляры с радиусом 10^{-5} см — заполняются влагой только при непосредственном соприкосновении с водой, но не сорбируют влагу из воздуха. Микрокапилляры — с радиусом менее 10^{-5} см — вследствие сил капиллярного давления могут сорбировать влагу из воздуха. Влага смачивания связывается с материалом только при их непосредственном соприкосновении.

Физико-механическая связь влаги с материалом — самая слабая, она нарушается даже при воздушном хранении изделий. При парциальном давлении водяных паров в окружающем воздухе меньшем, чем у поверхности материала, изделие будет отдавать влагу воздуху. При парциальном давлении водяных паров у поверхности материала, меньшем чем в окружающем воздухе, изделие будет сорбировать влагу из воздуха.

Физическая модель влажного материала дана на рис. 4.1. Материал представлен твердым телом 1, расположенными в нем микро-2 и макро-3 капиллярами, заполненными влагой. Внутри капилляров заключены пузырьки воздуха 4.

Рассматривая такую модель материала, необходимо отметить, что в процессе тепловой обработки три фазы — твердая, жидкая, газообразная — в количественном отношении все время меняются. Возьмем бетон и выделим частицу цементного клинкера, находящегося на поверхности капилляра. Эта частица гидратируется. За счет гидратации возникают новообразования, например $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot m\text{H}_2\text{O}$ и др.

Рис. 4.1. Физическая модель влажного материала



Поверхность частицы увеличивается, образует гель, который в результате отсоса влаги в глубинные слои частицы начинает твердеть. Увеличение размера частицы приводит к уменьшению размера капилляра в этом месте и перераспределению влаги. В материале все время идет перераспределение влаги, изменяются радиусы капилляров, а следовательно, перемещаются влага, воздух и газы. Таким образом, в любом материале во время тепловой обработки идут процессы, которые количественно изменяют соотношение фаз: твердой, жидкой и газообразной.

4.4. Понятие о тепловых установках, материальном и тепловом балансах

Ранее тепловой установкой называли агрегат или устройство, в котором проводили тепловую обработку изделий или материалов. С развитием промышленности понятие тепловой установки изменилось. В настоящее время тепловой установкой называют сложный комплекс, состоящий из устройства, в котором проводят тепловую обработку, системы автоматического регулирования такой обработки и электронно-вычислительной машины (ЭВМ), определяющей и регулирующей ход процесса. Далее при изложении материала устройство, в котором непосредственно проводят тепловую обработку, будем традиционно называть тепловой установкой.

По организационно-технологической структуре тепловые установки делят на *периодические* и *непрерывного действия*.

Периодическая установка работает по замкнутому

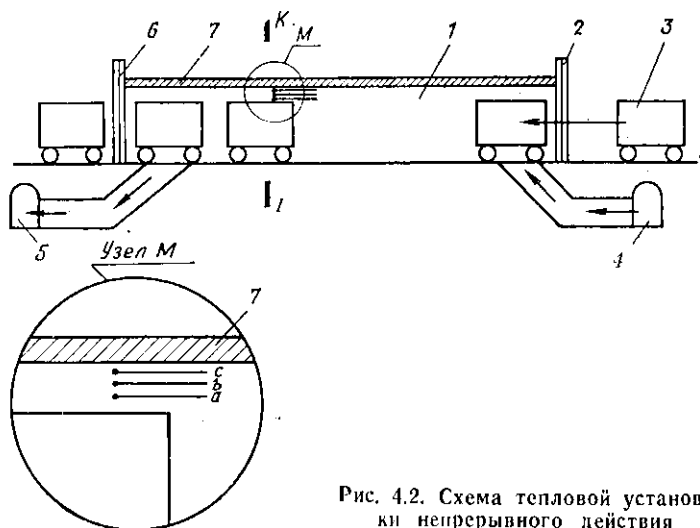


Рис. 4.2. Схема тепловой установки непрерывного действия

циклу. Сначала ее загружают материалом, затем проводят его тепловую обработку, после чего из установки выгружают готовую продукцию. Далее цикл повторяется. В каждой пространственной точке рабочей камеры периодически действующей установки температура изменяется во времени. Такой режим принято называть *нестационарным*.

Установку непрерывного действия постоянно или с небольшим интервалом загружают материалом; его выгрузка также идет непрерывно или с интервалами. Материал продвигается по установке, в каждой ее точке или на каждом участке поддерживается определенная температура. Работа таких установок приближается к стационарному режиму. В практике такой режим называют *стационарным или квазистационарным*, т. е. приближающимся к стационарному.

Принципиальная схема тепловой установки непрерывного действия дана на рис. 4.2. В тепловую установку 1 подается материал вагонеткой 3. Для его загрузки и выгрузки открывают двери 2 и 6. Вагонетку заталкивают в установку, а из двери 6 выгоняют вагонетку с обработанными изделиями. После чего двери закрывают. Такая установка непрерывного действия будет загружаться и разгружаться с небольшими интервалами.

Для обработки материала в установку через канал 4 подается рабочее тело (газообразные продукты горения топлива или нагретый воздух), которое принято называть теплоносителем. Отработанный теплоноситель отбирается через канал 5.

В такой непрерывно действующей установке организован с достаточным приближением для практических расчетов *стационарный режим*.

Работа установки заключается в следующем: теплоноситель, имеющий более высокую температуру, чем материал, отдает тепловую энергию материалу, и он нагревается. Теплоноситель охлаждается и уже отработанный удаляется из тепловой установки. Для оценки работы тепловой установки составляют материальные и тепловые балансы.

Материальные балансы. В основу материальных балансов положен закон сохранения массы, изученный в курсе физики. По этому закону масса загружаемого в тепловую установку материала в единицу времени ΣG_3 должна быть равна массе выгружаемой из установки продукции ΣG_n за ту же единицу времени

$$\Sigma G_3 = \Sigma G_n. \quad (4.1)$$

В действительных условиях наблюдаются необратимые потери массы: при транспортировке, удалении из материала влаги, за счет химических реакций, при которых выделяются газообразные продукты и др.

Обозначим эти потери ΣG_n , тогда конечное уравнение материального баланса можно записать в виде

$$\Sigma G_3 = \Sigma G_n + \Sigma G_n. \quad (4.2)$$

Для расчета применяют уравнение (4.2).

Материальные балансы составляют для всей установки непрерывного действия или для ее отдельной зоны, участка. Для периодической установки материальные балансы составляют либо на цикл работы, либо на единицу перерабатываемой массы материала.

Тепловые балансы. Согласно закону сохранения энергии, количество введенной в процесс энергии равно количеству энергии, полученному в результате процесса. В тепловую установку за единицу времени поступает материал, содержащий тепловую энергию $Q_{мл}$ и теплоноситель, обладающий тепловой энергией $Q_{тп}$. Из установки за ту же единицу времени отводится отработанный

теплоноситель с содержанием тепловой энергии $Q_{тк}$ и прошедший тепловую обработку материал с содержанием тепловой энергии $Q_{мк}$.

Так как в тепловой установке температура, при которой происходит обмен теплотой между теплоносителем и материалом, выше, чем в окружающей среде, то значительная часть теплоты через ограждения будет теряться в окружающую среду (при открывании дверей и через неплотности установки, а также на нагрев транспортных устройств). Хорошая теплоизоляция ограждений и их герметизация позволяют улучшить работу тепловых установок. Потери теплоты каждой тепловой установкой уточняются в каждом конкретном случае.

Обозначим эти потери за ту же единицу времени $Q_{п}$. Тогда уравнение теплового баланса для рассмотренной тепловой установки может быть записано

$$Q_{мл} + Q_{тп} = Q_{мк} + Q_{тк} + Q_{п} \quad (4.3)$$

или в общем виде уравнение теплового баланса записывается

$$\Sigma Q_{пр} = \Sigma Q_{р} + \Sigma Q_{п}, \quad (4.4)$$

где $\Sigma Q_{пр}$ — сумма приходных статей теплоты; $\Sigma Q_{р}$ — сумма расходных статей теплоты; $\Sigma Q_{п}$ — суммарные потери теплоты в установке.

Тепловой баланс, как и материальный, составляют за единицу времени для всей установки непрерывного действия либо для ее зоны (части). Тепловой баланс периодической установки составляют на цикл работы или на единицу перерабатываемой массы.

Тепловой баланс предназначен для анализа работы тепловых установок с целью установления их КПД и определения удельного расхода теплоты на единицу перерабатываемого материала, для чего необходимо из (4.3) подсчитать значение $Q_{тп}$ и отнести его к количеству перерабатываемого материала $G_{м}$

$$Q_{уд} = Q_{тп} / G_{м}. \quad (4.5)$$

4.5. Особенности тепло- и массообмена

Обмен теплотой между теплоносителем и материалом является только частью сложного процесса, протекающего в тепловой установке. Под воздействием теплоты и парциального давления водяных паров у поверх-

ности материала $p'_{\text{пм}}$ и в теплоносителе $p'_\text{т}$ влага либо испаряется с поверхности материала либо конденсируется на ней. В редких случаях (при $p'_{\text{пм}} \neq p'_\text{т}$) процесс теплообмена не сопровождается испарением или конденсацией влаги.

В общем случае, когда $p'_{\text{пм}} \neq p'_\text{т}$, процесс теплообмена сопровождается и процессом влагообмена между теплоносителем и материалом. Пусть $p'_{\text{пм}} > p'_\text{т}$, в этом случае с поверхности материала влага начнет испаряться, и она будет поглощаться (ассимилироваться) теплоносителем. Место испаренной влаги из материала (порозное пространство) занимает влажный воздух из теплоносителя. Следовательно, материал кроме теплоты будет обмениваться с теплоносителем влагой и воздухом, т. е. идет процесс взаимодействия материала и теплоносителя, называемый тепло- и массообменом.

Кроме тепло- и массообмена при тепловой обработке в материале происходят процессы термического расширения, ускоряются возможные химические реакции составляющих и протекают другие сопутствующие процессы. В целом процесс тепловой обработки материала достаточно сложен, поэтому сначала рассмотрим основные определения, происходящие при тепло- и массообмене.

4.5.1. Основные определения

Для анализа условий тепло- и массообмена воспользуемся тем же рис. 4.2. Пусть в установку поступает из канала 4 нагретый воздух с температурой $T_\text{в}$, которая выше температуры материала $T_\text{м}$, т. е. $T_\text{в} > T_\text{м}$. Парциальное давление водяных паров вблизи поверхности материала $p'_{\text{пм}}$ больше парциального давления водяных паров в теплоносителе $p'_\text{в}$, т. е. $p'_{\text{пм}} > p'_\text{в}$.

Несмотря на приближенно *стационарный режим* даже в одном сечении установки (например, в сечении KL) в ней наблюдаются неодинаковые температуры.

Выделим в сечении KL три слоя, условно обозначенные a , b , c , и изобразим их отдельно (см. узел M). Слой, окружающий точку a , отдает теплоту материалу и, следовательно, должен иметь температуру несколько меньшую, чем температура у слоя b , который отдает теплоту слою a . Слой c обменивается теплотой со слоем b и с другими слоями, причем крайний слой отдает

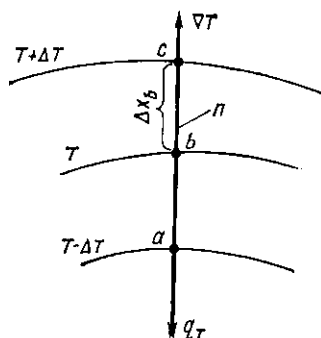


Рис. 4.3. Схема расслоения температур в тепловой установке

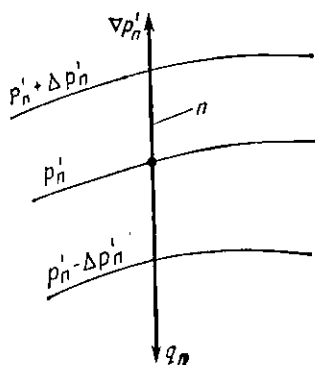


Рис. 4.4. Схема расслоения парциального давления водяных паров в тепловой установке

часть теплоты ограждающей конструкции 7. В результате все слои будут иметь различные температуры. Такое расслоение температур по слоям теплоносителя называют *неоднородностью теплового поля в установке*.

Геометрическое место точек в движущемся слое нагретого воздуха (если рассматривать его на какой-то небольшой длине установки), имеющих одинаковую температуру, образует *изотермическую поверхность*. Таких изотермических поверхностей в потоке теплоносителя графически можно провести очень много. Рассмотрим опять три слоя *a, b, c*. Пусть слой *a*, толщина которого $t \rightarrow 0$, имеет температуру $T - \Delta T$, слой *b* имеет температуру T , слой *c* имеет температуру $T + \Delta T$. Покажем эти изотермические поверхности на рис. 4.3. Наиболее резкое изменение температуры наблюдается по нормали к изотермической поверхности, а поэтому проведем перпендикуляр n к этим поверхностям.

Как известно из математики и физики, предел отношения разности температур ΔT к расстоянию по нормали между изотермическими поверхностями Δx называют температурным градиентом и обозначают ∇T , т. е.

$$\lim (\Delta T / \Delta x)_{\Delta x \rightarrow 0} = dT / dx = \nabla T. \quad (4.6)$$

Температурный градиент ∇T определяет количество переносимой теплоты и является своеобразной движущей силой передачи этой теплоты. Количество переноси-

мой теплоты называют *тепловым потоком*. Тепловой поток, отнесенный к единице поверхности, называют *плотностью теплового потока* и обозначают q_T . Градиент температур, как и тепловой поток,—векторная величина. Учитывая, что теплота распространяется от более нагретых тел к менее нагретым, вектор q_T на рис. 4.3 показан в направлении от T к $T-\Delta T$. Вектор градиента температур ∇T принято изображать в направлении, противоположном направлению вектора q_T .

Очевидно, что при расслоении температур в потоке должно существовать и расслоение влагосодержания d . В потоке имеется какое-то среднее парциальное давление водяных паров $p'_{\text{п.}}$. С уменьшением температуры в потоке необходимо уменьшить парциальное давление водяного пара p'_a , чтобы сохранить в воздушной среде установки ту же относительную влажность.

Возвращаясь к потокам нагретого воздуха, обтекающим точки a, b, c , с различной температурой в них (см. рис. 4.2), отметим, что парциальное давление водяных паров в слоях также должно быть неодинаково. Если установка, показанная на рис. 4.2,—пропарочная камера, где в качестве теплоносителя используется пар, то в первый период влага из теплоносителя конденсируется на поверхности изделия, т. е. парциальное давление водяных паров в точке a меньше, чем в точке b ; $p'_{\text{п}(a)} < p'_{\text{п}(b)}$. Следовательно, в установке существуют какие-то поверхности, в которых парциальное давление будет одинаково и по аналогии с изотермическими поверхностями можно представить поверхности с равным парциальным давлением водяных паров (рис. 4.4).

За счет разности парциальных давлений слои нагретого воздуха будут обмениваться со слоем водяного пара. Причем водяной пар будет двигаться от слоев с большим парциальным давлением к слоям с меньшим парциальным давлением. Вектор потока водяного пара $q_{\text{п.}}$, как и вектор градиента давления водяного пара $\nabla p'_{\text{п.}}$, показаны на рис. 4.4. Механизм расслоения температур и влагосодержаний в потоке носит условный характер. В реальных условиях за счет скорости движения теплоносителя происходит естественная циркуляция, и такого резкого расслоения не наблюдается.

Мы условились, что в установку (см. рис. 4.2) подается теплоноситель с парциальным давлением водяных паров $p'_в$, отличным от парциального давления во-

дяных паров вблизи поверхности материала $p'_{\text{пм}}$. Следовательно, кроме нагрева материала происходит процесс обмена влагой между теплоносителем и влажным материалом. Причем этот процесс может идти как от нагретого теплоносителя к материалу, так и наоборот. Если $p'_{\text{пм}} > p'_в$, материал начнет отдавать влагу нагретому теплоносителю. Процесс удаления влаги из материала называют его *сушкой*.

Если парциальное давление водяного пара у поверхности материала $p'_{\text{пм}}$ меньше парциального давления водяного пара теплоносителя $p'_в$, т. е. $p'_{\text{пм}} < p'_в$, то теплоноситель будет отдавать влагу материалу. В этом случае идет процесс увлажнения материала. Если $p'_{\text{пм}} = p'_в$, влагообмен между материалом и теплоносителем не происходит.

При отдаче влаги материалом его поры освобождаются. Место влаги (освобожденные поры) занимает газообразный теплоноситель. Наоборот, при конденсации влаги на поверхности материала влага диффундирует в поры материала, вытесняя из них газообразный теплоноситель и находившийся в них ранее воздух.

В целом переход вещества из одной фазы в другую через разделяющие их поверхности, или передвижение вещества в пределах одной фазы, называют *массообменным процессом*.

В массообменных процессах различают массоотдачу и массопередачу. Под *массоотдачей* понимают перенос вещества в объеме одной фазы. *Массопередачей* называют переход вещества из одной фазы в другую через разделяющую их поверхность.

В рассмотренном на рис. 4.2 примере имеется две фазы: твердая — обрабатываемый материал и газообразная — теплоноситель. Поверхностью раздела фаз является поверхность материала. Разность концентраций вещества в данном случае определяется разностью парциальных давлений у поверхности материала водяного пара и теплоносителя. Следовательно, испарение влаги с поверхности материала или ее конденсация на поверхности материала при соприкосновении с теплоносителем будет массопередачей между материалом и теплоносителем. Движение влаги внутри материала, сопровождающееся вытеснением из пор материала воздуха, а также подсасыванием в поры материала теплоносителя или воздуха — массоотдача.

В дальнейшем, рассматривая массообменные процессы, будем говорить только о движении влаги, движение воздуха внутри материала в этом случае будет подразумеваться как обязательное.

Практически массообмен происходит при всех видах тепловой обработки строительных изделий. Например, в процессе сушки влажных материалов влага с поверхности испаряется и ассимилируется теплоносителем, при этом влага внутренних слоев продвигается к поверхности испарения. В процессе тепловлажностной обработки пар конденсируется на более холодной поверхности изделий и увлажняет их с дальнейшим продвижением влаги в центральные слои изделия. В процессах обжига, спекания, вспучивания и плавления при повышении температуры от 873 до 973 К сначала удаляется из материала в теплоноситель химически связанная влага, далее выгорают органические примеси, продукты горения переходят в теплоноситель и т. д. Поэтому в теплоносителе, за счет которого происходит тепловая обработка, все время происходит обмен массы через поверхность обрабатываемого материала.

Для того чтобы процесс массообмена между теплоносителем и поверхностью материала не прекращался, необходимо, чтобы масса (влага, продукты разложения) передвигалась от центральных слоев материала к его поверхности, т. е. чтобы проходил процесс массоотдачи. Способность тела (материала) пропускать массу к поверхности раздела фаз называется *массопроводностью тела*. Таким образом, процесс нагревания влажного тела (материала) теплоносителем сопровождается их массообменом. Поэтому процесс тепловой обработки влажных материалов и получил название *процесса тепло- и массообмена*.

Различают внешний и внутренний тепло- и массообмен. Процесс взаимодействия теплоносителя с поверхностью материала называют *внешним тепло- и массообменом*. Процесс распространения теплоты в теле материала, сопровождающийся его массоотдачей, называется *внутренним тепло- и массообменом*.

4.5.2. Виды теплообмена

Процесс передачи теплоты работающего в тепловой установке теплоносителя материалу может осуществляться соприкосновением и излучением. При непосредствен-

ном соприкосновении теплоносителя (газа, жидкости, пара) с твердым телом (материалом) передача ему теплоты осуществляется путем теплопроводности и конвекции. Совместная передача теплоты теплопроводностью и конвекцией называют *конвективным теплообменом*.

Теплообмен, обусловленный превращением внутренней энергии тела в энергию электромагнитных волн переносом ее и поглощением другими менее нагретыми телами, называют *теплообменом излучением*.

Конвективный теплообмен зависит от природы движения теплоносителя. Различают свободное и вынужденное движение теплоносителя. *Свободным* называют движение, которое возникает вследствие разности плотностей более и менее нагретых частиц теплоносителя. *Вынужденным* называют движение теплоносителя от посторонних возбудителей, например вентилятора. В обоих случаях существует свободное и вынужденное движение теплоносителя. Однако при существующих скоростях тепловой обработки материала роль свободного движения чрезвычайно мала и им пренебрегают.

При вынужденном движении теплоносителя различают *ламинарный* и *турбулентный режим* его движения. При ламинарном режиме движения создается достаточно большой пограничный слой, обтекающий воспринимающую теплоту поверхность материала и резко тормозящий теплопередачу. В турбулентном режиме движения пограничный слой очень тонок, теплоноситель носит неупорядоченный характер движения, и теплоотдача с поверхности материала конвективным путем резко возрастает.

Для расчетов теплоотдачи конвекцией применяют формулу Ньютона

$$Q = \alpha_n A (T_r - T_m) t, \quad (4.7)$$

где Q — количество переданной теплоты; α_n — коэффициент теплоотдачи конвекцией; A — площадь поверхности теплоотдачи; T_r и T_m — соответственно температуры теплоносителя и материала; t — время.

Если количество теплоты определять за единицу времени и отнести его к единице площади, то такую величину называют удельным тепловым потоком, или, другими словами, тепловым потоком, и обозначают q ;

в этом случае формулу Ньютона для теплового потока записывают в виде

$$q = \alpha_n (T_n - T_m). \quad (4.8)$$

Теплообмен излучением. Носителем лучистой энергии являются электромагнитные колебания. Излучение свойственно всем телам. Наряду с потоком лучистой энергии от более нагретых тел к менее нагретым всегда происходит и обратный поток — от менее нагретых к более нагретым телам. Конечный результат такого обмена и представляет собой количество теплоты, переданной посредством излучения Q , которое называют *эффективным излучением*.

Количество излучаемой энергии единицей поверхности тела за единицу времени называют *поверхностной плотностью излучения* и обозначают E , Вт/м². При площади поверхности излучаемого тела A , общее количество теплоты, излучаемой телом в единицу времени, $Q = EA$. Поток лучистой энергии, падающий на какое-либо тело, частично поглощается им, частично проходит сквозь тело, а частично отражается. Законы, определяющие распространение, преломление и отражение видимого света, справедливы и для невидимых тепловых лучей.

Если отраженную часть лучистого потока тела обозначить Q_o , поглощаемую часть Q_n и проходящую часть сквозь тело Q_c , то очевидно, что сумма $Q_o + Q_n + Q_c$ составляет общее количество лучистой энергии, получаемой телом Q , т. е.

$$Q_o + Q_n + Q_c = Q. \quad (4.9)$$

Если тело отражает всю полученную лучистую энергию, его называют *абсолютно белым*. Если тело поглощает всю лучистую энергию, его называют *абсолютно черным*. Тело, пропускающее всю лучистую энергию, — *абсолютно прозрачное*.

Все реальные тела поглощают и отражают лучистую энергию при любых температурах, и их принято называть *серыми телами*.

Поверхностная плотность излучения абсолютно черного тела E_o по закону Стефана — Больцмана пропор-

циональна его абсолютной температуре в четвертой степени и выражается в виде

$$E_0 = C_0 (T/100)^4, \quad (4.10)$$

где $C_0 = 5,67 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$ — коэффициент излучения абсолютно черного тела.

Интенсивность излучения серых тел E выражается также формулой (4.10), но с коэффициентом излучения реального тела C

$$E = C (T/100)^4. \quad (4.11)$$

Для определения коэффициента C пользуются понятием *степень черноты*. Под степенью черноты тела ϵ понимают отношение коэффициента излучения серого тела C к коэффициенту излучения абсолютно черного тела C_0 , взятых при одной и той же температуре,

$$\epsilon = C/C_0, \text{ или } C = \epsilon C_0. \quad (4.12)$$

В качестве рабочего тела в тепловых установках применяют продукты горения топлива, нагретый воздух, водяной пар. Все они являются газообразными теплоносителями. Известно, что одноатомные и большая часть двухатомных газов почти идеально прозрачны, и их излучательная способность практического значения не имеет.

Излучательной способностью обладают газы и пары с тремя и большим числом атомов (H_2O , CO_2 , SO_2 , NH_3 и др.). Излучение газов наблюдается по всей глубине слоя в отличие от твердых тел, которые излучают энергию поверхностными слоями. Поэтому излучательная способность газов и паров E_r зависит от температуры T , толщины излучающего слоя t и количества газа в данном объеме. Количество газа в данном объеме определяется его парциальным давлением. Тогда в общем виде излучающая способность газа или водяного пара может быть представлена в виде

$$E_r = f(T, t, p'). \quad (4.13)$$

Для определения плотности полного излучения наиболее распространенных в теплоносителе углекислого газа CO_2 и водяного пара существуют следующие формулы:

$$E_{\text{CO}_2} = 3,5 (p' t)^{0,33} (T/100)^{3,5}; \quad (4.14)$$

$$E_{\text{H}_2\text{O}} = 3,5 p' t^{0,6} (T/100)^4. \quad (4.15)$$

Для удобства подсчета на практике принимают, что излучение газов также пропорционально их абсолютным температурам в четвертой степени. Тогда плотность потока теплоты от газа к окружающим его поверхностям обрабатываемого материала и к ограждающим конструкциям тепловой установки можно определить по формуле

$$q_{\text{л}} = \varepsilon_{\text{пр}} C_0 [(T_{\text{г}}/100)^4 - (T_{\text{п}}/100)^4], \quad (4.16)$$

где $\varepsilon_{\text{пр}} = (\varepsilon_{\text{г}} \varepsilon_{\text{п}}) / [\varepsilon_{\text{п}} + \varepsilon_{\text{г}} (1 - \varepsilon_{\text{п}})]$ — приведенная степень черноты; $T_{\text{г}}$, $T_{\text{п}}$ — абсолютные температуры соответственно газа и обогреваемой поверхности.

Сложный теплообмен. В большинстве случаев передача теплоты — теплообмен между теплоносителем и материалом — осуществляется одновременно несколькими способами, поэтому такой процесс называют *сложным теплообменом*. В производстве строительных изделий теплообмен чаще всего происходит за счет конвекции и излучения. В этом случае удельный тепловой поток q состоит из теплового потока, переданного материалу конвекцией $q_{\text{к}}$, и теплового потока, переданного материалу излучением $q_{\text{л}}$,

$$q = q_{\text{к}} + q_{\text{л}}. \quad (4.17)$$

где $q_{\text{к}}$ определяется по формуле Ньютона (4.8), а $q_{\text{л}}$ — по формуле (4.16), тогда q — суммарный удельный тепловой поток — может быть представлен в виде

$$q = \alpha_{\text{к}} (T_{\text{г}} - T_{\text{п}}) + \varepsilon_{\text{г}} C_0 [(T_{\text{г}}/100)^4 - (T_{\text{п}}/100)^4]. \quad (4.18)$$

Умножим и разделим второй член правой части уравнения на $(T_{\text{г}} - T_{\text{п}})$, проведем преобразования и в окончательном виде получим

$$q = \left\{ \alpha_{\text{к}} + \frac{\varepsilon_{\text{г}} C_0 [(T_{\text{г}}/100)^4 - (T_{\text{п}}/100)^4]}{T_{\text{г}} - T_{\text{п}}} \right\} (T_{\text{г}} - T_{\text{п}}). \quad (4.19)$$

Выражение

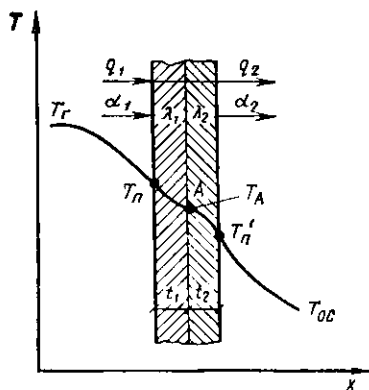
$$\{\varepsilon_{\text{г}} C_0 [(T_{\text{г}}/100)^4 - (T_{\text{п}}/100)^4] / (T_{\text{г}} - T_{\text{п}})\}$$

представляет собой коэффициент теплоотдачи излучением, который обозначим $\alpha_{\text{л}}$. В этом случае уравнение (4.19) принимает вид

$$q = (\alpha_{\text{к}} + \alpha_{\text{л}}) (T_{\text{г}} - T_{\text{п}}). \quad (4.20)$$

Передача теплоты внутри материала. Если изделие, газ, воздух (любое рабочее тело) нагревать с одной сто-

Рис. 4.5. Схема сечения ограждающей конструкции тепловой установки



роны, то молекулы в местах нагрева приходят в колебательное движение и передают свою энергию соседним молекулам. Таким образом теплота постепенно распространяется по всему рабочему телу. Следовательно, *теплопроводностью* называют молекулярный перенос теплоты в сплошной среде, обусловленный наличием перепада температуры.

Изучая явление теплопроводности в твердых телах, Фурье установил, что количество переданной теплоты теплопроводностью пропорционально изменению температуры, времени процесса и площади сечения, перпендикулярного направлению распространения теплоты. Если переданное количество теплоты отнести к единице времени и единице площади, то закон Фурье записывается в виде

$$q = -\lambda \operatorname{grad} T = -\lambda \nabla T, \quad (4.21)$$

где q — удельный поток теплоты; λ — коэффициент пропорциональности, называемый теплопроводностью. Этот коэффициент является параметром вещества и характеризует его способность проводить теплоту; ∇T — градиент температуры.

Передача теплоты через ограждающие конструкции (потери теплоты в окружающую среду). Для определения потерь теплоты в окружающую среду вернемся к рис. 4.2. Через ограждающую конструкцию 7 определенное количество теплоты теряется в окружающую среду. Мысленно вырежем из ограждающей конструкции часть стенки и представим ее в разрезе (рис. 4.5). В установке поддерживается необходимая температура

для обработки материала. Часть теплоты T_r затрачивается на нагревание материала. Удельный поток, идущий на нагревание единицы поверхности материала, определен по формуле (4.20).

Очевидно, теплота попадает и на стенку материала. Пусть эта стенка состоит из двух слоев толщиной t_1 и t_2 , и соответственно теплопроводность каждого слоя составляет λ_1 и λ_2 . Надо определить удельное количество теплоты, которое проходит в окружающую среду через каждый квадратный метр стенки ограждающей конструкции при разности температур в установке и окружающей среде, равной $\Delta T = T_r - T_{oc}$.

В этом случае, согласно (4.21), удельный тепловой поток на стенку составляет $q_1 = (\alpha_k + \alpha_n) (T_r - T_n)$. Стенка является термическим сопротивлением R , которое определяется по формуле

$$R = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{t_1}{\lambda_1} + \frac{t_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{t_n}{\lambda_n} + \frac{1}{\alpha_2} =$$

$$= \frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^{i=n} \left(\frac{t_i}{\lambda_i} \right) + \frac{1}{\alpha_2}, \quad (4.22)$$

где α_1 и α_2 — соответственно суммарные коэффициенты теплоотдачи к внутренней поверхности стенки установки $\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_n$ и от наружной поверхности стенки в окружающую среду $\alpha_2 = \alpha'_k + \alpha'_n$; $t_1, t_2, \dots, t_n$ — толщина слоев стенки (стенка может быть многослойной); $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ — теплопроводность материалов каждого слоя стенки.

Очевидно, чем лучше стенка сопротивляется тепловому потоку, тем меньше теплоты будет теряться в окружающую среду.

Ограждающие конструкции выполняют как однослойные, для которых $\Sigma (t/\lambda) = t_1/\lambda_1$, так и многослойные. В нашем примере рассматривается двухслойная стенка.

Величиной, обратной термическому сопротивлению стенки R , является коэффициент теплопередачи K , определяемый по формуле

$$K = \frac{1}{R} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^{i=n} \left(\frac{t}{\lambda} \right) + \frac{1}{\alpha_2}}. \quad (4.23)$$

Рассматривая рис. 4.5, отметим, что в первом слое стенки за счет его теплопроводности температура от зна-

чения T_n снижается до T_A в точке A на границе двух слоев стенки. Во втором слое характер падения температуры от T_A до T'_n идет резко, следовательно, второй слой выполнен из материала, имеющего меньшую теплопроводность, т. е. $\lambda_2 < \lambda_1$.

Наружная поверхность стенки с температурой T'_n отдает теплоту в окружающую среду. Коэффициент теплоотдачи α_2 также является суммарным, $\alpha_2 = \alpha_n + \alpha_{\text{ст}}$, а удельный тепловой поток с единицы поверхности в окружающую среду определяют по формуле

$$q_2 = \alpha_2 (T'_n - T_{\text{oc}}). \quad (4.24)$$

Температуры T_n , T_A и T'_n вычисляют по формулам:

$$T_n = T_c - q_1 / \alpha_1; \quad (4.25)$$

$$T_A = T_n - q_1 (l_1 / \lambda_1); \quad (4.26)$$

$$T_n - T'_n = \Delta T = \frac{q_1}{(l_1 / \lambda_1) + (l_2 / \lambda_2)}, \quad (4.27)$$

откуда $T'_n = T_n - \frac{q_1}{(l_1 / \lambda_1) + (l_2 / \lambda_2)}.$

Для определения α_1 вследствие ограниченных возможностей аналитического метода прибегают к эксперименту. Однако эксперимент проводят не на промышленных установках, а на моделях, перенося полученные данные с помощью теории подобия на реальные установки. Отдача теплоты в окружающую среду достаточно изучена и потому здесь не рассматривается; α_1 определяется по теплотехническим справочникам.

4.5.3. Массообмен

Как указывалось, при тепловой обработке строительных изделий происходит как массопередача, так и массоотдача.

Массопередача. В этом процессе участвуют не менее чем две фазы (в нашем примере твердое тело — материал и газообразное — теплоноситель). Через границу раздела этих фаз переносится вещество (в нашем случае влага, паровоздушная смесь, воздух, газы). Это переносимое вещество называют *распределяемой фазой*. Фазу, из которой вещество уходит, называют *отдающей*. Фазу, в которую вещество поступает, называют *принимающей*.

Движущей силой процесса переноса вещества является разность концентраций ΔC . Кроме разности концентраций значительное влияние на кинетику массообменного процесса оказывают гидродинамические условия движения фаз, их природа, градиенты температур, давлений, гравитационный потенциал, в меньшей мере другие условия.

По агрегатному состоянию взаимодействующих фаз различают системы: твердое тело — жидкость, твердое тело — газ, жидкость — жидкость, жидкость — газ или пар. В практике тепловой обработки строительных изделий практически встречаются системы: твердое тело — жидкость и твердое тело — газ или пар.

В соответствии с основным законом массопередачи количество вещества, перенесенное от поверхности раздела фаз в принимающую фазу (среду), пропорционально разности концентраций распределяемой фазы у поверхности раздела и в ядре потока принимающей фазы, площади поверхности раздела и времени массопередачи.

$$dm = \beta (C_r - C_f) dA dt \quad (4.28)$$

где m — масса переносимого вещества; β — коэффициент массопередачи, характеризующий перенос вещества одновременно диффузией и конвекцией; C_r и C_f — соответственно концентрации переносимого вещества в принимающей фазе у поверхности раздела фаз и в ядре потока; A — площадь поверхности раздела фаз; t — время массопередачи.

При постоянной площади поверхности раздела фаз за единицу времени для установившегося потока уравнение (4.28) можно переписать в виде

$$m = \beta (C_r - C_f) A. \quad (4.29)$$

Коэффициент массопередачи β показывает, какое количество вещества передается от границы раздела фаз в принимающую фазу через 1 м^2 поверхности за единицу времени при разности концентраций, равной единице.

При расчетах уравнение (4.29) используют несколько в ином виде. Так как нас интересует концентрация влаги на поверхности раздела фаз и в движущемся теплоносителе, то разность концентраций заменяют разностью парциальных давлений водяного пара у поверхности материала $p'_{\text{пм}}$ и в теплоносителе $p'_\text{т}$. Приравняв $A=1$, получаем

$$m = \beta (p'_{\text{пм}} - p'_\text{т}). \quad (4.30)$$

Массоотдача. Перенос массы внутри обрабатываемых изделий. Перенос вещества в строительных изделиях, представляющих собой капиллярно-пористые коллоидные или капиллярно-пористые тела, происходит по капиллярам. Движение массы вещества определяется капиллярными силами и осуществляется конвекцией или диффузией.

Массопроводность материала зависит от количества пор и от характера пористости. Чем больше радиус пор материала, тем лучше он проводит массу. Закрытые поры и капилляры, имеющие местные сужения, проводят массу хуже, чем открытые, сообщающиеся поры и капилляры без местных сужений. Например, в твердеющем бетоне при процессе гидратации цементных частиц диаметр капилляров меняется. Следовательно, массопроводность его в процессе твердения также изменяется. Отсюда делаем вывод, что массопроводность — физическое свойство материала.

Структура реальных капиллярно-пористых коллоидных тел весьма сложна. Капилляры и поры таких тел представляют собой криволинейные неправильного и непостоянного сечения каналы, соединяющиеся между собой или тупикового типа.

Масса, двигаясь по таким каналам в процессе тепловой обработки, может частично разрушать их стенки, изменять сечение, разрывая перегородки пор и капилляров, т. е. воздействовать на структуру материала. Ускорение переноса массы усиливает воздействие на структуру материала и, наоборот, снижение скорости потока уменьшает разрушающее действие на структуру. Структура материала изменяется также и в процессе тепловой обработки. Например, при удалении влаги из материала он претерпевает усадку, сжимается, в нем развивается напряженное состояние.

Для удаления влаги с поверхности материала необходимо, чтобы такое же количество ее поступало из внутренних слоев. При этом структура материала становится препятствием движению массы, возможность разрушения структуры возрастает, качество материала после тепловой обработки снижается. Следовательно, надо выбирать такие скорости теплового воздействия на материал, которые бы оказывали минимальное воздействие на его структуру. Скорость теплового воздействия на материал определяется темпом нагрева и скоростью

массопередачи и обуславливает режим тепловой обработки.

Таким образом, режим тепловой обработки тесно связан с теплопроводностью материала. Ибо, чтобы удалить определенное количество влаги с его поверхности, надо столько же подвести к поверхности, не нарушая структуры материала. Отсюда понятна необходимость изучения законов массоотдачи внутри капиллярно-пористых коллоидных тел.

Наиболее простыми для усвоения принципов массоотдачи являются массообменные процессы, проходящие при низкотемпературной тепловой обработке: сушке и тепловлажностной обработке сборного бетона. Изучив законы массоотдачи для этих процессов, их можно перенести и на процессы, проходящие при высоких температурах. Для массоотдачи при сушке предложено уравнение теплопроводности

$$q_m = -\lambda_m \nabla \theta, \quad (4.31)$$

где q_m — плотность удельного потока массы; λ_m — коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала; $\nabla \theta$ — градиент потенциала переноса массы.

Если уравнение (4.31) сравнить с уравнением Фурье (4.21), то можно увидеть полную аналогию. В уравнении (4.7) определяется удельный поток теплоты q , который пропорционален градиенту температуры ∇T , а коэффициентом пропорциональности служит теплопроводность материала λ . В уравнении (4.31) определяется удельный поток массы q_m . Он пропорционален градиенту потенциала переноса массы $\nabla \theta$, а коэффициентом пропорциональности является коэффициент теплопроводности материала λ_m .

Влага передвигается в материале за счет градиентов влагосодержания ∇U , температуры ∇T , давления ∇P , а также за счет потенциалов: гравитационного, электрического и др. Однако для условий тепловой обработки можно считать, что передача массы есть функция только ∇U , ∇T и ∇P . Влияние остальных в условиях тепловой обработки очень мало. Поэтому плотность удельного потока массы q_m может быть выражена уравнением

$$q_m = -a_m \rho_0 \nabla U - a_m \rho_0 \delta \nabla T - a_m \rho_0 \delta_P \nabla P, \quad (4.32)$$

где $a_m = \lambda_m / c_m \rho_0$ — коэффициент потенциалопроводности, аналогичный коэффициенту температуропроводности $a = \lambda / c \rho$; λ_m и λ — соответственно коэффициенты теплопроводности и теплопроводности

материала (здесь c_m и c — соответственно удельная влагоемкость и удельная теплоемкость материала); ρ_0 — плотность абсолютно сухого материала; δ — термоградиентный коэффициент, учитывающий дополнительный перенос влаги в сторону снижения температуры; δ_p — коэффициент, учитывающий дополнительный перенос влаги в сторону снижения давления по сечению материала; ∇U , ∇T и ∇P — соответственно градиенты влагосодержания, температуры и давления.

Рассматривая уравнение (4.32), необходимо отметить, что первый член правой части ($a_m \rho_0 \nabla U$) определяет часть удельного потока массы, перемещающегося в материале за счет градиента влагосодержания $\nabla U = \lim (\Delta U / \Delta X)_{\Delta X \rightarrow 0}$, причем этот поток имеет направление, противоположное градиенту влагосодержания ∇U , следовательно, является векторной величиной; второй член правой части ($a_m \rho_0 \delta \nabla T$) — вектор, который определяет часть удельного потока массы, перемещающегося за счет градиента температуры, $\nabla T = \lim (\Delta T / \Delta X)_{\Delta X \rightarrow 0}$ также в сторону уменьшения ∇T ; аналогично третий член ($a_m \rho_0 \delta_p \nabla P$) — вектор, который представляет собой часть удельного потока массы, перемещающегося по материалу за счет градиента давления $\nabla P = \lim (\Delta P / \Delta X)_{\Delta X \rightarrow 0}$, также в сторону снижения ∇P (см. рис. 4.13).

4.6. Внешний тепло- и массообмен

При внешнем тепло- и массообмене возможны три случая: первый — $p'_{\text{пм}} > p'_t$, второй — $p'_{\text{пм}} < p'_t$, третий — $p'_{\text{пм}} = p'_t$. Для всех случаев температура теплоносителя больше, чем температура материала.

4.6.1. Внешний тепло- и массообмен при сушке

Рассмотрим первый случай тепловой обработки, когда $p'_{\text{пм}} > p'_t$, а $T_t > T_m$. При взаимодействии теплоносителя с материалом за счет разности парциальных давлений водяных паров ($p'_{\text{пм}} - p'_t$) происходит процесс удаления влаги с поверхности материала. Она ассимилируется теплоносителем, и парциальное давление водяных паров в нем возрастает. Оработанный теплоноситель удаляется из тепловой установки, а его место занимает вновь поступивший.

Для описания удельного потока влаги с поверхности материала q_m используют уравнение Дальтона, установив-

ливающее связь между физическими параметрами, влияющими на скорость испарения,

$$q_m = \beta_m (p'_{\text{нм}} - p'_t) (p/p'), \quad (4.33)$$

где β_m — коэффициент массопередачи; p — барометрическое давление при нормальных физических условиях; p' — существующее барометрическое давление; $p'_{\text{нм}} - p'_t$ — движущая сила процесса массопередачи.

Помимо массообмена происходит и теплообмен между нагретым до более высокой температуры теплоносителем и материалом. Теплообмен (процесс ведут при $T = 373 - 473$ K) осуществляется за счет конвекции и описывается формулой (4.8)

$$q = \alpha_k (T_t - T_{\text{нм}}). \quad (4.34)$$

Поток теплоты q , который получает единица поверхности материала за единицу времени, будет затрачиваться на испарение влаги, на нагрев материала и влаги, находящейся в материале.

Зависимость, представляющую собой балансовое уравнение теплоты, расходуемой на испарение влаги и нагрев материала, можно с достаточной точностью записать

$$\alpha_k (T_t - T_{\text{нм}}) = r \rho_0 R_v (dU/dt) + c \rho_0 R_v (dT/dt). \quad (4.35)$$

В правой части уравнения член $r \rho_0 R_v dU/dt$ учитывает расход теплоты на испарение влаги (dU/dt — уменьшение влагосодержания материала), другой член $c \rho_0 R_v dT/dt$ учитывает расход теплоты на нагрев (dT/dt — изменение температуры влажного материала). Остальные значения: r — теплота испарения, равная теплоте парообразования и энергии, затрачиваемой на преодоление сил сцепления влаги с поверхностью; ρ_0 — плотность абсолютно сухого материала; c — удельная теплоемкость влажного материала; R_v — отношение объема материала к его поверхности, с которой происходит испарение.

Следовательно, при обработке материала теплоносителем, температура которого T_t больше температуры материала T_m , а парциальное давление водяного пара в теплоносителе p'_t меньше парциального давления водяного пара вблизи поверхности материала $p'_{\text{нм}}$, из материала происходит удаление влаги, сопровождающееся его нагревом.

Уравнения (4.33) и (4.34) описывают процесс взаимодействия теплоносителя с поверхностью материала и являются уравнениями внешнего тепло- и массообмена для этого случая.

4.6.2. Внешний тепло- и массообмен при тепловлажностной обработке

Рассмотрим второй случай тепловой обработки, когда $p'_{\text{пм}} < p'_{\text{т}}$. Такие условия тепловлажностной обработки также широко применяются в технологии строительных изделий.

Обратимся вновь к рис. 4.2. В качестве теплоносителя в установку подают насыщенный пар. Материал в установке — сборный железобетон. Проведем оси координат: ординату по поверхности обрабатываемого материала, а абсциссу вдоль расстояния от материала до стенки установки, через которую и подают насыщенный водяной пар. До поступления пара в установку находился воздух. Давление в установке атмосферное, она негерметична.

Представим выделенное осями координат пространство установки на рис. 4.6, а. При подаче пара общее давление в установке p_y останется равным атмосферному и будет складываться из парциального давления пара p'_n и парциального давления воздуха $p'_в$ (см. рис. 4.6, а). Поступающий пар устремляется к более холодной поверхности материала и конденсируется. На поверхности материала образуется пленка конденсата толщиной l . Одновременно с паром к поверхности материала увлекается воздух. За счет конденсации масса пара в паровоздушной смеси у поверхности конденсации уменьшается, и парциальное давление пара у поверхности пленки конденсата p''_n становится меньше p'_n . Парциальное давление воздуха у поверхности пленки должно возрастать, ибо общее давление — атмосферное. Изложенное можно записать в виде

$$p_y = p'_n + p'_в = p''_n + p''_в \approx 0,1 \text{ МПа}. \quad (4.36)$$

Кривая, характеризующая изменение парциального давления пара на различных расстояниях от поверхности материала $[p'_n = f(x)]$, показана на рис. 4.6, а.

Удельный поток массы пара, конденсирующегося на поверхности материала, подсчитывают по формуле

$$q_n = \beta_m (p'_n - p''_n), \quad (4.37)$$

где β_m — коэффициент массопередачи при конденсации; p'_n — парциальное давление пара в установке; p''_n — парциальное давление пара на поверхности изделия.

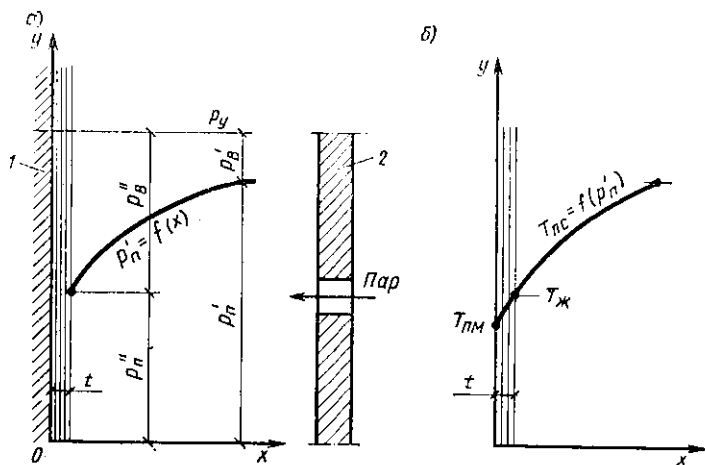


Рис. 4.6. Схема нагрева материала паром
1 — материал; 2 — стенка установки

Известно, что температура паровоздушной смеси $T_{по}$ является функцией парциального давления водяного пара p'_n . Так как парциальное давление пара в установке на различном расстоянии от места подачи до материала различно, то и кривая температуры паровоздушной смеси $T_{пс}$ будет аналогична кривой парциального давления водяного пара. Построим кривую $T_{пс} = f(p'_n)$ на рис. 4.6, б. Удельный поток теплоты q , получаемый единицей поверхности материала, можно записать в виде

$$q = \lambda / t (T_{ж} - T_{пм}), \quad (4.38)$$

где λ — теплопроводность пленки конденсата; t — толщина пленки конденсата; $T_{ж}$ — температура пленки конденсата, соприкасающейся с паровоздушной смесью; $T_{пм}$ — температура поверхности материала.

Анализируя формулу (4.38), отметим, что тепловой поток q складывается из теплоты парообразования, отдаваемой материалу при конденсации, и теплоты паровоздушной смеси вследствие разности температур $T_{по}$ и $T_{ж}$.

Теплота пара при конденсации $q_{тп}$ определяется

$$q_{тп} = r q_n = r \beta_m (p'_n - p''_n), \quad (4.39)$$

где r — теплота парообразования, отдаваемая материалу при конденсации; остальные обозначения даны в формуле (4.37).

Дополнительный перенос теплоты паровоздушной смесью $q_{гис}$ определяют по формуле

$$q_{гис} = \alpha_{ис} (\bar{T}_{ис} - T_{ж}), \quad (1.10)$$

где $\alpha_{ис}$ — коэффициент теплоотдачи от паровоздушной смеси к поверхности пленки конденсата; $\bar{T}_{ис}$ — средняя температура паровоздушной смеси; $T_{ж}$ — температура пленки конденсата, соприкасающейся с паровоздушной смесью.

Из изложенного можно сделать вывод, что при тепловлажностной обработке строительных изделий насыщенным паром он конденсируется на их поверхности и увлажняет. Изделия за счет выделенной теплоты при конденсации пара, а также за счет теплообмена пленки конденсата с паровоздушной смесью нагреваются.

Приведенные уравнения (4.37—4.40) описывают процесс взаимодействия пара с поверхностью материала и представляют собой уравнения внешнего тепло- и массообмена для случая тепловлажностной обработки.

В третьем случае (когда $p'_T = p'_{пм}$) материал только нагревается. Массообмен отсутствует. В этом случае нагрев материала определяется по формуле (4.34).

4.7. Внутренний тепло- и массообмен

Как указывалось, при тепловой обработке материала происходит передача теплоты с поверхности материала внутрь и перераспределение влаги по его слоям. Изложим условия распространения теплоты и массы внутри материала.

4.7.1. Внутренний тепло- и массообмен при сушке

Рассмотрим изделие в виде параллелепипеда, взаимодействующего с теплоносителем со всех сторон. Пусть материал хорошо перемешан, его влагосодержание и температура по всему объему одинаковы. Материал подвергнут обработке теплоносителем, температура которого T_T больше температуры материала, а парциальное давление водяных паров теплоносителя p'_T меньше парциального давления водяных паров $p'_{пм}$ поверхности материала.

В результате взаимодействия материала с теплоносителем через время t_1 с поверхности удалится какое-то

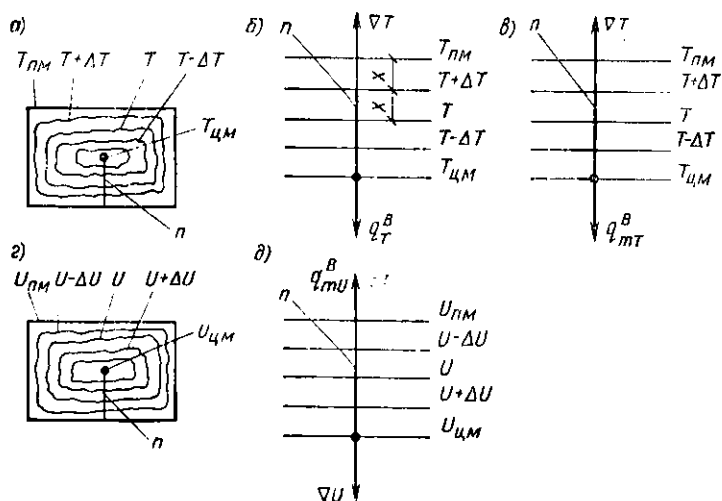


Рис. 4.7. Схема градиентов температур и влагосодержаний, а также возникающих потоков теплоты и массы в материале

количество влаги, а температура поверхности материала возрастет. Возьмем модель такого материала в момент времени t_2 и на рис. 4.7, а покажем изменение температуры по слоям материала, а на рис. 4.7, в — влагосодержание также по его слоям.

Как только поверхность материала нагреется больше, чем остальные слои материала, возникнет перепад температур; в результате ∇T теплота начинает передаваться внутренним слоям, одновременно за счет испарения влаги с поверхности материала внутри его (между центральными слоями и поверхностью) появится перепад влагосодержаний ∇U , и влага начинает двигаться к поверхности. Пусть к моменту времени t_2 в материале имеются перепады температур $T_{\text{пм}} > T_{\text{цм}}$ и влагосодержаний $U_{\text{пм}} < U_{\text{цм}}$.

Выделим на рис. 4.7, б, г изопотенциальные поверхности $T_{\text{пм}} > (T + \Delta T) > T > (T - \Delta T) > T_{\text{цм}}$ для распределения температур и для распределения влагосодержаний $U_{\text{пм}} < (U - \Delta U) < U < (U + \Delta U) < U_{\text{цм}}$. Наибольшее изменение температур и влагосодержаний наблюдается по нормали n ко многим постоянным температур и влагосодержаний. Пределы отношений изменения тем-

температуры и влагосодержания к расстоянию между ними (X) по нормали n являются соответственно $\lim (\Delta T / \Delta X)_{\Delta X \rightarrow 0} = \text{grad } T = \nabla T$ градиентом температуры, а $\lim (\Delta U / \Delta X)_{\Delta X \rightarrow 0} = \text{grad } U = \nabla U$ градиентом влагосодержания, за положительное направление принято считать такое, которое идет в сторону возрастания потенциалов.

Представим на рис. 4.7, б, д соответственно постоянные температур и влагосодержания, проведем нормали n к изопотенциальным поверхностям и покажем на них направление векторов градиентов температуры и влагосодержания. На рис. 4.7, б видим, что вектор градиента температур ∇T направлен от центра материала к его поверхности; удельный поток теплоты q^b_T направлен в противоположную сторону, т. е. в сторону центра материала.

Вектор градиента влагосодержаний ∇U (рис. 4.7, д), наоборот, направлен в центр материала и вызывает поток массы (влаги) q^b_{mU} в сторону поверхности материала — поверхности испарения.

В результате градиента температуры вместе с передачей теплоты (удельный поток теплоты q^b_T) возникает еще и частный поток влаги q^b_{mT} из-за термовлагопроводности материала (см. рис. 4.7, в). Поток влаги q^b_{mT} входит как одна из составляющих в общий удельный поток массы и также является векторной величиной.

Таким образом, при сушке материал нагревается, ибо тепловой поток направлен к центру и отдаваемая с поверхности материала влага компенсируется подводимым из центра потоком q^b_{mU} . Дополнительный поток влаги q^b_{mT} направлен к центру, следовательно, складываясь с потоком q^b_{mU} поток q^b_{mT} будет снижать эффективность потока q^b_{mU} . Учитывая, что материал в сушильной установке сохнет, следовательно, поток массы q^b_{mU} больше потока массы q^b_{mT} , ибо влага не может удаляться с поверхности, если влагу не подводить к этой поверхности.

При сушке поры материала освобождаются от влаги, и их занимает теплоноситель. Теплоноситель, состоящий из воздуха, продуктов горения топлива и водяных паров, поступает в материал в виде пузырьков навстречу движущемуся потоку влаги. Относительная влажность теплоносителя φ в момент поступления в материал значительно меньше 100 %. В обводненном капилляре пузырек находится в окружении влаги, и на его поверх-

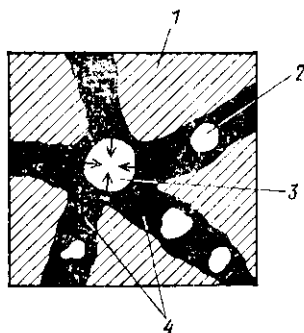


Рис. 4.8. Схема возникновения избыточного давления в пузырьке воздуха внутри материала

1 — скелет материала (твердая фаза);
2 — пузырьки вовлеченного воздуха;
3 — рассматриваемый пузырек воздуха;
4 — влага; стрелками показано направление испарения влаги

ности относительная влажность φ составляет 100 %. Чтобы представить механизм появления в материале избыточного давления, рассмотрим попавший в материал пузырек теплоносителя (рис. 4.8).

Пусть в начальный момент времени t_0 попавший в материал пузырек теплоносителя имел температуру T_t , относительную влажность $\varphi < 100$ % и атмосферное давление 0,1 МПа, слагаемое из парциального давления теплоносителя p'_t и парциального давления водяных паров $p'_{вп}$. В материале пузырек несколько охладится, температура его снизится до T_m , относительная влажность повысится, но не достигнет 100 %. Давление p_0 пока еще атмосферное. На момент времени t_0 можно записать

$$p_n(t_0) = p'_t + p'_{вп} \approx 0,1 \text{ МПа}. \quad (4.41)$$

К моменту времени t_1 (за счет того, что пузырек окружала влага и на поверхности пузырька относительная влажность $\varphi \approx 100$ %) влага начнет испаряться в пузырек воздуха; испарение будет продолжаться до момента, пока в пузырьке относительная влажность φ не достигнет 100 %. При этом испарившееся количество влаги составит $\Delta p'_{вп}$. Следовательно, к моменту времени t_1 давление в пузырьке составит

$$p_n(t_1) = p'_t + p''_{вп} + \Delta p'_{вп} \approx 0,1 \text{ МПа} + \Delta p'_{вп}, \quad (4.42)$$

т. е. выше атмосферного на $\Delta p'_{вп}$.

Материал при сушке продолжает прогреваться, его температура в месте нахождения пузырька повышается, и пузырек нагревается. Относительная влажность тепло-

носителя в пузырьке уменьшается и становится к моменту времени t_2 опять менее 100 %. Следовательно, в пузырьке опять начинается испарение влаги, и относительная влажность в нем опять достигает 100 %. Этот процесс также можно записать в виде

$$p_n(t_2) = p'_T + p'_{nn} + \Delta p'_{nn} + \Delta p''_{nn}. \quad (4.43)$$

Следовательно, избыточное давление в пузырьке повысится еще больше. При повышении температуры материала давление в пузырьках возрастет и станет значительно выше атмосферного.

Так как пузырьки воздуха и теплоносителя в материале находятся на разных расстояниях от поверхности, то они будут иметь разные температуры. И внутри материала возникнет перепад давлений, который вызовет частный поток влаги q_{mp} в направлении, обратном градиенту давления ∇p .

Итак, при воздействии на влажный материал теплоносителя с параметрами $T_T > T_M$ и $p'_T < p'_{им}$ в материале возникают: градиент влагосодержаний ∇U , вызывающий частный поток влаги $q^{n_{mv}}$ в сторону поверхности материала; градиент температур ∇T , вызывающий поток теплоты q^b_T и частный поток влаги $q^{n_{mT}}$, направленный от поверхности материала; градиент давлений ∇p , вызывающий частный поток влаги $q^{n_{mp}}$, направление которого пока не определено.

Для установления направления частного потока влаги $q^{n_{mp}}$ запишем основные уравнения тепло- и массообмена между поверхностью и центральными слоями материала. Согласно уравнению теплопроводности в твердых телах (4.21), тепловой поток на единицу площади за единицу времени записывается в виде: $q = -\lambda \nabla T$. Тепловой поток в соответствии с рис. 4.7, б направлен внутрь материала и обозначен q^b_T . Однако распространяемая теплота идет не только на нагрев материала, но и влаги, которая за счет градиента влагосодержаний ∇U движется к поверхности материала (частный поток $q^{n_{mv}}$). Следовательно, в уравнение (4.21) должна быть внесена поправка на часть теплоты, которая с общим потоком массы возвращается для данного случая к поверхности, т. е. уравнение удельного теплового потока q^b_T должно быть записано в виде

$$q^b_T = -\lambda \nabla T + i q^{n_{mv}}, \quad (4.44)$$

где λ — теплопроводность материала; ∇T — градиент температуры;

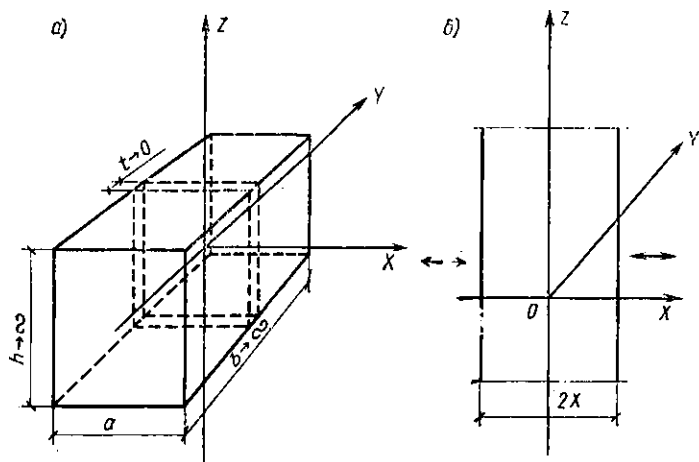


Рис. 4.9. К определению физического смысла неограниченной пластины

$i q_m^B$ — количество теплоты, переносимой перемещающимся в материале суммарным потоком массы.

Определение q_m^B ведут по формуле (4.32); перепишем ее в следующем виде:

$$q_m^B = q_{mU}^B + q_{mT}^B + q_{mp}^B = -a_m \rho_0 \nabla U - a_m \rho_0 \delta \nabla T - a_m \rho_0 \delta_p \nabla p, \quad (4.45)$$

где

$$q_{mU}^B = -a_m \rho_0 \nabla U; \quad q_{mT}^B = -a_m \rho_0 \delta \nabla T; \quad q_{mp}^B = -a_m \rho_0 \delta_p \nabla p.$$

Далее выясним направление всех частных потоков массы при тепловой обработке.

Механизм внутреннего тепло- и массообмена при сушке проанализируем на примере неограниченной пластины. Для этого возьмем параллелепипед (рис. 4.9, а) со стороной a , имеющей конечный размер, $b \rightarrow \infty$ и высотой $h \rightarrow \infty$; мысленно вырежем из него пластину толщиной $t \rightarrow 0$ (показана пунктиром) и представим ее на рис. 4.9, б. Проведем через нее оси координат X, Y, Z .

Отметим, что такая пластина может сообщаться с пространством и обмениваться теплотой и массой только по вертикальным граням (по оси X). По осям Y и Z от ее обмена отделяет бесконечность. Такая пла-

стина носит название неограниченной; она применяется в теплотехнике для упрощенного анализа, сводя трехмерное пространство к одномерному. Направления, по которым неограниченная пластина взаимодействует с окружающей средой, на рис. 4.9, б отмечены стрелками. Однако реальные процессы развиваются в трехмерном пространстве и поэтому их описание значительно сложнее.

Возьмем неограниченную пластину (рис. 4.10, а) и предположим, что она моделирует обрабатываемый материал. Проведем через нее оси координат X и Y . По оси X откладываем расстояние от центра до граней, по которым пластина обменивается теплотой и массой, а по оси Y — влагосодержание U_0 .

Пусть к началу отсчета времени t_0 влагосодержание материала пластины U_0 было одинаковым по всей толщине (показано пунктиром). За счет воздействия теплоносителя с поверхностей началось испарение влаги. Масса влаги из-за возникшего градиента влагосодержаний ∇U начала диффундировать к поверхности.

Представим этот процесс графически на неограниченной пластине в момент времени t_1 . Влагосодержание U_1 на поверхности пластины стало менее U_0 , и кривая распределения влагосодержаний приобрела вид параболы (см. $U_m = f(x)$ на рис. 4.10, б). В пластине можно выделить линии одинакового влагосодержания: $U_1 = U_{\text{пм}}$; $U - \Delta U$; U ; $U + \Delta U$ и $U_{\text{цм}} = U_0$, причем $U_{\text{цм}} > (U + \Delta U) > U > (U - \Delta U) > U_{\text{пм}}$ (рис. 4.10, б). По аналогии с рис. 4.7, д покажем стрелками направление векторов ∇U и q_{mv} . Анализируя рис. 4.10, б, становится понятным направление частного потока массы $q_{mv} = -a_{m\rho_0} \nabla U$.

На аналогичной неограниченной пластине (рис. 4.11) покажем направление удельного потока теплоты $q_{\text{т}}$, частного потока массы $q_{m\tau} = -a_{m\rho_0} \delta \nabla T$ и градиента температур ∇T . Сравнивая рис. 4.10, б и 4.11, отметим, что частный поток массы $q_{m\tau}$ снижает эффективность подводимой влаги к поверхности материала за счет градиента влагосодержаний.

На аналогичной неограниченной пластине (рис. 4.12) представим механизм возникновения избыточного, по сравнению с атмосферным, давления в материале. Ранее показано, что в пузырьках теплоносителя, поступающих в капилляры материала, на месте удаляемой вла-

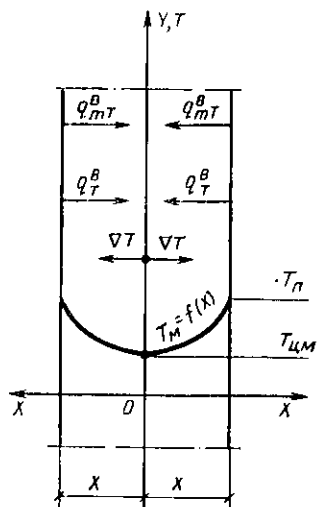
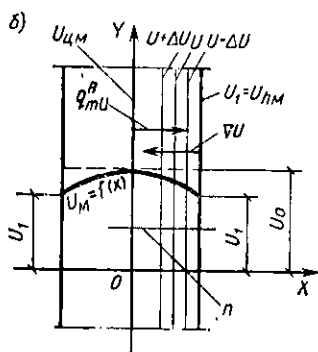
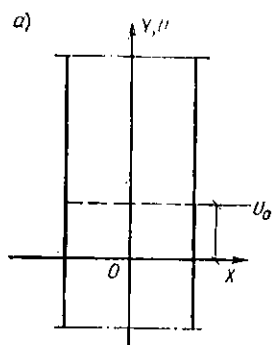


Рис. 4.11. $q_{мт}^B$, q_T^B и ∇T на неограниченной пластине

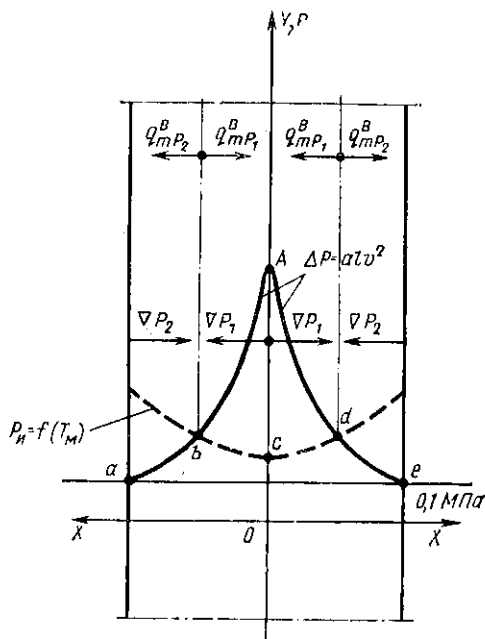
Рис. 4.10. Изменение влагосодержания в неограниченной пластине

а — схема пластины; б — схема процесса на пластине

ги возникает избыточное давление, которое возрастает по мере нагрева материала. На пластине по оси абсцисс откладываем расстояние от центра пластины, а по оси ординат давление p .

Покажем сначала линию атмосферного давления, $p=0,1$ МПа. Далее пунктиром покажем кривую избыточного давления $p_{н}=f(T_{м})$. Эта кривая по характеру аналогична кривой распределения температуры в материале, показанной на рис. 4.11, но имеет свои значения давлений. Далее проанализируем возможности материала удерживать своей структурой эти избыточные давления. Рассмотрим сеть капилляров материала; они представляют собой определенное сопротивление для движения влаги и воздуха. Очевидно, что образовавшееся избыточное давление, распространяясь во все стороны, пытается вытолкнуть часть влаги из материала. Со-

Рис. 4.12. Перепады избыточного давления внутри неограниченной пластины (в материале)



противление капилляров Δp определяется аналогично сопротивлению труб и каналов по формуле

$$\Delta p = a l v^2, \quad (4.46)$$

где a — коэффициент гидравлического сопротивления движению влаги; l — длина капилляров (для данного случая толщина слоя материала по оси X); v — скорость движения жидкости.

Следовательно, чем больше слой материала [согласно (4.46)], тем больше гидравлическое сопротивление Δp . Проведем на рис. 4.12 из центра к поверхности кривые, соответствующие математической зависимости $\Delta p = a l v^2$. Максимальное гидравлическое сопротивление, равное Δp слоя X , находится в точке A , минимальное ($\Delta p = 0$) — на поверхности, где нет избыточного давления. Тогда кривая возможного избыточного давления в материале (пластине), сообщаемом с окружающей средой по вертикальным поверхностям, выразится линией $a A e$. Сравним ее с пунктирной кривой $p_n = f(T_m)$, т. е. с кривой давлений, которое должно существовать в материале при данных условиях нагрева. Из сравне-

ния находим кривую, по которой распределится давление в материале при данной температуре; это — ломаная линия $abcde$, которая должна определять эпюру избыточных давлений в пластине, и, следовательно, в моделируемом материале.

Отсюда легко определить градиенты давления ∇p , равные $\lim (\Delta p / \Delta X)_{\Delta X \rightarrow 0}$ и частные потоки массы за счет градиентов давления, равные $a_m \rho_0 \delta_p \nabla p$. Градиент давления ∇p направлен в сторону возрастания давления. Следовательно, в пластине (и в материале) возникнут градиенты давления ∇p_1 и ∇p_2 . Градиенты давления ∇p_1 направлены от центра пластины к периферии до точек b и d , а градиенты давлений ∇p_2 — от поверхностей пластины к точкам b и d .

Частные потоки массы q_{mp} , будут направлены от точек b и d к центру пластины, а частные потоки массы q_{mr} , — от точек b и d к поверхностям пластины.

Рассмотрев механизм возникновения градиентов ∇U , ∇T , ∇p и вызываемых ими частных потоков массы, можно проанализировать общее уравнение перемещающегося в материале суммарного потока массы (4.45). Напишем уравнение (4.45) в виде частных потоков

$$q_m^B = q_{mU}^B + q_{mT}^B + q_{mp}^B. \quad (4.47)$$

Обозначения q_{mU}^B , q_{mT}^B и q_{mp}^B приведены в уравнении (4.45). Для этого уравнения на рис. 4.10—4.12 определены и показаны стрелками направления частных потоков массы при сушке изделий. Воспользуемся этими рисунками и перепишем уравнение (4.45) с выявленными при анализе механизма переноса знаками, причем за положительное направление движения массы будем считать ее движение к поверхности.

Тогда для слоев $c-d$ и $b-a$ (см. рис. 4.12) можно написать

$$q_m^B = +q_{mU}^B - q_{mT}^B + q_{mp}^B. \quad (4.48)$$

Для слоев $d-c$ и $b-c$ уравнение имеет другой вид

$$q_m^B = +q_{mU}^B - q_{mT}^B - q_{mp}^B. \quad (4.49)$$

Анализируя уравнения (4.48 и 4.49), можно сказать следующее:

общий поток массы идет из центра пластины в сторону ее поверхностей, с которых удаляется влага;

из центра до поверхностных слоев d и b поток влаги уменьшается из-за встречных потоков $q_{мг}^в$ и $q_{мр}^в$;

в поверхностных слоях пластины интенсивность потока влаги снижает поток влаги $q_{мг}^в$.

Сказанное позволяет наметить технологические решения ускорения процесса сушки изделий. Например, нагреем перед тепловой обработкой материал до температуры выше температуры теплоносителя, подаваемого на сушку (определенного по мокрому термометру), т. е. выше температуры, при которой будет испаряться влага с поверхности. Температура теплоносителя, определенная по сухому термометру, в этом случае может быть 100—150°C и даже выше. Рассмотрим такой процесс с помощью неограниченной пластины (рис. 4.13).

По оси абсцисс отложим в определенном масштабе расстояние от центра материала к его поверхности, а по оси ординат — влагосодержание U , температуру T , избыточное давление $p_{из}$. Проведем параллельно оси X линию атмосферного давления, т. е. $p \simeq 0,1$ МПа. Предположим, что в начальный момент по всей толщине пластины влагосодержание U_0 и температура нагретого материала $T_{из}$ одинаковы. Избыточное давление внутри материала отсутствует.

Теплоноситель с параметрами $T_{т} < T_{из}$ и $p'_{т} < p'_{из}$, воздействуя на материал, ассимилирует влагу с поверхности. Влагосодержание поверхности уменьшается до U_1 . За счет испарения влаги с поверхности температура материала уменьшается и ко времени t_1 становится равной температуре теплоносителя, определенной по мокрому термометру, т. е. $T_{т(мт)} = T_{из}$.

Покажем на момент времени t_1 линии распределения влагосодержания и температуры в пластине (см. рис. 4.13). В материале возникли градиенты влагосодержания ∇U и температур ∇T ; покажем их стрелками. Градиенты вызвали соответствующие частные потоки массы $q_{мв}^в$ и $q_{мг}^в$, покажем их тоже стрелками.

В материале идут процессы внешнего и внутреннего тепло- и массообмена. Место влаги занимают пузырьки теплоносителя. Возникает избыточное давление. Кривая его распределения, как указывалось выше, идентична по своему характеру температурной кривой в материале. Причем, на поверхности материала давление атмосферное. Покажем эту кривую $p_{из}$ на рис. 4.13. Покажем пунктиром линии, определяющие сопротивление мате-

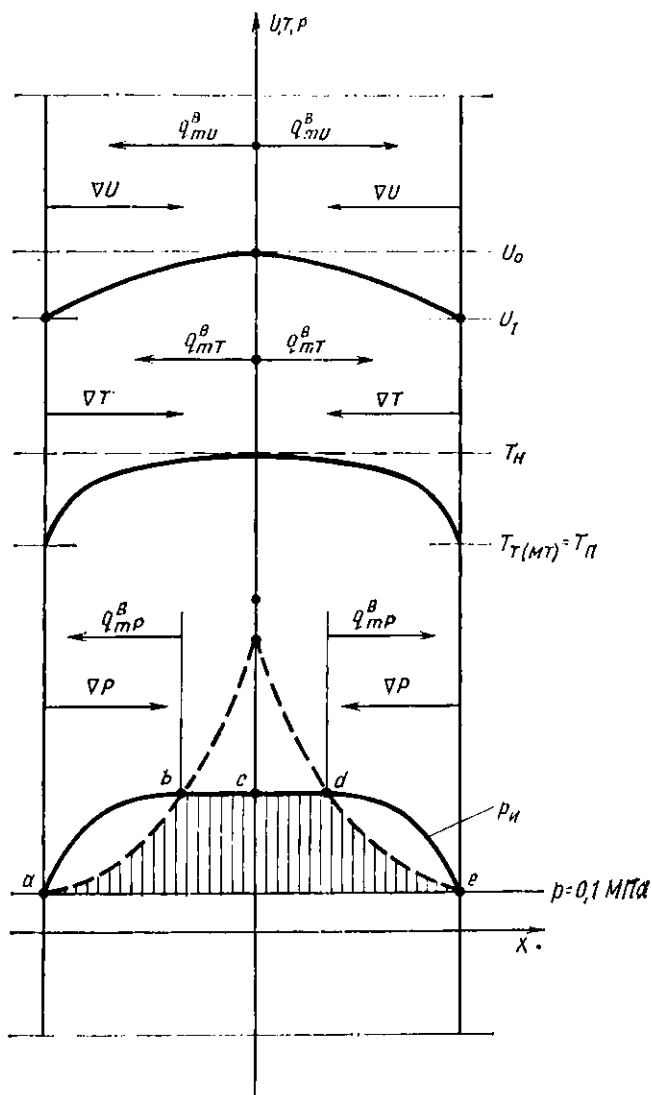


Рис. 4.13. Схема определения частных потоков массы внутри материала при сушке на примере неограниченной пластины

риала выталкиванию массы, $\Delta p = \alpha v^2$. Получим, что в слоях, расположенных у поверхностей материала, избыточное давление выше, чем сопротивление этих слоев.

Следовательно, часть влаги вместе с воздухом выталкивается избыточным давлением. Или, что более вероятно, избыточное давление регулируется сопротивлением его слоев. Тогда кривая избыточного давления в материале будет иметь вид кривой $abcde$ (площадь, образуемая кривой избыточных давлений и линией $p \approx 0,1$ МПа, заштрихована).

По кривой давлений определяем градиенты давлений ∇p и вызываемые ими частные потоки массы q_{mp}^B , покажем их стрелками. Теперь можно записать уравнение частных потоков массы к поверхности

$$q_m^B = +q_{mU}^B + q_{mT}^B + q_{mp}^B. \quad (4.50)$$

Следовательно, общее количество подводимой влаги к единице поверхности возрастает, возрастет и количество влаги, которое можно удалять с поверхности, а значит, можно быстрее сушить материал.

Рассмотренный предварительный способ нагрева не является единственным по ускорению сушки. Могут быть найдены и другие способы.

4.7.2. Внутренний тепло- и массообмен при тепловлажностной обработке

Рассмотрим изделие в виде параллелепипеда, открытого для взаимодействия с теплоносителем со всех сторон. Пусть материал имеет одинаковые по всему объему начальные влагосодержание и температуру. Температура теплоносителя — пара выше температуры материала, $T_T > T_m$, а парциальное давление водяных паров в теплоносителе выше парциального давления водяных паров на поверхности материала $p'_T > p'_{пм}$. Покажем пунктиром начальное распределение влагосодержания и температуры на неограниченной пластине (рис. 4.14).

За счет взаимодействия с паром через некоторый промежуток времени на поверхности материала образуется пленка конденсата толщиной l . Покажем эту пленку на пластине. Поверхность пластины ко времени t_1 за счет контакта с конденсатом приобретет влагосодержание U_1 и температуру T_1 . Образуется разность влагосодержаний и температур между центром пласти-

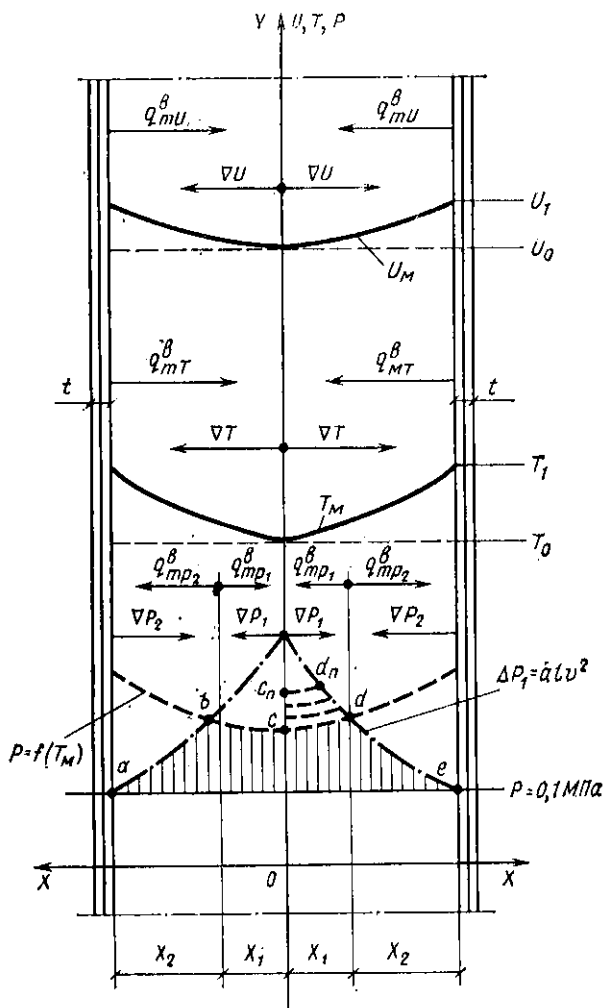


Рис. 4.14. Схема определения частных потоков массы внутри материала при тепловлажностной обработке на примере неограниченной пластины

ны, где влагосодержание U_0 и температура T_0 , и поверхностью, где влагосодержание U_1 и температура T_1 . Кривые влагосодержаний материала U_M и температуры T_M приобретут вид параболы. Покажем стрелками направ-

ление градиентов влагосодержания ∇U и температуры ∇T , а также частных потоков массы q_{mU}^n и q_{mT}^n .

Как и при сушке, в процессе тепловлажностной обработки в материале возникает избыточное давление. По мере нагревания материала избыточное давление растет. Покажем характер кривой давления по толщине материала, которое должно наблюдаться при $p = f(T_m)$ (см. пунктирную линию на рис. 4.14). Сопротивление слоев материала аналогично рассмотренному в процессе сушки и представлено штрихпунктирной линией $\Delta p_1 = a l v^2$. Тогда кривая распределения давления внутри материала будет *abcde* (площадь под линией *abcde* заштрихована). Стрелками отмечено направление градиентов давления ∇p и частных потоков массы q_{mp}^n .

Покажем сечения по толщине пластины X_1 и X_2 . В сечении X_1 градиент давления ∇p_1 меняет свой знак на обратный. При дальнейшем нагреве кривые *b—c* и *c—d* будут подниматься вверх к $c_n—d_n$, и расстояние от центра X_1 будет уменьшаться. Избыточное давление внутри материала будет возрастать. По мере замещения в бетоне газовой фазы влагой давление должно снижаться, но не в прямой пропорциональности, ибо гелевые поры водой практически не заполняются.

Отсюда можно записать суммарный поток массы от центра до сечения X_1

$$q_m^n = + q_{mU}^n + q_{mT}^n + q_{mp}^n, \quad (4.51)$$

а между сечениями X_1 и X_2 суммарный поток равен

$$q_m^n = + q_{mU}^n + q_{mT}^n - q_{mp}^n. \quad (4.52)$$

Вместе с потоком теплоты, распространяемым внутри материала путем теплопроводности, с потоком влаги передается часть тепловой энергии. Полный удельный поток теплоты, передаваемый внутри материала, составит

$$q_T^n = -\lambda \nabla T + l q_m^n. \quad (4.53)$$

Уравнения (4.51 и 4.52) определяют поток массы в материале при тепловлажностной обработке и в общем виде могут быть записаны

$$q_m^n = -a_m \rho_0 \nabla U - a_m \rho_0 \delta \nabla T - a_m \rho_0 \delta_p \nabla p. \quad (4.54)$$

Следовательно, процессы, описываемые формулами (4.54) и (4.45), аналогичны.

Уравнения (4.53 и 4.54) определяют внутренний тепло- и массообмен при тепловлажностной обработке. Эти уравнения аналогичны полученным для процесса сушки.

4.8. Напряженное состояние в материале при тепловой обработке

В процессе тепловой обработки влажного материала изменяется его влагосодержание, происходят процессы структурообразования, изменяются объемные и линейные размеры материала. При удалении из него влаги частицы материала сближаются, при увлажнении — раздвигаются. Следовательно, общие размеры материала определяются степенью его увлажнения. Зависимость между объемом тела V и его влагосодержанием U описывается формулой

$$V_U = V_0(1 + \beta_v U), \quad (4.55)$$

где V_U — объем материала при влагосодержании U ; V_0 — объем абсолютно сухого материала; U — влагосодержание материала; β_v — коэффициент объемной усадки.

В капиллярно-пористых коллоидных телах (в строительных материалах) линейная усадка происходит по линейному закону

$$l_U = l_0(1 + \alpha_l U), \quad (4.56)$$

где l_U — длина материала при влагосодержании U ; l_0 — длина абсолютно сухого материала; α_l — коэффициент линейной усадки, характеризующий интенсивность изменения линейных размеров материала.

Усадка и набухание материала зависят от его молекулярной структуры и от видов связи влаги с материалом. Из-за различного влагосодержания отдельных слоев материала при тепловой обработке их усадка в материале различна, что и приводит к развитию в нем напряженного состояния.

Для наглядного представления о напряженном состоянии, возникающем в материале при сушке, рассмотрим модель неограниченной пластины (рис. 4.15, а). Вырежем из нее пластину конечной длины l_0 (рис. 4.15, б) и отложим на ней разность влагосодержаний $\Delta U = U_0 - U_1$ в результате внутреннего тепло- и массообмена (см. рис. 4.11). Примем те же условия — влага может испаряться из пластины только с двух поверхностей по оси X .

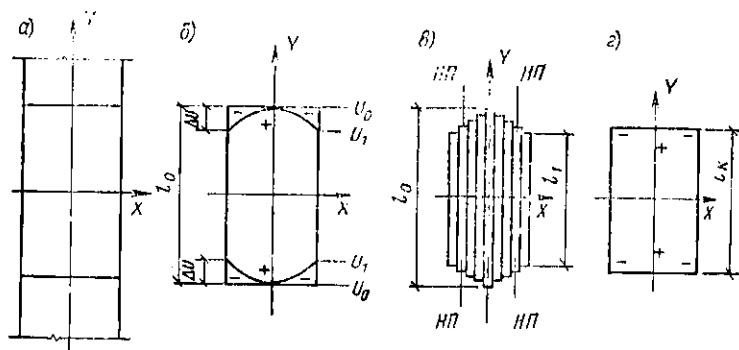


Рис. 4.15. Возникновение напряженного состояния в материале при сушке в результате ΔU на неограниченной пластине

Представим, что пластинка состоит из отдельных тонких полосок (рис. 4.15, в), которые могут сокращаться по длине самостоятельно. Согласно (4.56), каждая полоска должна иметь длину l_0 , соответствующую своему влагосодержанию. Так как в центре пластины влагосодержание пока не изменилось, то ее длина l_0 . На поверхности пластины полоска должна сократиться до l_1 . Промежуточные полоски должны сократиться меньше, причем каждая пропорционально своему влагосодержанию.

В действительности материал составляет одно целое, и его усадка при сушке идет до какой-то средней величины l_k (рис. 4.15, г). Из рис. 4.15, г видно, что центральные полоски сократились больше, чем должны были, а поверхностные сократились меньше, чем должны были. Центральные слои пластины оказались сжаты (см. знак «+»), а поверхностные — растянуты (см. знак «-»). Только два слоя НП (нейтральные плоскости) сократились настолько, насколько должны были сократиться, и поэтому они не напряжены (см. рис. 4.15, в).

Тогда при возрастании скорости сушки увеличится перепад влагосодержания ΔU , который приведет к росту напряженного состояния в материале. Развивающиеся силы растяжения и сжатия стараются сдвинуть отдельные слои материала относительно друг друга. Возникают тангенциальные напряжения, которые могут привести к образованию трещин.

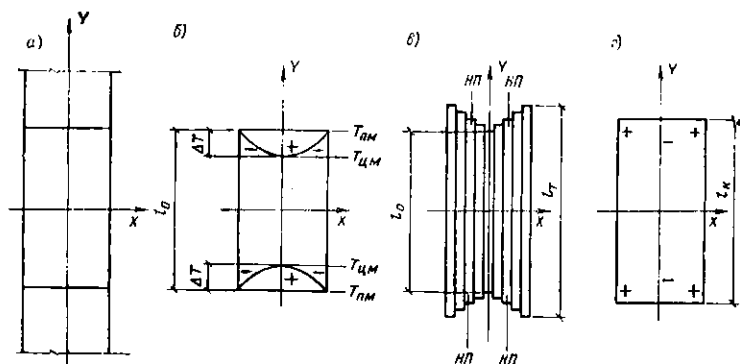


Рис. 4.16. Возникновение напряженного состояния в материале при сушке в результате ΔT на неограниченной пластине

В процессе сушки неравномерный нагрев материала по поперечному сечению также ведет к возникновению в нем напряженного состояния.

Для определения напряженного состояния возьмем опять неограниченную пластину (рис. 4.16, а) и из нее вырежем пластину конечной длины l_0 , соответствующей начальной температуре материала (см. рис. 4.11). Отложим на ней разность температур, $\Delta T = T_{\text{пм}} - T_{\text{цм}}$, в момент времени t_1 (рис. 4.16, б).

Представим, что пластина опять состоит из отдельных, не связанных между собой полосок, которые при нагреве удлиняются; их удлинение может быть определено по формуле

$$l_T = l_0(1 + \alpha_l T), \quad (4.57)$$

где l_T — длина любой нагретой пластины до температуры T (рис. 4.16, в); l_0 — начальная длина пластины; α_l — температурный коэффициент линейного расширения материала; T — температура нагрева пластины.

Согласно формуле (4.57), каждая полоска должна удлиняться пропорционально своей температуре нагрева, а вся пластина должна принять вид, изображенный на рис. 4.16, в. В действительности полоски связаны между собой в единое целое, и общее удлинение пластины для данного распределения температур будет соответствовать какой-то средней величине удлинения l_K (рис. 4.16, г).

Следовательно, крайние слои удлинились меньше, чем должны были, а центральные больше. В поверхностных слоях возникли напряжения сжатия, в центральных — растяжения, что и показано знаками соответственно «+» и «—». При напряженном состоянии материала от разности температур возникают нейтральные плоскости (НП), в которых слои удлинились настолько, насколько должны были, и в них напряженное состояние отсутствует (см. рис. 4.16, в).

Напряженные состояния, развивающиеся от разности влагосодержаний и от разности температур (см. рис. 4.16, г), имеют противоположные знаки. При их сложении необходимо вычесть из большего меньшее. Известно, что напряженное состояние, развивающееся от разности влагосодержаний, на порядок больше, чем от разности температур. Следовательно, суммарное напряженное состояние для данного случая будет незначительно меньше, чем от разности влагосодержаний.

При тепловлажностной обработке напряженное состояние от разности влагосодержаний и от разности температур имеет одинаковые знаки, и для определения суммарного они складываются.

При сушке, как и при тепловлажностной обработке, во внутренних слоях материала, как ранее показано, создается избыточное давление. Между отдельными слоями материала возникает перепад давлений, который приводит к появлению тангенциальных напряжений.

Таким образом, при тепловой обработке наблюдаются два вида развивающихся напряжений: растяжения и сжатия, возникающие от разности влагосодержаний и температур, и тангенциальные напряжения от разности давлений. Для определения полного напряженного состояния сначала определяют напряженное состояние от растяжения и сжатия, затем тангенциальные напряжения.

Понятие о безопасных режимах тепловой обработки. Для общего представления о безопасных режимах тепловой обработки покажем принцип определения скорости нагревания по напряженному состоянию материала.

Рассмотрим простейший случай нагревания изделий. В качестве примера возьмем несколько видов изделий: теплоизоляционную плиту с закрытой пористостью I; предварительно выдержанный (набравший после формовки незначительную прочность), железобетонный на-

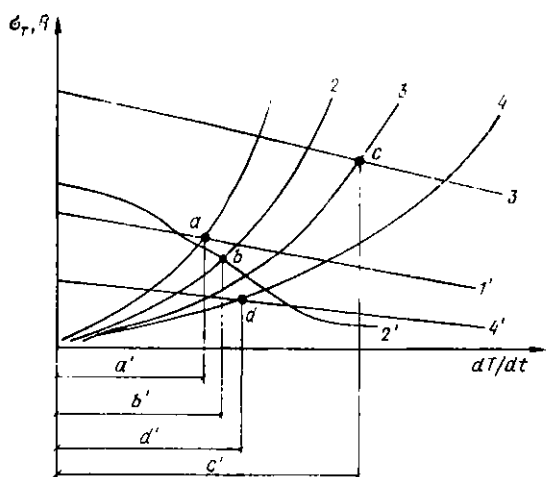


Рис. 4.17. Определение скорости нагревания изделий

стил 2; кирпич-сырец 3; теплоизоляционную скорлупу с открытой сообщающейся пористостью 4 (рис. 4.17).

В лаборатории исследуем суммарное тангенциальное напряжение σ_T , которое в зависимости от скорости нагрева dT/dt способно выдержать каждое изделие. Получим зависимость в виде кривых 1—4.

Далее исследуем прочностную характеристику R этих изделий — способность противостоять напряжению σ_T без каких-либо дефектов в зависимости от скорости нагревания и получим кривые 1', 2', 3' и 4'. Отметим, что кривая 1 пересекается с кривой 1' в точке a , следовательно, отрезок a' показывает, при какой скорости нагрева dT/dt произойдет разрушение теплоизоляционной плиты. Отсюда скорость нагрева такой плиты необходимо выбирать несколько меньшую. Аналогично рассматриваются кривые 2—4. Также можно рассмотреть и скорости охлаждения различных изделий.

Приведенный здесь принцип подхода к определению режимов тепловой обработки является обоснованным, но из-за отсутствия простых и надежных методов расчета напряженного состояния материалов в зависимости от условий тепло- и массообмена пока не применяется.

4.9. Принципы оптимизации тепловой обработки строительных изделий

При организации тепловой обработки проводят поиск наиболее экономически выгодного энергосберегающего решения с учетом обеспечения заданного качества готовой продукции. Такой вариант тепловой обработки и будет *оптимальным*.

При оптимизации тепловой обработки нельзя одновременно решать несколько задач. Например, решая задачу сокращения срока сушки газами и минимизации затраты энергии, можно получить некачественные изделия. Необходимость выпуска изделий требуемого качества может потребовать увеличения срока сушки и большого расхода энергии и т. д. Поэтому поиск оптимального решения ведут по какой-то выбранной оптимизируемой величине, которая получила название *критерий оптимизации*.

Выбрав критерий оптимизации теплового процесса, необходимо ввести какие-то *ограничения*. Например, выбирая в качестве критерия оптимизации минимальный срок сушки, в качестве ограничения вводят получение хорошего качества изделий. Ограничений может быть несколько. Для решения критериальных задач по оптимизации применяют различные математические методы. Сложные задачи имеют *компромиссные решения*¹.

Ранее оптимальные или близкие к ним процессы тепловой обработки изделий определялись инженерным опытом, подкрепленным многолетней практикой. Теперь с развитием науки об управлении сложными системами, называемой кибернетикой, применением ЭВМ и микропроцессоров, эти задачи стали более доступными. В промышленности начала применяться автоматизация с участием в управлении процессами тепловой обработки ЭВМ. Однако для применения ЭВМ необходимо иметь исчерпывающие знания о работе тепловых установок.

4.9.1. Понятие о принципах использования ЭВМ в установках для тепловой обработки

Во внедрении автоматизации технологических процессов можно проследить три этапа. Первый характеризовался стремлением к применению полной механизации

¹ Задачи по оптимизации излагаются в учебных пособиях по высшей математике, поэтому здесь не рассматриваются.

и автоматизации отдельных частей процессов, причем автоматизации подвергались только такие параметры процесса, которые создавали повышенную аварийную опасность (например, подача газа и воздуха на горение в печи). Этот этап включал разработку отдельных регуляторов и дистанционного управления ими в заданных пределах. Человек при этом только следил за исправной работой регулятора.

Второй этап — (современный) можно назвать этапом комплексной автоматизации. Создаются полностью механизированные технологии, технологические узлы, в которых весь процесс осуществляется с применением технических средств автоматизации. Человек, ведущий процесс, — оператор; он выполняет отдельные логические операции, управляет системой в пиковых (непредвиденных) обстоятельствах, оценивает состояние технологического процесса, контролирует работу автоматических систем.

Для этого периода также характерно применение отдельных регуляторов. Постепенно они совершенствуются, для их работы используются аналоговые принципы. Развитие электронной техники привело к развитию в основном электрических средств для получения информации о работе технологических узлов и линий, а также для регулирования их работы.

Потребовалась полная увязка работы технологических устройств и регуляторов, накладывающая дополнительные обязательства по их конструированию. Например, в сушильных установках потребовалось проектирование рециркуляции, широкого диапазона изменения начальных параметров сушильного агента и т. п. Следовательно, в настоящее время не представляется возможным рассматривать любую технологическую установку, в том числе и тепловую, без взаимной связи ее с системой автоматического регулирования.

Третий этап, к которому в настоящее время переходит промышленность строительных материалов, является этапом автоматизированных систем управления технологическим процессом (АСУТП). Этап характеризуется автоматизацией более сложных функций управления с применением ЭВМ, способных осуществлять сложные вычислительные и логические операции. Основой таких автоматов становятся программируемые циф-

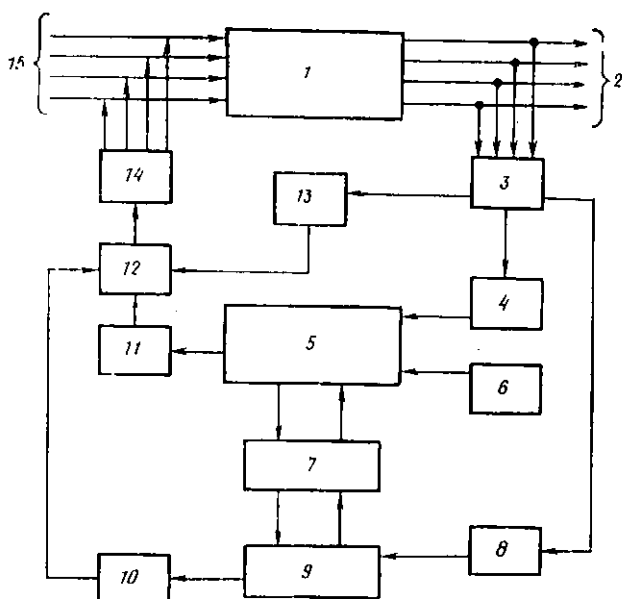


Рис. 4.18. Схема работы управляющего вычислительного комплекса (УВК)

ровые вычислительные машины (ЦВМ), которые сами принимают логические решения.

ЭВМ, связанные с технологическими процессами устройствами, выдающими информацию о ходе процесса, и устройствами, регулирующими этот процесс, составляют *информационно-управляющий вычислительный комплекс* (ИУВК), сокращенно управляющий вычислительный комплекс (УВК).

Современный УВК комплектуется из набора автономных функциональных блоков и модулей с унифицированными сопряжениями (совместимыми по характеристикам информационными и управляющими сигналами). Схема работы УВК с тепловой установкой в качестве объекта регулирования представлена на рис. 4.18. В установке 1 — объекте автоматизации, протекает процесс тепловой обработки материала. Выходные параметры осуществляемых процессов 2 (внешнего — тепло- и массообмена между теплоносителем и материалом и внутренних — проходящих внутри материала) изме-

ряются датчиками и преобразуются в сигналы в устройстве 3 — источнике получения информации.

Далее сигналы датчиков в аналого-цифровом преобразователе 4 переводятся на язык, понятный для ЭВМ или процессора 5, и вводятся в процессор 5; в этот же процессор из блока 6 оператором вводятся для конкретного технологического случая необходимые программы. В соответствии с программой процессором 5 выдается команда, передаваемая на дискретно-аналоговый преобразователь 11. Он передает ее на регулирование в исполнительный механизм 12, где эти сигналы-команды в случае необходимости усиливаются с целью воздействия на регулирующие органы 14, которые регулируют входные параметры автоматизации процесса 15. Кроме этого, процессор 5 выдает данные о регулируемых параметрах на дисплей 7 для оператора 9. Рассмотренный контур в последовательности 1-2-3-4-5-11-12-13-15 является системой автоматического ведения процесса по заданной программе. Назовем его контуром А.

Система автоматического регулирования имеет еще два контура (В и С). Контур В предусматривает возможность локального регулирования параметров по их изменению, минуя процессор 5. Этот контур в последовательности 1-2-3-13-12-14-15 может по сигналам источника получения информации 3 передавать ее на локальные (индивидуальные) исполнительные механизмы 12 к регулирующим органам 14 для необходимого изменения входных параметров 15.

Контур С — контур ручного управления, осуществляемого оператором. Последовательность работы контура 1-2-3-8-9-10-12-14-15. В случае перехода на ручное управление поступающие сигналы источника информации 3 передаются на систему дистанционного контроля 8. По данным дистанционного контроля оператор 9, принимая на себя управление процессом через избиратель управления 10, воздействует на исполнительные механизмы 12 и через регулирующие органы 14 ведет процесс посредством воздействия на параметры 15.

Избиратель управления 10 находится на пульте оператора и с его помощью при необходимости можно включить любой контур (А, В или С) управления процессом. Элементы 4, 5, 6, 7, 11, 12 входят в состав УВК. Система, состоящая из установки и УВК, которая обеспечивает ведение процесса в тепловой установке, назы-

вается *технологическим комплексом*, использующим АСУТП.

Для любого процесса регулирования, которым оснащена система АСУТП, создается своя программа, которая предусматривает ввод полученной информации об изменении управляемых параметров в процессоре 5. Вычислительный комплекс сравнивает информацию с соответствующей программой, вызывая ее из запоминающего устройства 6, называемого памятью. УВК находит соответствующее решение и в виде команд передает его на исполнительные механизмы, которые регулируют процесс.

4.9.2. Обеспечение применения ЭВМ

Для эксплуатации современной тепловой установки, оснащенной УВК, необходимы полные знания о технологическом процессе, проходящем в этой установке. Любой технологический или тепло- и массообменный процесс при современном подходе осуществляется, основываясь на принципах системного анализа. Обработка материала в тепловой установке рассматривается как сложный процесс, состоящий из элементов различных уровней от молекулярного до процесса в целом с учетом взаимодействия всех происходящих связей.

Применительно к тепловой обработке за начальный уровень можно принять (для взаимодействия теплоносителя с материалом) процессы внешней передачи теплоты и массы, передачу теплоты и массы внутри материала, напряженное состояние материала, химические реакции, протекающие в материале, и др.

Для представления о работе системы тепловой обработки материала составляют структурную блок-схему с учетом всех единичных процессов, принцип составления которой заключается в следующем. Представим систему в виде прямоугольника (рис. 4.19). Внешние воздействия на систему, называемые «входами» или «параметрами», обозначим $\bar{N}$, $\bar{X}$, $\bar{Z}$. Примем, что из внешних воздействий воздействия $\bar{N}$ можно контролировать и регулировать; воздействия $\bar{X}$ можно только контролировать (эти воздействия получены, например, в результате деятельности предыдущей технологической системы); воздействия $\bar{Z}$ — неконтролируемые и нерегулируемые.

В результате всех внешних воздействий на систему

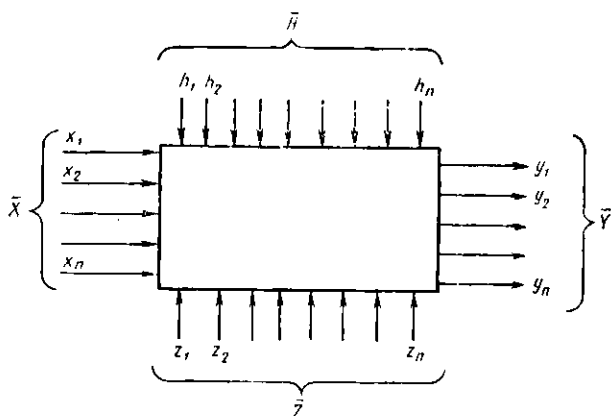


Рис. 4.19. Структурная блок-схема тепловой обработки

$h_1, h_2, \dots, h_n$ — контролируемые и регулируемые внешние воздействия (управления); $x_1, x_2, \dots, x_n$ — контролируемые внешние воздействия; $z_1, z_2, \dots, z_n$ — неконтролируемые и перегуливаемые внешние воздействия (возмущения); $y_1, y_2, \dots, y_n$ — отклики системы на внешние воздействия (выходные параметры)

($\bar{P}$, $\bar{X}$, $\bar{Z}$) получают после тепловой обработки требуемые свойства продукции, обозначаемые $\bar{Y}$. Тогда в общем виде математическое описание функционирования такой системы можно представить как систему уравнений

$$\bar{Y}_l = f_l(\bar{X}, \bar{H}, \bar{Z}). \quad (4.58)$$

Рассматривая по этой схеме систему тепловой обработки материала, отметим, что $\bar{Y}$ определяют свойства материала после обработки; $\bar{X}$ — свойства материала, поступающего на тепловую обработку; $\bar{H}$ — воздействия теплоносителя на материал (температуру T , влагосодержание d , скорость движения v и др.); $\bar{Z}$ — свойства тепловой установки и системы автоматического регулирования, например тепловая инерция, подсосы и выбивание воздуха и теплоносителя, запаздывание систем регулирования и т. д.

Если исключить из (4.58) параметр $\bar{Z}$ (в системе регулирования его называют параметром «шума», считая его для данной системы постоянным), то с некото-

рым приближенном система уравнений (4.58) может быть записана

$$\bar{Y}_i = \varphi_i(\bar{H}, \bar{X}). \quad (4.59)$$

Это уравнение называют характеристической функцией системы.

4.9.3. Принципы моделирования

Для выявления зависимости, выраженной уравнением (4.59), можно исследовать не только собственно систему, но и ее имитацию, например, выполнить модель и подвергнуть исследованию не саму систему, а ее модель. Моделирование — не только один из инструментов познания, но и средство экономии значительных материальных и энергетических ресурсов как при проведении исследований, так и при разработке новой техники.

Моделирование базируется на теории подобия. Эта теория отвечает на вопросы, как поставить эксперимент и обработать экспериментальные данные, чтобы иметь возможность распространить их на все подобные явления.

Подобными называют геометрически подобные системы, в которых протекают процессы одинаковой природы, а отношение одноименных величин, характеризующих явления (например, h_1 и x_1 первой системы к h_1 и x_1 второй системы), может быть записано постоянными числами. Предположим, система, используемая в качестве тепловой установки, состоит из металлического барабана, длина которого L_1 и диаметр D_1 . Модель тоже состоит из металлического барабана длиной L_2 и диаметром D_2 . Для геометрического подобия необходимы зависимости $L_2 = cL_1$ и $D_2 = cD_1$. Следовательно, для геометрического подобия тепловой установки и ее модели необходимо, чтобы величина масштабного множителя c была постоянной; $c = \text{const}$.

Для подобия тепловых процессов необходимо осуществить в модели физическое подобие, т. е. подобие всех физических величин. В отличие от геометрического подобия при физическом подобии существует свой множитель, посредством которого можно выразить физические величины основного процесса, например (скорости теплоносителя v_1 , теплоемкости c_1 , температуры T_1 , времени t_1) через одноименные величины v_2, c_2, T_2, t_2 мо-

дельного процесса. Эта зависимость может быть представлена в виде

$$v_2/v_1=c_v; c_2/c_1=c_c; T_2/T_1=c_T; l_2/l_1=c_l... \quad (4.60)$$

Коэффициенты c_v , c_c , c_T , c_l называют *константами подобия*, причем, как видно из определения, $c_v \neq c_c \neq c_T \neq c_l$.

Для исследования процессов тепло- и массообмена необходимо создать в проектируемой модели подобие указанных процессов. Для этого необходимо выполнить условия, при которых величины безразмерных комплексов для исследуемой системы и для модели будут равны. Под безразмерными комплексами, называемыми *критериями подобия*, понимают группу величин (параметров), описывающих какой-либо физический процесс. Например, критерий подобия, получивший название *критерия Рейнольдса*, описывает кинематическое подобие и выражается в виде $Re=vl/\nu$. Для подобия основной и модельной системы при описании гидродинамического процесса не обязательно, чтобы скорость движения теплоносителя v , размер изделия l ¹, который омывает теплоноситель, и кинематическая вязкость среды ν были равны, но обязательно, чтобы были равны их критерии подобия, т. е. $v_1 l_1 / \nu_1 = v_2 l_2 / \nu_2$.

Тепловое подобие описывается критерием Нуссельта $Nu=\alpha l/\lambda$. В него входит коэффициент теплоотдачи α , линейный размер изделия l и теплопроводность пограничного слоя у поверхности материала λ . Для подобия температурных полей необходимо, чтобы $\alpha_1 l_1 / \lambda_1 = \alpha_2 l_2 / \lambda_2$.

Подобие физических констант, характеризующее подобие температурных и скоростных полей, описывается критерием Прандтля $Pr=\nu/\alpha$. Для подобия также необходимо, чтобы отношение величин кинематической вязкости среды ν к температуропроводности α как в исследуемой системе, так и в модели было постоянным.

Критерий Фурье $Fo=\alpha t/l^2$ характеризует связь между изменением температуры и определяющим размером (в данном случае толщиной) тела l . В него входят величины температуропроводности α и времени t .

Критерий Био $Bi=\alpha l/\lambda$ характеризует связь между

¹ Строго говоря, l — путь, который проходит поток теплоносителя в рассматриваемой системе.

передачей теплоты внутри материала, теплопроводностью λ и теплоотдачей α на поверхности тела. В критериальную зависимость входит характерный линейный размер l в направлении теплопередачи.

Естественно, что при описании этих процессов для их подобия необходимо, чтобы критерии Fo и Bi для исследуемой и для модельной системы были равны.

4.9.4. Методы исследования процессов тепловой обработки

Для исследования применяются два метода. Первый называют *структурным*. Такой метод заключается в исследовании всех процессов, проходящих в установке для тепловой обработки и в самом материале. Сюда входят все процессы тепло- и массообмена, возникновения напряженного состояния, структурообразования материала и т. д. Такой сбор полных знаний о тепловой обработке требует исключительно длительных исследований.

Второй метод называют *кибернетическим* (или методом черного ящика). Этот метод позволяет абстрагироваться от всех сложных внутренних процессов, в том числе и от процессов, проходящих в материале. По этому методу, при известных входных параметрах материала x_i (параметрах материала, загружаемого в тепловую установку) и задаваемых параметрах изделия, выходящего из тепловой установки y_i , находят необходимые параметры управления процессом тепловой обработки h_i .

Сначала на модельной установке проводят спланированные с помощью методов математической статистики исследования, в результате которых выявляют значения $y_i = f(x_i, h_i)$ в виде снятых с натуры графиков, таблиц, номограмм и т. п. Эти зависимости и закладывают в основу построения *математической модели* системы.

Для получения из математической модели конкретного решения необходимо выбрать то, которое соответствует исследуемому явлению. С этой целью в модель вводят дополнительные граничные условия однозначности (краевые условия). В краевые условия входят сведения о геометрических свойствах системы; физические свойства и свойства взаимодействия системы с окружающей средой; данные о состоянии системы в началь-

ный и конечный момент времени; пределы, в которых исследуется влияние параметров.

При построении математической модели наиболее сложным является выбор связи между переменными полученными соотношениями $y_i = f(x_i, h_i)$, ибо каждое из этих уравнений определяет зависимость i -го выхода от всех входных параметров. Выбирая математическую модель, ищут уравнение, решение которого известно и может быть положено в основу решения поставленной задачи. Одним из возможных вариантов решения этой задачи выбирают, например, ряд Тейлора, который преобразуется в степенной ряд и отражает непрерывную функцию y . Если выбранная математическая модель — степенной ряд — отображает реальное решение задачи, что определяется проверкой (принцип показан далее на примере), то по этой модели определяются все необходимые условия тепловой обработки и переносятся на реальную установку.

Основным недостатком кибернетического метода является возрастающий процент ошибочных суждений, получаемый при числе параметров более 5. Поэтому при использовании данного метода параметры, определяющие ход процесса, подвергают ранжированию. Под *ранжированием* понимают деление параметров на значимые и малозначимые. Последние при исследовании отбрасывают.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

1. Расскажите о классификации способов тепловой обработки строительных изделий.

2. Какие тела применяют для моделирования влажного материала? Дайте их характеристику.

3. Расскажите о принципах составления тепловых и материальных балансов тепловых установок.

4. Какие виды теплообмена существуют?

5. Дайте характеристику процессов массоотдачи и массопередачи.

6. Расскажите о внешнем тепло- и массообмене при сушке строительных изделий.

7. Объясните внешний тепло- и массообмен при тепловлажностной обработке.

8. Дайте характеристику внутреннего тепло- и массообмена при сушке. Какие градиенты определяют движение массы внутри материала?

9. В чем заключается внутренний тепло- и массообмен при тепловлажностной обработке? Его отличие от аналогичного процесса при сушке.

10. Почему возникает напряженное состояние в материале при тепловой обработке, и как оно влияет на качество изделий?

11. В чем заключаются принципы оптимизации тепловой обработки строительных изделий, и как они решаются с помощью ЭВМ?

РАЗДЕЛ 2. ОСНОВЫ АЭРО- И ГИДРОДИНАМИКИ

Гидродинамика — наука о движении жидкости. Под словом «жидкость» в гидродинамике принято понимать собственно жидкость, а также газы и пар, ибо для расчета их движения с достаточной точностью используются одинаковые формулы. В промышленности строительных материалов движение газов в печах и сушилках принято относить к аэродинамическим процессам, а движение пара по каналам и трубопроводам к гидродинамическим.

ГЛАВА 5. ОСНОВЫ АЭРО- И ГИДРОДИНАМИКИ ТЕПЛОВЫХ УСТАНОВОК

Ранее указывалось, что газы, нагретый воздух, пар используются как теплоносители для тепловой обработки строительных материалов. Условия движения теплоносителей по тепловым установкам определяют условия внешнего тепло- и массообмена, а потому имеют важное значение в технологии указанных материалов.

5.1. Основные понятия о движении жидкости

Различают два вида движения жидкости: установившееся и неуставившееся. *Установившимся* называют такое, при котором скорость жидкости в любой точке занятого ею пространства не изменяется во времени. *Неустановившимся* называют движение жидкости, скорость и направление которой изменяются с течением времени.

Если жидкость движется по трубе (или каналу) и занимает все ее поперечное сечение, то в различных точках сечения наблюдается неодинаковая скорость ее движения. Обычно в центре потока — самая высокая ско-

рость, которая уменьшается по мере приближения к стенкам. Поэтому в инженерных расчетах используют среднюю скорость $\bar{v}$, представляющую собой отношение объема расходуемой в единицу времени жидкости V к площади свободного сечения (открытого для течения) потока S .

$$\bar{v} = V/S. \quad (5.1)$$

Под расходом жидкости понимают ее количество (в кг или м³), протекающее через поперечное сечение канала, трубопровода в единицу времени

$$V = S\rho\bar{v}; \quad V = S\bar{v}. \quad (5.2)$$

Расход, выраженный в кубических метрах за секунду, называют объемным, а в килограммах за секунду — массовым. Жидкость при течении может занимать все поперечное сечение канала, трубопровода. В этом случае ее поток называют *напорным*. Если движущаяся жидкость (поток) имеет свободную поверхность (занимает не все поперечное сечение канала, трубопровода), такой поток называют *безнапорным*.

Поперечное сечение канала, трубопровода, заполненное жидкостью, называют *живым сечением потока*. Обычно в каналах, трубопроводах используется для движения жидкости все поперечное сечение. В этом случае поперечное сечение канала, трубопровода будет равно живому сечению потока жидкости.

Изделия, подвергаемые тепловой обработке, занимают большую часть поперечного сечения тепловой установки; жидкость занимает меньшую часть. Поэтому живое сечение потока в тепловой установке не равно поперечному сечению тепловой установки, оно значительно меньше. Живое сечение потока жидкости определяют по формуле

$$S_{\text{ж}} = S_{\text{у}} - S_{\text{м}}, \quad (5.3)$$

где $S_{\text{ж}}$ — площадь живого сечения потока; $S_{\text{у}}$ — площадь поперечного сечения установки; $S_{\text{м}}$ — площадь поперечного сечения установки, занятая материалом.

Каналы, трубопроводы, по которым перемещается жидкость, могут иметь как круглое, так и другой формы сечение, поэтому для характеристики движения жидкости по ним вводятся понятия гидравлический радиус $R_{\text{г}}$ и эквивалентный диаметр $d_{\text{э}}$.

Гидравлический радиус — отношение площади живого сечения потока $S_{ж}$ к периметру канала, трубопровода U , по которому движется жидкость

$$R_r = S_{ж}/U. \quad (5.4)$$

Отсюда площадь живого сечения потока $S_{ж}$ определяют через гидравлический радиус R_r или через эквивалентный диаметр d_3

$$S_{ж} = \pi R_r^2 = (\pi/4) d_3^2. \quad (5.5)$$

Отсюда

$$R_r = S_{ж}/U = [(\pi/4) d_3^2]/\pi d_3 = d_3/4. \quad (5.6)$$

Тогда эквивалентный диаметр, выраженный через гидравлический радиус,

$$d_3 = 4R_r. \quad (5.7)$$

Подставив в (5.7) вместо R_r его значение из (5.4), получим окончательное значение d_3 :

$$d_3 = 4S/U. \quad (5.8)$$

Следовательно, *эквивалентный диаметр* потока в канале некруглого сечения — отношение учетверенной площади этого канала к его параметру. Для каналов круглого сечения d_3 равен диаметру канала d .

Установлено, что в природе существует два вида течения жидкости — *ламинарное* (слоистое), упорядоченное, при котором отдельные очень тонкие слои потока скользят параллельно, и *турбулентное* — вихреобразное, при котором частицы жидкости движутся по беспорядочным траекториям.

Двигаясь в турбулентном режиме, отдельные частицы жидкости лучше перемешиваются, поэтому и температура тепловой обработки более равномерна.

Рейнольдсом установлено, что режим течения жидкости зависит от скорости потока v , плотности жидкости ρ , диаметра трубопровода d_3 и сил внутреннего трения слоев, вызываемых динамической вязкостью жидкости η . Математическая зависимость этих параметров названа критерием Рейнольдса (Re); он равен

$$Re = v d_3 \rho / \eta^1. \quad (5.9)$$

¹ Поскольку $v = \eta/\rho$, где v и η соответственно кинематическая и динамическая вязкости, то формулу (5.9) можно написать в виде: $Re = v d_3 / \nu$. Для безнапорных потоков d_3 заменяют l (например, размер изделия, вдоль которого движется теплоноситель). Тогда критерий Рейнольдса $Re = vl/\nu$.

Режимы течения жидкости характеризуются разным значением критерия Рейнольдса, так, при $Re \leq 2320$ наблюдается ламинарное течение, при $Re = 2320—10000$ — переходный режим, при $Re > 10000$ — турбулентное течение.

5.2. Причины движения жидкости

Столб жидкости с площадью основания A и высотой h оказывает на площадь основания давление p , равное

$$p = Ah\rho g, \quad (5.10)$$

где ρ — плотность жидкости; g — ускорение свободного падения тела.

Давление, оказываемое столбом жидкости, называют *напором*. В общем случае жидкость при движении обладает потенциальной и кинетической энергией. Величина потенциальной энергии определяется уровнем и плотностью жидкости, геометрическим и статическим напором.

Геометрический напор выражает энергию положения жидкости по отношению к уровню, принятому за начало отсчета. Геометрическим напором жидкость обладает в том случае, если ее плотность отличается от плотности окружающей ее жидкости. Например, если газ в тепловой установке легче воздуха, окружающего установку, то этот газ старается подняться, если тяжелее — опуститься. Геометрический напор p_r используют в тепловых установках для создания движения теплоносителя с помощью естественной тяги. В этом случае движущей силой будет разность давлений между давлением в тепловой установке и на высоте, на которой идет выброс отработанного теплоносителя. Формула для определения разности этих давлений имеет вид

$$\Delta p_r = hg(\rho_a - \rho_r), \quad (5.11)$$

где $hg\rho_a$ — давление столба воздуха высотой h ; $hg\rho_r$ — давление столба теплоносителя с той же высотой.

Следовательно, чем больше высота, на которой отбирается теплоноситель, и меньше его плотность по отношению к окружающему воздуху, тем больше движущая сила теплоносителя Δp_r . Увеличение высоты, на которой отбирается теплоноситель из тепловой установки, создается дымовой трубой. Поэтому все тепловые уста-

новки, использующие естественную тягу, снабжаются высокими дымовыми трубами (50—80 м).

Современные тепловые установки с целью более интенсивной скорости движения теплоносителя используют искусственную тягу, создаваемую вентиляторами.

Статический напор p_c или, как его еще называют, статическое давление выражает разность энергии давления жидкости в тепловых установках, каналах, трубопроводах и давления окружающей среды

$$p_c = p_y - p_{ат}, \quad (5.12)$$

где p_c — статическое давление; p_y — давление в тепловой установке, канале, трубопроводе; $p_{ат}$ — атмосферное давление.

Если давление в установке, канале, трубопроводе выше атмосферного, то его называют положительным, если ниже — отрицательным.

Динамическое давление жидкостей p_d — давление, создающееся (насосами и вентиляторами) с помощью кинетической энергии движущегося потока; это давление может быть выражено

$$p_d = (v^2/2)\rho, \quad (5.13)$$

где v — скорость движущегося потока; ρ — плотность жидкости при температуре T .

5.3. Уравнение Бернулли и его применение

При движении жидкости по подводящим трубопроводам и тепловым установкам за счет сужения живого сечения потока часть потенциальной энергии этого потока переходит в кинетическую. При расширении живого сечения потока, наоборот, часть его кинетической энергии переходит в потенциальную. Для идеальной жидкости¹ сумма потенциальной и кинетической энергии остается неизменной.

Закон сохранения энергии Бернулли для установившегося движения идеальной жидкости гласит: при установившемся движении жидкости для любого участка потока сумма геометрического, статического и динамического напоров есть величина постоянная.

$$p_{г1} + p_{с1} + p_{д1} = p_{г2} + p_{с2} + p_{д2} = \text{const}, \quad (5.14)$$

где $p_{г}$; $p_{с}$, $p_{д}$ — соответственно геометрическое, статическое и динамическое давления.

¹ Идеальной называют жидкость, которая не сжимается под действием силы, не имеет вязкости и не изменяет плотности при изменении температуры.

При движении реальной несжимаемой жидкости, в результате потери давления на сопротивление движению, сумма напоров уменьшается на величину, потерянную на преодоление сопротивлений. Тогда уравнение Бернулли для реальной жидкости записывают в виде

$$p_r + p_c + p_d + p_n = \text{const}, \quad (5.15)$$

где p_n — давление, потерянное на преодоление сопротивлений на пути движения.

5.3.1. Аэро- и гидродинамическое сопротивление каналов и трубопроводов

Кроме жидкости, являющейся теплоносителем, в тепловых установках приходится иметь дело с теплоносителем — газом или паром, поэтому в дальнейшем в значении «теплоноситель» будем употреблять «жидкость», «газ» или «пар».

По пути движения газа или пара различают сопротивления трению и местные сопротивления. Сопротивления трению являются результатом соприкосновения газа или пара с поверхностями, ограждающими пути их движения, а также вследствие наличия внутреннего трения в потоке.

Местные сопротивления возникают за счет изменения скорости и направления по пути движения газа или пара вследствие вихревых образований, поглощающих определенное количество энергии движущегося потока.

Сопротивление трению $\Delta p_{\text{тр}}$ канала или трубопровода определяют по формуле

$$\Delta p_{\text{тр}} = (\lambda v^2 \rho l) / 2d_a. \quad (5.16)$$

Местные сопротивления подсчитывают

$$\Delta p_{\text{м}} = (\xi v^2 \rho) / 2. \quad (5.17)$$

В формулах (5.16) и (5.17) λ — коэффициент трения единицы длины канала, трубопровода; ξ — коэффициент местного сопротивления; v — скорость движения потока газа или пара; ρ — плотность потока газа или пара; l — длина канала, трубопровода; d_a — эквивалентный диаметр канала, трубопровода.

В общем виде сопротивление каналов или тепловых

установок движению потока газа или пара может быть выражено

$$\Delta p = a v^2 l, \quad (5.18)$$

где Δp — суммарное аэро- и гидродинамическое сопротивление; a — коэффициент общего аэро- и гидродинамического сопротивления, представляющий собой сумму двух частных коэффициентов: сопротивления трению и местного сопротивления; v — скорость движения потока; l — длина канала или установки.

Если сравнить формулы (5.16) с (5.18), затем (5.17) с (5.18), то в первом случае a равно $(\lambda \rho)/(2d_3)$, во втором случае a равно $(\xi \rho)/2$ при $l=1$.

5.3.2. Аэродинамическое сопротивление тепловых установок

В установках для тепловой обработки строительных материалов (кусковых, сыпучих, штучных, волокнистых) используется газообразный теплоноситель и водяной пар.

Рассмотрим схему тепловой установки (рис. 5.1), где такие материалы обрабатываются газообразным теплоносителем. В тепловой генератор 3 подается топливо 1 и воздух на горение 2. В тепловом генераторе готовится теплоноситель — продукты горения топлива, которые могут при необходимости разбавляться воздухом 4. Теплоноситель по каналу 5 поступает в тепловую установку 6, куда загружается материал (пространство, занимаемое материалом, заштриховано). Схемы загрузки материала показаны на рис. 5.2, а—в. Теплоноситель, воздействуя на материал, отдает теплоту и через канал 7 выбрасывается вентилятором 8 из установки.

Для того чтобы теплоноситель прошел по всей системе от теплового генератора до выброса его из установки, необходимо создать между генератором и тягодутьевым устройством перепад давления $\Sigma \Delta p$, равный

$$\Sigma \Delta p = \Delta p_1 + \Delta p_2 + \Delta p_3 + \Delta p_4 + \Delta p_5, \quad (5.19)$$

где Δp_1 — необходимое отрицательное давление в тепловом генераторе 3, чтобы огонь не выбивал в окружающее пространство (принимается по практическим данным); Δp_2 — суммарное сопротивление подводящего канала 5, состоящее из суммы местных сопротивлений и сопротивления трению, определяемых по формулам (5.16) и (5.17); Δp_3 — сопротивление тепловой установки 6 с загруженным материалом (рассматривается далее); Δp_4 — суммарное сопротивление отводящего канала 7, состоящее из суммы местных

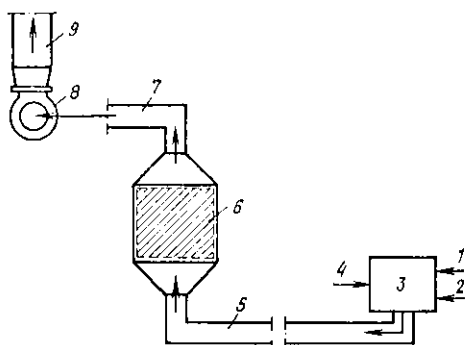


Рис. 5.1. Схема тепловой установки

сопротивлений и сопротивления трению, определяемое по формулам (5.16) и (5.17); Δp_5 — необходимый напор на тягодутьевом устройстве для выброса отработанного теплоносителя через трубу 9.

Сопротивление трубы 9 рассчитывается также по формулам (5.16) и (5.17), и полученная величина сравнивается с динамическим напором, затрачиваемым вентилятором на выброс отработанного теплоносителя. Если полученное сопротивление меньше, то за сопротивление трубопровода 9 принимается равное динамическому напору, если больше, то принимают полученное при расчете сопротивление трубы 9. Следовательно, для установления суммарного перепада давлений $\Sigma \Delta p$ необходимо знать (кроме величин $\Delta p_1, \Delta p_2, \Delta p_4, \Delta p_5$) Δp_3 — величину сопротивления слоя загруженного материала.

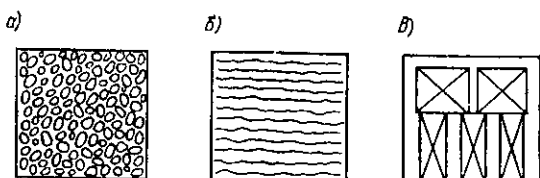
Принцип расчета сопротивлений слоев загруженного материала Δp_3 основан также на выявлении местных сопротивлений по формуле (5.17) и сопротивлений трению по формуле (5.16).

На основе использования этих формул и корректировки их для расчета сопротивлений кусковых (рис. 5.2, а) и сыпучих материалов, при работе установки в фильтрационном режиме (теплоноситель фильтруется через слой материала) используют формулу А. Г. Касаткина

$$\Delta p_3 = [3(1 - \varepsilon)/(2\varepsilon^3 \Phi)] [(\lambda H \rho v_0^2)/2a], \quad (5.20)$$

где ε^3 — объем свободного пространства между частицами в единице объема, занятого слоем материала; Φ — фактор формы; λ — суммарное сопротивление на трение и местные сопротивления каналов, образованных частицами (кусками) материала (определяется экспериментально); H — высота слоя материала; ρ — плотность про-

Рис. 5.2. Схемы загрузки материала в тепловую установку
 а — кускового;
 б — волокнистого;
 в — штучного



сасываемого теплоносителя; v_0 — фиктивная скорость, равная отношению объема теплоносителя, проходящего в единицу времени, ко всей площади поперечного сечения слоя (считается, что материала в сечении нет); d — средний диаметр частиц материала, из которых составлен слой.

При расчете сопротивлений слоя кусковых и сыпучих материалов по формуле (5.20) фактор формы Φ берут из теплотехнических справочников. Для некоторых тел, например, для куба $\Phi \approx 0,8$; для цилиндра $\Phi \approx 0,7$; для диска $\Phi \approx 0,3$.

Коэффициент суммарного сопротивления λ зависит от режима движения теплоносителя и определяется по формуле $\lambda = 133/Re + 2,34$. При $Re > 1$ вторым слагаемым можно пренебречь и $\lambda = 133/Re$; при $Re > 7000$ пренебрегают первым слагаемым и $\lambda = 2,34$.

По мере увеличения скорости теплоносителя через фильтрующий слой увеличивается его давление на куски и частицы материала. Когда это давление достигнет силы, равной силе тяжести частиц, они начинают выталкиваться из слоя. Сопротивление движению газа в месте разрушения слоя падает, скорость теплоносителя снижается, и частица снова возвращается в слой. Слой, при котором возникает циклическое движение группы частиц, называют *кипящим*, или *псевдооживленным слоем*.

Сопротивление кипящего слоя $\Delta p_{кс}$ кусковых и сыпучих материалов определяется по различным формулам. Простейшая из них

$$\Delta p_{кс} = H_0(1 - P_0)\rho, \quad (5.21)$$

где H_0 — высота спокойного слоя; P_0 — пористость спокойного слоя; ρ — истинная плотность материала.

Сопротивление слоя волокнистых материалов, например, минераловатного ковра (рис. 5.2, б), определяют по формуле

$$\Delta p_3 = [(\lambda_v \rho / 2) (v_0 / P_0)^2] [\Phi (H s_{yn}) / 2 P_0], \quad (5.22)$$

где λ_v — коэффициент сопротивления минераловатного слоя; $\lambda_v = 72/Re + 0,8$; ρ — плотность теплоносителя; P_0 — пористость слоя;

H — высота слоя; s_{yn} — удельная истинная поверхность слоя; $s_{yn} = [3s(1 - \Pi_0)] / (2\Pi_0)$; s — удельная поверхность слоя; Φ — коэффициент формы, показывающий, во сколько раз реальная удельная поверхность волокнистого слоя отличается от вычисленной (в практике принимают $\Phi = 1,2$).

Расчет сопротивлений садки штучных изделий (рис. 5.2, в) с учетом использования формулы А. Г. Касаткина ведут по формуле

$$\Delta p_{ш} = \left(\lambda \ln / d_s + \sum_{i=1}^{n+1} \xi_{мс} \right) (v^3 \rho / 2), \quad (5.23)$$

где λ — коэффициент трения теплоносителя о стенки изделий; l — длина или высота садки, определяемая как произведение длины или высоты одного ряда изделий на количество рядов изделий в садке n ; d_s — средний эквивалентный диаметр отверстий, образуемых садкой изделий; $\xi_{мс}$ — см. формулу (5.17); v — средняя скорость теплоносителя в живом сечении садки изделий; ρ — плотность теплоносителя.

Сущность явлений, происходящих при обтекании газом садки изделий, заключается в следующем: поток теплоносителя, попадая в каналы первого ряда садки, испытывает сужение (см. рис. 5.2, а). Эти каналы имеют один эквивалентный диаметр d'_s ; каналы второго ряда имеют другой эквивалентный диаметр d''_s . При переходе от d'_s к d''_s теплоноситель испытывает либо сужение, либо расширение (в зависимости от соотношения величин d'_s и d''_s). Эти сужения или расширения приводят к завихрению теплоносителя и вызывают падение напора. Далее теплоноситель попадает в каналы третьего, четвертого и так далее рядов садки и всюду испытывает местные сопротивления $\xi_{мс}$.

Тогда при количестве рядов садки по длине n количество сужений и расширений составит $(n+1)$, следовательно, в формуле (5.23) сумму $\sum$ рядом следует взять от 1 до $n+1$. Член $(\lambda \ln / d_s)$ в формуле (5.23) отражает коэффициент сопротивления движению теплоносителя λ за счет трения о стенки канала на длине $\ln$.

Сложив коэффициент трения $(\lambda \ln / d_s)$ и коэффициенты местных сопротивлений $\sum_{i=1}^{n+1} \xi_{мс}$, получаем суммарный коэффициент аэродинамического сопротивления садки на ее длине. Отсюда, определив скорость v в живом сечении садки, вычисляем аэродинамическое сопротивление садки, или, что то же самое, сопротивление тепловой установки с загруженным материалом.

5.4. Аэродинамические балансы тепловых установок

Для определения сопротивлений трению, а также местных сопротивлений необходимо знать количество теплоносителя, проходящего по тепловой установке в единицу времени.

При конструировании и эксплуатации тепловых установок выявляют распределение потоков газа и воздуха с учетом их поступления и расходования. Для этого на каждую работающую или проектируемую установку составляют аэродинамический баланс.

В основу аэродинамического баланса положен закон сохранения массы. По этому закону масса поступающих в тепловую установку теплоносителя, воздуха, газов и масса веществ, выделяющихся из материала в процессе тепловой обработки (например, влаги), должна быть равна массе выходящих из нее газов (отработанного теплоносителя).

$$\Sigma G_{\text{пр}} = \Sigma G_{\text{р}}. \quad (5.24)$$

где $\Sigma G_{\text{пр}}$ — суммарная масса поступающих теплоносителя и газов, выделяющихся из материала; $\Sigma G_{\text{р}}$ — суммарная масса выходящих газов (расходуемого теплоносителя).

В приходных статьях баланса учитывают не только количество работающего теплоносителя, но и выбивание газа, а также подсосывающего окружающего воздуха через неплотности в установке. Исходным количеством для расчета теплоносителя, работающего в тепловой установке, служит его удельный расход на единицу обрабатываемой продукции и производительность установки в единицу времени.

Рассмотрим пример составления аэродинамического баланса туннельной сушилки, схема которой дана на рис. 5.3, а. Сушилка состоит из теплового генератора 1, в котором сжигается газообразное топливо. Продукты горения из генератора 1 поступают в смесительную камеру 2, где разбавляются воздухом до необходимой температуры, с которой теплоноситель всасывается вентилятором 3 и нагнетается в сушилку 4. Здесь теплоноситель ассимилирует влагу из материала и отсасывается вентилятором 5.

По удельному расходу теплоносителя на испарение 1 кг влаги и по часовой производительности сушилки (по влаге) определяют часовой расход теплоносителя

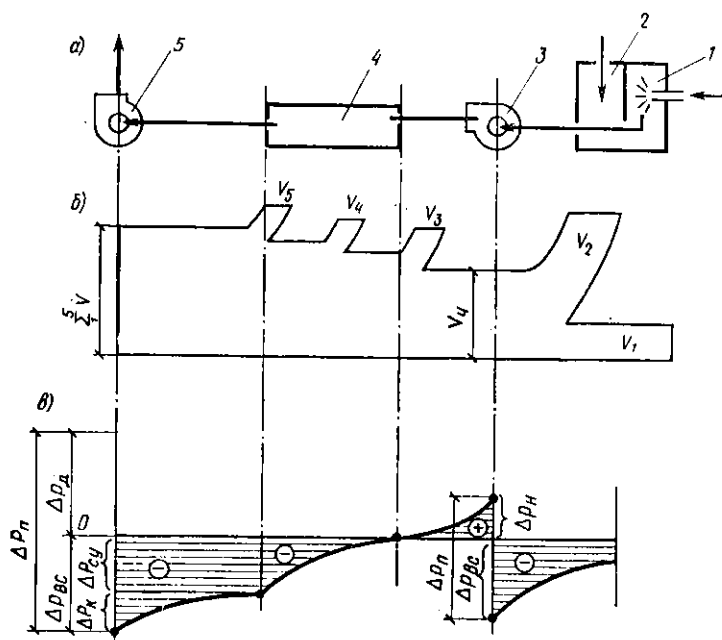


Рис. 5.3. Технологическая схема (а), схема аэродинамического баланса (б) и расчет сопротивлений (в) по пути движения теплоносителя в туннельной сушилке

V_q (рис. 5.3, б). Этот теплоноситель готовят путем смешивания продуктов горения топлива V_1 с холодным воздухом V_2 .

Теплоноситель, объем которого V_q , подается вентилятором в сушилку. Чтобы дымовые газы не попадали в цех, установка работает на отрицательном давлении, которое создается вентилятором 5 (рис. 5.3, в). Поэтому через неплотности в дверных проемах и через стены (они также не могут быть абсолютно герметичными) подсасывается наружный воздух. Через неплотности в дверях поступает воздух объемом V_3 и V_5 , через неплотности стен поступает воздух объемом V_4 , который показан условно в виде сосредоточенного потока. Суммарный поток отработанного теплоносителя $\sum_{i=1}^5 V_i$ вентилятором 5 выбрасывается в атмосферу, согласно прак-

тическим данным для расчета можно принимать $\sum_3 V$ 15—20 % от $V_{\text{ч}}$.

По вычисленным количествам теплоносителя V_1, V_2, V_3, V_4, V_5 графически изображают аэродинамический баланс (см. рис. 5.3, б). Составленный баланс тепловой установки является исходным для определения сопротивлений движению теплоносителя и для выбора тягодутьевых устройств (вентиляторов).

Для расчета сопротивлений движению теплоносителя составляется расчетная диаграмма, которая показана на рис. 5.3, в. Отметим, что в тепловом генераторе 1 сжигается топливо. Чтобы продукты горения не выбивали в цех, в тепловом генераторе создается отрицательное давление, обычно не превышающее 30—50 Па. Далее отрицательное давление должно возрасти, ибо на преодоление сопротивлений при опускании продуктов горения в тепловом генераторе, при проходе их через отверстие в камеру смешивания, на завихрение потока при смешивании, выход в канал, подводящий газы к вентилятору 3, и на сопротивление этого канала расходуется определенное давление.

Всю ветвь прохождения газов к вентилятору называют всасывающей ветвью. Так как сопротивление определяется по формуле (5.18) и зависит от v^2 , то возрастание давления на рис. 5.3, в покажем на кривой второго порядка — параболой. На выходе из вентилятора образуется динамический напор в виде положительного давления $\Delta p_{\text{н}}$.

Для работы сушилки под разрежением необходимо, чтобы положительное давление, развиваемое вентилятором, расходовалось на преодоление сопротивлений перед входом в сушилку, что и показано на рис. 5.3, в.

Для выбора вентилятора 3 необходимо определить сопротивление всасывающей ветви от теплового генератора до вентилятора 3 $\Delta p_{\text{вс}}$ и сопротивление нагнетающей ветви $\Delta p_{\text{н}}$ от вентилятора 3 до сушилки 4. Тогда можно определить количество транспортируемого теплоносителя $V_{\text{ч}}$ и полный напор $\Delta p_{\text{п}} = \Delta p_{\text{вс}} + \Delta p_{\text{н}}$ (см. рис. 5.3, в) для подбора вентилятора 3.

Сушилка 4, как указывалось, работает на отрицательном давлении. Сопротивление ее движению теплоносителя можно определить по формулам (5.20—5.23). Изобразим это сопротивление $\Delta p_{\text{су}} = \Delta p_3$ на рис. 5.3, в.

Далее идет сопротивление подводящего канала от сушилки 4 к вентилятору 5. Обозначим его Δp_k . Вентилятор 5 всасывает отработанный теплоноситель и за счет создания положительного динамического напора Δp_d выбрасывает отработанный теплоноситель в атмосферу.

Для подбора вентилятора 5 тоже можно определить количество транспортируемого теплоносителя, которое равно $\sum_1^5 V$, и полный напор, состоящий из всасывающей ветви $\Delta p_{вс}$, которая, в свою очередь, состоит из $\Delta p_{св}$ и Δp_k , и нагнетающей ветви Δp_d . Следовательно, полный напор ΔP_n будет равен: $\Delta P_n = \Delta p_{св} + \Delta p_k + \Delta p_d$.

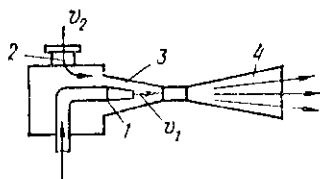
5.5. Устройства для перемещения теплоносителя в тепловых установках

Перемещение газообразных теплоносителей в тепловых установках может осуществляться как за счет естественной, создаваемой дымовой трубой, так и за счет искусственной, создаваемой вентиляционными устройствами, тяги. Интенсификация работы сушильных установок и обжиговых печей привела к необходимости использовать только искусственную тягу, осуществляемую вентиляторами и эжекторами.

Эжекторами, или струйными аппаратами, называют такие, в которых за счет смешивания двух газовых потоков с разными энергиями и давлениями образуется общий поток с промежуточными значениями энергии и давлений. На рис. 5.4 показана схема работы эжектора. Из сопла 1 под давлением p_1 со скоростью v_1 подается струя газов (допустим, дымовых). За счет создаваемого в патрубке 2 отрицательного давления струя засасывает (эжектирует) определенное количество другого газа (например, воздуха) со скоростью v_2 . В камере 3 у суженного ее конца происходит интенсивное смешивание обоих компонентов, и смесь выбрасывается через диффузор 4. Поэтому эжектор предназначен не только для транспортировки газов, но и для их перемешивания.

Для того чтобы эжектируемый теплоноситель попал в патрубок 2, ему необходимо преодолеть сопротивление. Оно определяется разностью между давлением p_n внутри камеры 3 и давлением в окружающей эжектор среде p_c (давлением, расходуемым на преодоление со-

Рис. 5.4. Схема работы эжектора



противления патрубку 2, пренебрегаем). Тогда эту разность давлений можно записать в виде

$$\Delta p = p_k - p_o. \quad (5.25)$$

Разность давлений Δp преодолевается струей эжектирующего теплоносителя и уменьшает силу давления, которую бы могли развивать газы внутри диффузора 4. Поэтому в диффузоре создается кинетическая энергия движения смеси $v_2^2 \rho / 2$, где v_2 несколько меньше v_1 . Детальный расчет эжекторов приводится в специальной литературе. Эжекторы применяют в сушильных и печных установках для создания замкнутой циркуляции теплоносителя, используют в горелочных устройствах для подсосывания и смешивания газа с воздухом перед сжиганием, а также для подачи и отбора теплоносителей.

Для перемещения теплоносителей по тепловым установкам широко применяют осевые и центробежные вентиляторы. Осевые (рис. 5.5) состоят из корпуса 1, рабочего колеса 2, снабженного лопастями 3, и электродвигателя 4, размещаемого на перемычке корпуса. При вращении рабочего колеса лопасти захватывают теплоноситель и перемещают его вдоль оси корпуса. Осевые вентиляторы оказывают движению теплоносителя незначительное сопротивление, поэтому их коэффициент полезного действия достигает 0,7—0,75. Однако максимальный напор, создаваемый осевыми вентиляторами, невелик и составляет 250—300 Па.

Осевые вентиляторы выпускают диаметром 400—1200 мм и рассчитываются на транспортировку 1200—4000 м³ теплоносителя в час. Так как электродвигатель осевых вентиляторов находится в потоке теплоносителя, то температура их применения ограничивается 373 К. Осевые вентиляторы применяют в основном для создания циркуляции теплоносителя в сушильных установках, иногда с той же целью в зонах подогрева и охлаждения промышленных печей. Применение осевых вентиляторов сопряжено с необходимостью устройства специ-

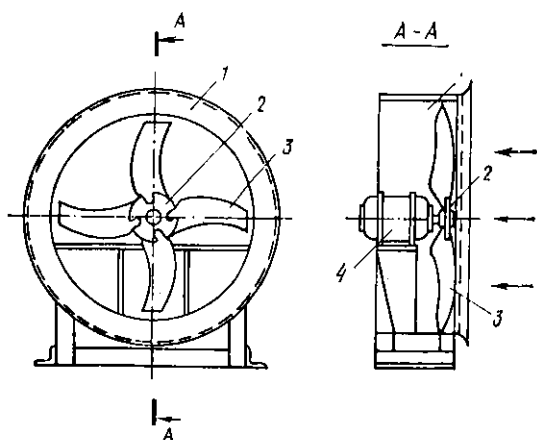


Рис. 5.5. Схема осевого вентилятора

альных карманов для их размещения с целью более доступной изоляции электродвигателей от воздействия высокой температуры.

Для создания искусственной тяги широко применяют центробежные вентиляторы. Центробежные вентиляторы, выпускаемые промышленностью, подразделяют по давлению, на которое они рассчитаны. Вентиляторы, предназначенные для создания давления до 1000 Па, называют вентиляторами низкого давления. Вентиляторы среднего давления рассчитаны на создание давления до 2000 Па, а высокого — на давление 2000—10000 Па. Кроме того, вентиляторы разделяются по номерам. Малые номера соответствуют малой производительности, большие — максимальной. Производительность вентиляторов низкого и среднего давления в зависимости от номеров составляет 3000—100 000 м³ газа в час. Вентиляторы высокого давления выпускаются производительностью 5000—20000 м³ газа в час. Температура применения центробежных вентиляторов составляет до 573—625 К. При отборе более горячих газов используют водяное охлаждение подшипников.

Схема центробежного вентилятора показана на рис. 5.6. Он состоит из кожуха спиральной формы 1, внутри которого с небольшим эксцентриситетом вращается колесо 2, укрепленное на валу 4 с лопатками 3. Колесо приводится во вращение от электропривода

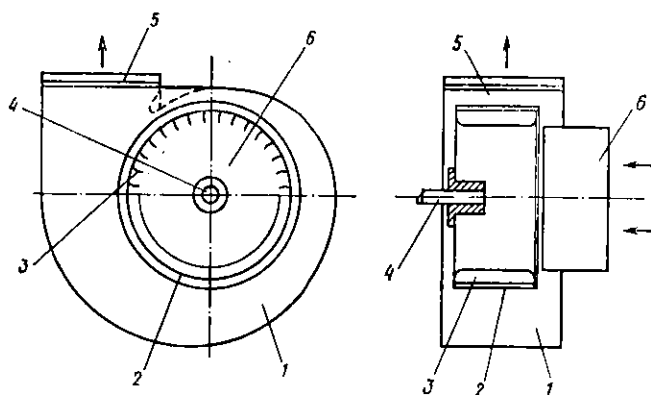


Рис. 5.6. Схема центробежного вентилятора

и соединено с ним через редуктор или клиноременную передачу и редуктор. Вентилятор имеет всасывающий патрубок 6. Поступающий в вентилятор газ через патрубок 6 под действием центробежной силы, развиваемой колесом с лопатками, отбрасывается от центра к поверхности кожуха, сжимается за счет эксцентриситета и через патрубок 5 выбрасывается. Внутри вентилятора при этом создается отрицательное давление, вследствие чего новые порции газа засасываются в патрубок 6.

Количество газа (теплоносителя), подаваемого вентилятором в тепловую установку или отсасываемого из нее, зависит от аэродинамического сопротивления, которое газ преодолевает на пути движения. При увеличении количества транспортируемого газа развиваемый вентилятором полный напор уменьшается. При увеличении полного напора уменьшается количество транспортируемого газа.

При работе осевые и центробежные вентиляторы создают в каналах, трубопроводах статическое и динамическое давления, сумма которых составляет полный напор. За счет статического давления преодолевается сопротивление трубопроводов и тепловых установок. Динамическое давление представляет собой скоростной напор, определяющий скорость движения теплоносителя в каналах и установках.

Полезная мощность электропривода, потребляемая

вентилятором P , определяется количеством транспортируемого теплоносителя и развиваемым при этом полным напором; она определяется по формуле

$$P = V_{\text{ср}} \rho_{\text{т}} = g \Delta p_{\text{п}}, \quad (5.26)$$

где $V_{\text{ср}}$ — объем теплоносителя, транспортируемый за 1 с; $\rho_{\text{т}}$ — плотность теплоносителя при температуре T ; $\Delta p_{\text{п}}$ — полное давление, развиваемое вентилятором.

Мощность, потребляемая электродвигателем $P_{\text{дв}}$, больше полезной мощности вследствие потерь, которые учитываются КПД вентилятора $\eta_{\text{в}}$ и передачи $\eta_{\text{п}}$, поэтому $P_{\text{дв}}$ составляет

$$P_{\text{дв}} = (V_{\text{ср}} \rho_{\text{т}} g \Delta p_{\text{п}}) / 3,6 \eta_{\text{в}} \eta_{\text{п}}. \quad (5.27)$$

С учетом пусковой перегрузки мощность электродвигателя для вентилятора выбирают с запасом на 10—15 %.

Для подбора вентиляторов пользуются их характеристиками. Характеристики вентиляторов определяются конструкцией рабочего колеса и кожуха; эти элементы для всех вентиляторов одного и того же типа подобны. Посредством испытания модели определенного типа вентиляторов составляют его аэродинамическую характеристику. Аэродинамические характеристики вентиляторов могут быть безразмерными (обобщенными) и индивидуальными (размерными).

При подборе вентиляторов пользуются размерными характеристиками, которые составлены для нормальных условий. Нормальными условиями принято считать температуру транспортируемого воздуха, равную 293 К, относительную влажность $\varphi = 50\%$ и барометрическое давление $\sim 0,01$ МПа. При подборе вентиляторов для тепловых установок можно пренебречь влагосодержанием и давлением воздуха из-за их незначительного влияния на производительность вентилятора. Однако обязательно вносить поправку на температуру транспортируемого теплоносителя, ибо плотность газов ρ резко меняется с изменением температуры.

На рис. 5.7 показана размерная характеристика центробежного вентилятора среднего давления серии ЦВ № 10. По оси абсцисс отложен объем транспортируемого воздуха V , м³/ч, по оси ординаты — полное давление $p_{\text{п}}$, Па, развиваемое вентилятором. Кроме того, показаны КПД η , который дает вентилятор при транспортирова-

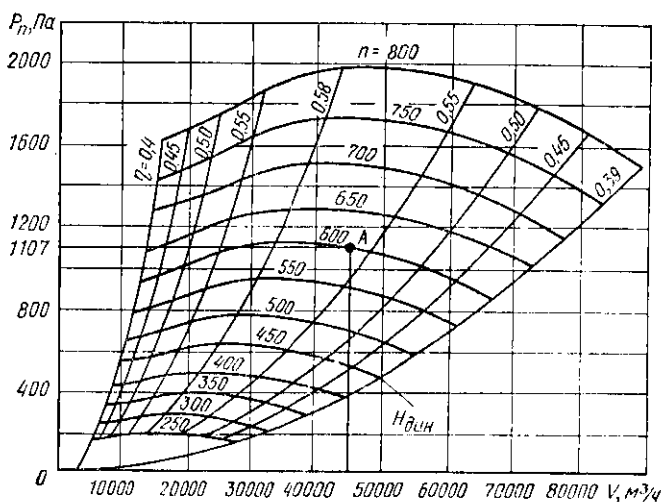


Рис. 5.7. Размерная характеристика центробежного вентилятора среднего давления серии ЦВ № 10

нии теплоносителя, и необходимая частота вращения рабочего колеса вентилятора n .

Рассмотрим принцип подбора вентилятора по каталогам на примере размерной характеристики, представленной на рис. 5.7.

Пусть по расчету требуется транспортировать 45000 м³ теплоносителя при 373 К и при этом преодолеть полное сопротивление установки 900 Па.

Выбор вентилятора начинают с количества транспортируемого теплоносителя, причем объем берется независимо от температуры, как и при нормальных условиях. Находим по характеристике объем 45000 м³ и проводим вертикальную линию вверх; отметим при этом, что линия проходит сначала при давлении 500—600 Па в области низких КПД. По мере увеличения развиваемого полного давления вертикальная линия попадает в область более высоких КПД и при давлении p_n , равном 1000 Па, попадает в область КПД, равного 0,55. При увеличении p_n частота вращения вентилятора, необходимая для транспортировки 45000 м³ теплоносителя, возрастает.

Рассмотрим далее заданное давление, равное 900 Па.

Известно, что с уменьшением плотности воздуха ρ для его транспортировки вентилятор должен увеличить частоту вращения. Поэтому для создания давления 900 Па при 373 К необходимо сделать пересчет

$$p_{п\tau} = p_{п} \frac{K}{293} = 900 \frac{373}{273} = 1107 \text{ Па}.$$

Отложив это давление на вертикальной линии, проведенной от значения 45000 м³, получим точку А, характеризующую параметры работы вентилятора: $V = 45000 \text{ м}^3/\text{ч}$; $p_{п\tau} = 1107 \text{ Па}$; КПД=0,55; частота вращения $n=600$.

5.6. Снабжение паром тепловых установок

Пар для снабжения тепловых установок преодолевает сопротивление подающих магистралей за счет собственного давления. Поэтому пар должен поступать на завод или приготавливаться в заводской котельной с давлением, превышающим требуемое для использования в установках. Отсюда необходимо знать принцип расчета систем снабжения паром и уметь определять потери давления пара при его транспортировке.

Потери давления при транспортировке пара подразделяют на линейные и местные.

Под линейными $p_{л}$ подразумевают потери на преодоление сил трения по всей длине паропроводов, которые могут быть подсчитаны по формуле (5.16). Для практических расчетов линейных потерь пользуются теплотехническими таблицами, приведенными в справочниках по отоплению и вентиляции. Исходя из заданного количества транспортируемого пара по этим таблицам выбирают диаметр необходимого паропровода и получают удельные потери $p_{лу}$ на преодоление сопротивления трения 1 м паропровода. Полные линейные потери для всего паропровода при длине L получают из формулы

$$p_{л} = \Delta p_{лу} L. \quad (5.28)$$

Местные потери давления $p_{м}$ представляют собой потери на повороты, преодоление сопротивления задвижек, фасонных частей паропровода, сужений и т. д. и определяют по формуле (5.17).

Все местные сопротивления в паропроводах принято

приводить к линейным, т. е. представлять любое местное сопротивление в виде эквивалентной ему линейной потери по длине паропровода. Такая расчетная длина паропровода называется эквивалентной длиной и обозначается $L_э$. Если все местные сопротивления на участках паропровода заменить $L_э$, получим $\Sigma L_э$.

Тогда полное сопротивление паропровода p_n составит

$$p_n = \Delta p_{\Sigma y} (L + \Sigma L_э). \quad (5.29)$$

Отсюда давление пара, которое необходимо иметь в начале магистрали, ведущей к тепловой установке, p_n , должно составлять не менее

$$p_n = p_n + p_y, \quad (5.30)$$

где p_y — давление пара, используемое в тепловой установке.

В случае, если давление подаваемого пара (от ТЭЦ или заводской котельной) превышает p_n , то на пути пара ставят дроссельную диафрагму, снижающую давление до p_n .

Отвод конденсата из тепловых установок должен быть взаимосвязан с подачей пара. Пропускная способность конденсатоотводящей системы должна быть рассчитана на количество образующегося конденсата. В практике масса такого конденсата G_k принимается равной массе подаваемого пара. Пар вторичного вскипания $G_{пв}$ определяют по формуле

$$G_{пв} = [(T_1 - T_2) G_k] / r, \quad (5.31)$$

где T_1 и T_2 — температура конденсата при давлении, поддерживаемом в установке и в сети (атмосферное давление); r — теплота парообразования.

Объем удаляемого из установки воздуха, при отсутствии обмена с окружающей средой, за расчетный период определяется свободным объемом (незаполненным изделиями) установки. Установив объем конденсата, пара вторичного вскипания, по теплотехническим справочникам выбирают необходимый диаметр конденсатопровода. При этом объем конденсата с учетом возможного пролета пара в конденсатоотводящую систему принимают с увеличением объема на 10—15 %. Для уменьшения пролета пара на выходе из установки предусматривают конденсатоотводящие устройства: водоотделительные петли, дроссельные диафрагмы, конденсационные горшки.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

1. Какое движение жидкости называют установившимся и неустановившимся?
2. Какой поток называют напорным и безнапорным?
3. Дайте определение живого сечения потока.
4. Что называют гидравлическим радиусом и эквивалентным диаметром трубопровода?
5. Расскажите о ламинарном и турбулентном течении жидкости.
6. Какой напор называют геометрическим, статическим, динамическим?
7. Сформулируйте закон Бернулли.
8. Объясните принцип возникновения сопротивлений на пути движения жидкости и газа.
9. Объясните принцип расчета аэродинамических сопротивлений садов изделий в тепловых установках.
10. Дайте определение фильтрующему слою, кипящему слою, расскажите об использовании этих понятий в тепловых установках.
11. С какой целью составляются аэродинамические балансы тепловых установок? Каковы принципы их составления?
12. Опишите устройства, применяемые для транспортировки теплоносителей.
13. Объясните принцип подбора вентиляторов.
14. Как подобрать паропровод и рассчитать его сопротивление?

РАЗДЕЛ 3. ТОПЛИВО И ПРОЦЕСС ГОРЕНИЯ

В тепловых установках строительной индустрии в качестве рабочего тела используют продукты горения топлива — дымовые газы, нагретый воздух, воду, масло, водяной пар. Дымовые газы — основной вид высокотемпературного теплоносителя, применяемого при обжиге строительных изделий. Получение дымовых газов связано с сжиганием топлива.

ГЛАВА 6. ТОПЛИВО И ЕГО СЖИГАНИЕ

В технике топливом называют горючие вещества, соединение которых с кислородом воздуха сопровождается выделением теплоты¹ и света. Не все горючие вещества могут служить промышленным топливом. На-

¹ Исключение составляет ядерное топливо, которое в тепловых установках промышленности строительных материалов пока не используется.

пример, ацетон, бензол, спирт и подобные им жидкости хотя и являются горючими веществами, но не применяются в качестве топлива. В промышленных печах и тепловых генераторах сжигают дешевые виды топлива, которое и используют в технологических целях. Эти виды топлива по принципу использования называют технологическим топливом.

6.1. Виды топлива и его свойства

Все известные виды технологического топлива делят по происхождению на *природные* и *искусственные*. Первые встречаются в природе, искусственные получают переработкой природных.

По агрегатному состоянию топливо подразделяют на твердое, жидкое и газообразное (табл. 6.1).

ТАБЛИЦА 6.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ТОПЛИВА

Происхождение	Агрегатное состояние		
	твердое	жидкое	газообразное
Природное	Древесина, торф, горючие сланцы, бурые угли, каменные угли, антрациты	Н	Природный газ
Искусственное	Кокс, топливные брикеты, пылевидное топливо	Мазут, соляровое масло	Доменный, коксовый, нефтяной, сланцевый, генераторный газы

В элементарный химический состав топлива (рис. 6.1) входят углерод, водород, кислород и азот. Кроме того, в топливе содержится сера, зола и влага.

Углерод, водород, кислород и азот образуют органическую массу топлива, а вместе с колчеданной $S_{\text{к}}$ и сульфидной $S_{\text{с}}$ серой — горючую массу. Сера в виде сульфидов $S_{\text{с}}$ входит в негорючую зольную массу. В инженерных расчетах, учитывая небольшое содержание $S_{\text{с}}$ в топливе, ее можно принимать как горючую.

Состав топлива выражается содержанием в нем отдельных химических элементов и веществ в процентах. В справочных таблицах состав топлива приводится по

ЛЕТУЧИЕ ВЕЩЕСТВА				ТВЕРДЫЙ КОКС			
ВОДЯНЫЕ ПАРЫ		ГОРЮЧИЕ ЛЕТУЧИЕ ВЕЩЕСТВА л ²		ГОРЮЧАЯ ЧАСТЬ КОКСА		НЕГОРЮЧАЯ ЧАСТЬ КОКСА	
ВЛАГА W	КИСЛОРОД И АЗОТ Q + N	ВОДОРОД H	УГЛЕРОД C	СЕРА S _к S _с	ЗОЛА A		
		СВОБОДНЫЙ СВЯЗАННЫЙ					
ОРГАНИЧЕСКАЯ МАССА							
ГОРЮЧАЯ МАССА							
СУХОЕ ТОПЛИВО							
РАБОЧЕЕ ТОПЛИВО							

Рис. 6.1. Химический состав топлива

отношению к горючей, сухой, рабочей массе и обозначается соответственно верхними индексами г, с, р, например C^g , C^c , C^p . Символы А, W, S означают соответственно содержание в топливе золы, влаги и серы. Следовательно, при содержании элементов веществ топлива, относящихся к его рабочей массе, состав записывается: $C^p + H^p + O^p + N^p + S^p + A^p + W^p = 100\%$, при их принадлежности к горючей массе состав можно записать: $C^g + H^g + O^g + N^g + S^g = 100\%$.

Состав топлива по отношению к сухой массе записывают $C^c + H^c + O^c + N^c + S^c + A^c = 100\%$.

Чаще в специальной литературе состав топлива приводится по отношению к рабочей массе. В практике приходится вести пересчет одного состава на другой. В табл. 6.2 даны формулы для такого пересчета. Верхние индексы «р» и «с» относятся соответственно к рабочей и сухой массе топлива.

Состав газообразного топлива выражается содержанием в нем отдельных газов в процентах. Горючая

ТАБЛИЦА 6.2. ФОРМУЛЫ ДЛЯ ПЕРЕСЧЕТА
ЭЛЕМЕНТАРНОГО СОСТАВА ТОПЛИВА

Заданная по справочнику масса топ- лива	Масса топлива, на которую производят пересчет			
	органическая	горючая	сухая	рабочая
Органичес- кая	—	$\frac{100 - S^r}{100}$	$\frac{100 - (S^c - A^c)}{100}$	$\frac{100 - (S^p + A^p + W^p)}{100}$
Горючая	$\frac{100}{100 - S^r}$	—	$\frac{100 - A^c}{100}$	$\frac{100 - (A^p + W^p)}{100}$
Сухая	$\frac{100}{100 - (S^c - A^c)}$	$\frac{100}{100 - A^c}$	—	$\frac{100 - W^p}{100}$
Рабочая	$\frac{100}{100 - (S^p + A^p + W^p)} \rightarrow$ $\rightarrow \frac{100}{100 - (S^p + A^p + W^p)}$	$\frac{100}{100 - (A^p + W^p)}$	$\frac{100}{100 - W^p}$	—

часть представлена газами CO , H_2 , CH_4 , H_2S , C_2H_6 и др., негорючая часть — CO_2 , N_2 , O_2 . В газообразном топливе содержится и незначительное количество влаги.

Главнейшие свойства топлива: теплота сгорания, температура воспламенения, температура плавления золы, механическая прочность (последние три — только для твердого топлива), склонность к самовозгоранию.

Жидкое топливо, кроме того, характеризуется вязкостью и температурой вспышки.

Теплота сгорания представляет собой количество тепловой энергии, выделяющейся при полном сгорании единицы массы твердого, жидкого, газообразного топлива. Теплоту сгорания обозначают буквой Q с верхним индексом, соответствующим массе топлива (Q^0 , Q^r , Q^c , Q^p), и с нижним индексом для высшей (Q^{p_v}) или низшей (Q^{p_n}). Высшая теплота сгорания включает теплоту конденсации водяных паров, образующихся при горении топлива, а низшая предусматривает сохранение водяных паров в продуктах горения в газообразном состоянии.

Для расчетов значение имеет низшая теплота сгорания рабочего топлива $Q^p_{н\text{,}}$ которая и приводится в справочниках.

Температура воспламенения — величина, при достижении которой топливо воспламеняется без участия очага горения. Температура воспламенения повышается по мере снижения в нем содержания летучих горючих веществ.

Температура плавления золы — одно из основных свойств твердого топлива, ибо определяет принципы его сжигания. Различают четыре группы зол с различной температурой плавления: легкоплавкую, до 1433 К; среднеплавкую, 1433—1623 К; тугоплавкую, 1623—1773 К; огнеупорную, свыше 1733 К. От легкоплавкой золы в топках (тепловых генераторах) получается омоноличенный конгломерат в виде пористого шлака, от среднеплавкой и тугоплавкой золы — минеральный остаток в виде смеси золы и шлака, от огнеупорной золы — остаток, состоящий из тонкодисперсного зольного порошка.

Механическая прочность определяет возможность топлив применять их в шахтных печах и других установках, где топливо не должно измельчаться под действием на него 8—10-метрового слоя шихты.

Склонность к самовозгоранию определяет его требование к транспортированию и хранению. При хранении некоторых видов твердого топлива за счет выветривания и за счет окисления находящихся примесей, например сульфидов железа кислородом воздуха, из топлива выделяется значительное количество теплоты. Этот процесс сопровождается разрыхлением и нагреванием угля, что приводит к самовозгоранию. Склонность к самовозгоранию присуща бурым и некоторым низшим сортам каменного угля.

Жидкое топливо характеризуется *температурой вспышки* — величиной, при которой жидкое топливо загорается в присутствии источника горения.

Виды твердого топлива и его свойства.

Древесина — дрова, отходы деревообрабатывающей промышленности. Элементарный состав — клетчатка $(C_6H_{10}O_5)_n$. Древесина содержит до 85 % летучих горючих веществ. В составе древесины почти нет серы, зольность до 2 %. Влажность колеблется от 30 до 60 %. Теплота сгорания древесины невелика и составляет 12600 кДж/кг. Являясь ценнейшим сырьем для химиче-

ской, целлюлозной и других отраслей промышленности, древесина в виде топлива используется крайне редко.

Торф — продукты разложения растительных остатков в условиях высокой влажности без доступа воздуха. Торф широко распространен в стране. Зольность торфа ввиду его засоренности примесями очень высока (15—20 %). В настоящее время использование торфа даже на небольших предприятиях резко ограничено в связи с необходимостью сохранения его запасов для использования в качестве удобрений для сельского хозяйства.

Горючие сланцы как топливо имеют большой недостаток — низкую теплоту сгорания (≈ 6000 — 8000 кДж/кг) в сочетании с многозольностью. При сжигании 1 т сланцев получается около 1 м³ золы, поэтому их использование в качестве промышленного топлива имеет тенденцию к сокращению.

Бурый уголь — самый молодой по времени образования уголь, имеющий небольшую прочность. Теплота сгорания его 9000—13000 кДж/кг. Основной недостаток бурых углей — наличие значительного (до 4 %) количества серы. В них содержится до 30—40 % горючих летучих веществ и до 30 % золы и шлаков.

Каменный уголь по сравнению с бурым имеет большую механическую прочность. Теплота его сгорания достигает 20000—24000 кДж/кг. Количество горючих летучих веществ составляет 6—8 %. Каменный уголь в отличие от бурого не возгорается при хранении. Каменные угли в качестве технологического топлива широко используются на предприятиях строительной индустрии.

Антрацит — самый ценный вид твердого топлива. Теплота его сгорания достигает 25000—26000 кДж/кг. Антрацит относится к короткопламенному топливу, ибо содержание горючих летучих веществ в нем незначительно, поэтому его применяют в шахтных печах, работающих по пересыпному способу.

Кокс — продукт высокотемпературной термической обработки каменных углей без доступа воздуха. Кокс высококалориен, прочен, термостоек, при хранении самовозгораем. Для получения кокса пригодны только коксующиеся каменные угли. В процессе коксования из угля выделяются горючие летучие вещества (образуется коксовый газ) и образуется коксовый остаток — кокс, состоящий из углерода и минеральной части топлива.

Кокс применяется только для доменного процесса в металлургии. В промышленности строительных материалов кокс используется только для получения минераловатных расплавов в вагранках.

Топливные брикеты получают термической обработкой торфяной и буроугольной крошки с одновременным прессованием. При обработке выделяющиеся смолистые вещества связывают крошку в брикет с высокой механической прочностью. В промышленности строительных материалов топливные брикеты практически не применяются.

Пылевидное топливо получают дроблением твердого кускового топлива с последующим тонким помолом и сушкой. Тонкость помола определяется наличием в исходном топливе горючих летучих веществ; чем их меньше, тем труднее сгорает топливо, поэтому его помол должен быть более тонким. В связи с открытием больших месторождений природного газа применение пылевидного топлива в промышленности строительных материалов постепенно уменьшается.

Жидкое топливо представлено нефтью, мазутом и соляровым маслом (см. табл. 6.1).

Нефть в качестве топлива в нашей стране не используется, а подвергается термической переработке с получением многих ценных продуктов для народного хозяйства.

Мазут — последняя фракция термической переработки нефти. Использование мазута в промышленности предпочтительнее, чем твердого топлива. Мазут высококалорисен ($Q_{pH} \approx 40000$ кДж/кг) и практически не содержит серы. Мазут при обычных температурах представляет собой застывшую жидкость и переходит в вязкотекучее состояние при $60-80^\circ\text{C}$. Транспортируют мазут в цистернах, для перекачки в мазутохранилище его разогревают, опуская в цистерны змеевики с паровым обогревом. Для разогрева мазута мазутохранилища оборудованы паровыми рубашками. Несмотря на некоторые сложности применение мазута для отопления промышленных установок экономически выгоднее, чем применение твердого топлива.

Газообразное топливо. В качестве топлива в промышленности строительных материалов широко применяется природный газ. Природный газ — наиболее дешевый вид топлива, не требующий специальных устройств кроме

газовых горелок. Наша страна обладает большими запасами природного газа. Природный газ — сухое беззольное высококалорийное ($Q_{pн} \simeq 32000\text{—}35000$ кДж/м³) топливо. При проектировании тепловых установок и их эксплуатации должна соблюдаться строжайшая экономия топлива.

Условное топливо. Для сравнения работы тепловых установок по расходуемому топливу вводится понятие *условное топливо*, низшая теплота сгорания которого $Q_{pн} = 29300$ кДж/кг. Отношение $Q_{pн}$ данного топлива к $Q_{pн}$ условного топлива обозначают буквой Э. Тогда для пересчета расхода любого натурального топлива G_n в условное G_y достаточно значение G_n умножить на величину Э.

6.2. Процесс горения топлива и принципы его расчета

Топливо горит в результате химических реакций окисления его горючей части кислородом воздуха. Горению предшествует термическое разложение. Продукты термического разложения лучше окисляются кислородом воздуха. Расчет количества кислорода, необходимого на горение топлива, ведут исходя из стехиометрических соотношений реакции окисления горючих элементов рабочей массы топлива: O^p ; S^p ; H^p . Например, окисление углерода можно записать: $C + O_2 = CO_2$, или $12 \text{ кг } C + 32 \text{ кг } O_2 = 44 \text{ кг } CO_2$. Ниже разъяснены приведенные коэффициенты в реакции горения. Для полного сгорания 1 кг углерода C необходимо μ_{O_2}/μ_C кг O_2 , где μ_{O_2} и μ_C — соответственно относительные молекулярные массы кислорода и углерода.

В 1 кг рабочего топлива содержится углерода $C^p/100$. Тогда для полного сгорания углерода, находящегося в 1 кг рабочего топлива, потребуется кислорода $(\mu_{O_2}/\mu_C) (C^p/100)$ кг. Аналогично можно получить из стехиометрических соотношений $S + O_2 = SO_2$ и $2H_2 + O_2 = 2H_2O$, что для сгорания содержащейся в 1 кг рабочего топлива серы $S^p/100$ и водорода $H^p/100$ соответственно требуется $(\mu_{O_2}/\mu_S) (S^p/100)$ и $(\mu_{O_2}/2\mu_{H_2}) (H^p/100)$ кг кислорода.

В составе рабочего топлива содержится $O^p/100$ кг кислорода, массу которого надо вычесть из кислорода,

потребного на горение. Следовательно, количество кислорода G_{O_2} необходимое для сжигания 1 кг рабочего топлива, можно записать

$$G_{O_2} = \left[\left(\frac{\mu_{O_2}}{\mu_C} \right) \left(\frac{C^p}{100} \right) + \left(\frac{\mu_{O_2}}{\mu_S} \right) \left(\frac{S^p}{100} \right) + \right. \\ \left. + \left(\frac{\mu_{O_2}}{2\mu_{H_2}} \right) \left(\frac{H^p}{100} \right) \right] - \frac{O^p}{100}.$$

В атмосферном воздухе содержится только 21 % кислорода, тогда объем воздуха V_T , теоретически необходимый для сжигания 1 кг рабочего топлива, составит

$$V_T = \left(\frac{G_{O_2}}{\rho_{O_2}} \right) \left(\frac{100}{21} \right) \quad \text{или} \\ V_T = \left[\left(\frac{100}{21} \right) \left(\frac{1}{100} \right) \left(\frac{\mu_{O_2}}{\rho_{O_2}} \right) \right] \left[\left(\frac{C^p}{\mu_C} \right) + \right. \\ \left. + \left(\frac{S^p}{\mu_S} \right) + \left(\frac{H^p}{2\mu_{H_2}} \right) - \left(\frac{O^p}{\mu_{O_2}} \right) \right]. \quad (6.1)$$

Аналогично по стехиометрическим зависимостям определяют и выход продуктов горения при сжигании 1 кг топлива. Однако в практических целях приведенные расчеты не производят, а пользуются эмпирическими формулами (табл. 6.3).

В реальных условиях при сжигании топлива на окисление горючей массы требуется несколько большее количество воздуха, ибо часть кислорода не успевает всту-

ТАБЛИЦА 6.3. ФОРМУЛЫ ДЛЯ ПРИБЛИЖЕННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ
РАСХОДА ВОЗДУХА И ВЫХОДА ПРОДУКТОВ
ГОРЕНИЯ

Вид топлива	Единица измерения	Теоретический расход воздуха на горение	Теоретический выход продуктов горения
Твердое	м ³ /кг	$1,01 (Q_H^p/1000) + 0,5$	$0,89 (Q_H^p/1000) + 1,65$
Жидкое	м ³ /кг	$0,85 (Q_H^p/1000) + 2$	$1,11 (Q_H^p/1000)$
Газообразное высококалорийное	м ³ /м ³	$1,09 (Q_H^p/1000) + 0,25$	$1,14 (Q_H^p/1000) + 0,25$

пить в химическую реакцию из-за несовершенства процесса смешивания топлива с воздухом. Необходимое увеличение воздуха определяют по отношению действительно расходного воздуха на горение 1 кг топлива V_d к теоретическому V_t . Это отношение называют коэффициентом избытка воздуха α

$$\alpha = V_d / V_t. \quad (6.2)$$

Значение α зависит от вида топлива и от конструкции топочного устройства. Наибольшая полнота смешивания достигается при работе с газообразным топливом, поэтому его можно сжечь с минимальным избытком воздуха ($\alpha = 1,1 - 1,15$). Жидкое топливо (мазут) при сжигании распыляют специальными форсунками для лучшего его смешивания с воздухом. Однако расход потребного воздуха для сжигания мазута выше и составляет $\alpha = 1,2 - 1,25$.

Сжигание твердого топлива требует значительного увеличения α , которое колеблется от 1,5 до 3,5. Поэтому в каждом конкретном случае для сжигания твердого топлива значение α выбирают по теплотехническим справочникам.

Тепловой баланс процесса горения. При сжигании топлива не вся теплота выделяется в виде полезной. Значительная доля теплоты теряется из-за несовершенства процессов горения и теплотехнического оборудования.

Рассмотрим процесс сжигания 1 кг топлива с Q_p в непрерывно работающей топке, куда подается на горение необходимое количество воздуха $V_d = V_t \alpha$. В подаваемом количестве воздуха V_d содержится количество теплоты Q_v . При горении образуется действительное количество продуктов горения $V_{дпр} = V_{тпр} \alpha$ с количеством теплоты $Q_{пр}$. Часть теплоты расходуется на потери в окружающую среду топкой $Q_{пот}$; часть уходит с зольным остатком, нагретым до определенной температуры Q_z ; часть теплоты не выделяется из-за физической Q_{ϕ} и химической Q_x неполноты сгорания. Тогда, согласно закону сохранения энергии, тепловой баланс на 1 кг сжигаемого топлива можно представить в следующем виде:

$$Q_p + Q_v = Q_{пр} + Q_{пот} + Q_z + Q_{\phi} + Q_x.$$

Следовательно, общее количество теплоты, введенное в топочное устройство $Q_{\Sigma} = Q_p + Q_v$, расходуется на на-

грев продуктов сгорания $Q_{\text{пс}}$ и на потери в топке $Q_{\text{пт}}$. Если $Q_{\text{пт}} = Q_{\text{пот}} + Q_{\text{з}} + Q_{\text{ф}} + Q_{\text{х}}$, то уравнение теплового баланса в самом общем виде можно записать

$$Q_{\text{п}} = Q_{\text{пс}} + Q_{\text{пт}}. \quad (6.3)$$

Отсюда полезно затраченное количество теплоты, которое может быть использовано для тепловой обработки, составляет $Q_{\text{пс}}$. Зная полное количество теплоты, введенное в топочное устройство $Q_{\text{п}}$, и полезно используемую теплоту, можно определить КПД этого устройства η

$$\eta = Q_{\text{пс}} / Q_{\text{п}}. \quad (6.4)$$

Температура горения топлива может быть калориметрическая, теоретическая и действительная.

Калориметрической температурой горения $T_{\text{к}}$ называют такую, до которой нагрелись бы продукты полного сгорания, если бы вся теплота топлива и теплота, подаваемая на горение воздуха, пошла на их нагревание.

Теоретическая температура горения $T_{\text{тр}}$ отличается от калориметрической расходом части теплоты на эндотермические реакции диссоциации CO_2 и H_2O . В интервале температур 1273—1773 К (1000—1500°C) степень диссоциации CO_2 и H_2O очень мала, и теоретическая температура практически не отличается от калориметрической. В таком случае для расчета калориметрической и теоретической температур горения уравнение теплового баланса (6.3) может иметь вид $Q_{\text{п}} = Q_{\text{пс}}$. Нанедем это уравнение для сжигания 1 кг топлива в развернутом виде

$$1Q_{\text{п}}^0 + 1c_{\text{г}} T_{\text{г}} + 1V_{\text{г}} \alpha c_{\text{в}} T_{\text{в}} = 1\alpha (V_{\text{сг}} c_{\text{сг}} + V_{\text{вп}} c_{\text{вп}}) T_{\text{тр}}, \quad (6.5)$$

где $Q_{\text{п}}^0$ — низшая удельная теплота сгорания рабочего топлива; $c_{\text{г}}$, $c_{\text{в}}$, $c_{\text{сг}}$, $c_{\text{вп}}$ — соответственно теплоемкость топлива, воздуха, сухого газа, водяных паров; $T_{\text{г}}$, $T_{\text{в}}$ — соответственно температуры топлива и воздуха, поступающих на горение; $T_{\text{тр}}$ — теоретическая температура горения топлива; $V_{\text{г}}$, $V_{\text{сг}}$, $V_{\text{вп}}$ — соответственно объемы теоретического воздуха на горение, сухих газов и водяных паров, содержащихся в теоретическом объеме продуктов сгорания; α — коэффициент избытка воздуха для данного вида топлива.

Действительная температура горения $T_{\text{д}}$ отличается от теоретической потерями теплоты в топке $Q_{\text{пт}}$ [см. уравнение (6.3)].

Отношение действительной температуры горения к

теоретической называют *пирометрическим коэффициентом* $\eta_{\text{п}}$

$$T_{\text{д}}/T_{\text{тп}} = \eta_{\text{п}}. \quad (6.6)$$

При использовании низкокалорийных топлив для повышения $T_{\text{д}}$ применяют подогрев подаваемого на горение воздуха, обогащая его кислородом и тем самым снижая расход на горение, а также на подогрев топлива.

Принципы использования топлива. В технологии строительных материалов и изделий топливо может сжигаться в выносных топках, и продукты горения могут передаваться на сушку или другие виды тепловой обработки изделий. Топливо можно сжигать непосредственно в установке, где находятся изделия или материал (например, в обжиговых и плавильных печах). Можно часть топлива запрессовывать и сжигать непосредственно внутри обрабатываемых изделий (например, в кирпич при формовке иногда запрессовывают опилки и порошок каменного угля). Однако при любом способе сжигания необходимо подвести к каждой частице топлива воздух для окисления, а он подводится к запрессованному топливу значительно труднее, ибо осуществляется за счет его диффузии внутрь материала.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

1. Перечислите виды топлива. Как они используются для тепловой обработки строительных изделий?

2. Какие вы знаете агрегатные состояния топлива и как они влияют на процесс сжигания?

3. В чем различие применяемых условных масс топлива?

4. Назовите главнейшие свойства всех видов топлива.

5. Что такое склонность к самовозгоранию топлива? На какие виды топлива она распространяется?

6. В чем заключается принцип определения расхода воздуха на горение?

7. Что такое коэффициент избытка воздуха? Какую роль он играет в организации процесса горения?

8. В чем состоит отличие действительной от теоретической и калориметрической температур горения топлива?

9. Для чего вводится понятие об условном топливе? Дайте его определение.

10. Какие способы сжигания топлива применяются в промышленности строительных материалов?

РАЗДЕЛ 4. ТЕПЛОГЕНЕРИРУЮЩИЕ УСТАНОВКИ

ГЛАВА 7. ТЕПЛОВЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ В ПРОИЗВОДСТВЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Тепловым генератором называют топочное или теплообменное устройство, предназначенное для получения теплоносителя.

В производстве строительных материалов и изделий в качестве газообразных теплоносителей в настоящее время используются нагретый воздух или разбавленные воздухом продукты горения, полученные от сжигания технологического топлива.

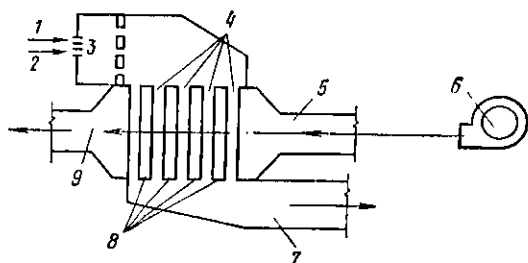
При использовании в качестве теплоносителя дымовых газов или их смесей с воздухом, в качестве топлива преимущественно применяется природный газ. В этом случае теплоноситель не содержит (или почти не содержит) сернистых соединений, золы и токсичной окиси углерода. Для получения нагретого воздуха можно использовать генераторы, работающие на любом топливе, в том числе нагреватели, работающие на водяном паре.

7.1. Классификация тепловых генераторов

Применяемые в промышленности строительных материалов тепловые генераторы в зависимости от получаемого ими источника теплоты классифицируют на использующие кусковое топливо, угольную пыль, жидкое топливо, газообразное топливо, электроэнергию, водяной пар.

Принципиальная схема теплового генератора для подготовки теплоносителя — нагретого воздуха представлена на рис. 7.1. Топливо 1 и воздух 2 через форсунку 3 подаются в топку 8, где происходит процесс горения. В топке сжигается твердое или жидкое топливо (конструктивные особенности таких топок показаны далее). Продукты сгорания проходят по трубам 4, в которых их нагревают. Отработанные продукты сгорания через патрубок 7 поступают в котел-утилизатор, где используется остаточная тепловая энергия. Холодный воздух вентилятором 6 нагнетается в патрубок 5, проходит через межтрубное пространство 8, отбирает теплоту от труб и через патрубок 9 поступает для исполь-

Рис. 7.1. Схема теплового генератора для получения теплоносителя — нагретого воздуха



зования в тепловые установки, например в сушилку. Расчет такого генератора сводится к определению необходимой поверхности нагрева. С одной стороны, продукты сгорания топлива нагревают трубы, с другой — с поверхности каждой трубы движущийся воздух отбирает эту теплоту. Исходным для расчета являются количество воздуха V_0 и степень его нагрева ΔT . Тогда можно определить количество теплоты, которую необходимо передать воздуху,

$$Q_T = V_0 c_V (T_K - T_H), \quad (7.1)$$

где V_0 — объем нагреваемого воздуха; c_V — теплоемкость воздуха; T_H и T_K — начальная и конечная температуры воздуха.

Следовательно, генератор должен обеспечить заданное количество теплоты Q_T , которое должно быть передано воздуху

$$Q_T = kA(\bar{T}_{nc} - \bar{T}_B), \quad (7.2)$$

где k — коэффициент теплопередачи через поверхность нагревания генератора; A — необходимая поверхность нагревания (суммарная поверхность омываемых воздухом труб); $\bar{T}_{nc}$, $\bar{T}_B$ — средние температуры на входе и выходе соответственно для продуктов сгорания и воздуха. Например, $\bar{T}_B = (T_K + T_H)/2$.

Коэффициент теплопередачи k определяется по формуле

$$k = 1/(1/\alpha_1 + \delta/\lambda + 1/\alpha_2), \quad (7.3)$$

где α_1 — коэффициент теплопередачи от продуктов сгорания к поверхности труб; α_2 — то же от поверхности нагрева к воздуху; δ — толщина стенок труб; λ — теплопроводность стенки трубы.

Таким образом, зная Q_T , а также определив k и ΔT , находят поверхность нагрева A , а затем и количество труб.

Аэродинамический расчет потока продуктов сгорания и холодного воздуха выполняется по формулам, приведенным в пп. 5.3.1 и 5.3.2.

7.2. Принципы использования тепловых генераторов для сушильных установок

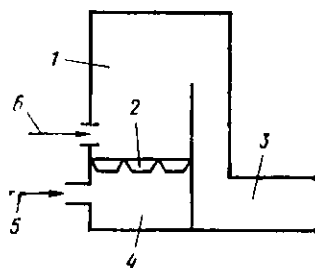
Тепловые генераторы используют для снабжения теплоносителем сушильных установок. В последнее время тепловые генераторы стали использовать для индивидуального теплоснабжения ямных пропарочных камер. Главными элементами в конструкции теплового генератора являются топочное устройство — пространство, в котором сжигается топливо, и камера теплообменника, в котором теплота продуктов сгорания передается нагреваемому воздуху. Тепловые генераторы, использующие в качестве рабочего тела водяной пар, топочных устройств не имеют.

Подготовка теплоносителя — нагретого воздуха. Нагретый воздух в тепловом генераторе, использующем в качестве рабочего тела топливо, готовят по схеме, показанной на рис. 7.1. В качестве топочных устройств для сжигания топлива применяют слоевые и камерные топки.

Слоевые топки используют для сжигания твердого кускового топлива. Схема слоевой топки в общем виде показана на рис. 7.2. Она состоит из ограждающих конструкций, образующих топочное пространство 1, колосниковой решетки 2, на которую загружается сжигаемое топливо через отверстие 6, канала 3 для отвода продуктов сгорания, подколосникового пространства 4 и канала 5 для подачи воздуха на горение.

Процесс горения топлива можно условно разделить на три стадии. Первая стадия — в работающей топке после загрузки очередной порции происходят подсушка и нагрев топлива. Вторая стадия — термическое разложение топлива на летучие вещества и твердый коксовый остаток — кокс. Третья стадия — процесс горения летучих в объеме топочного пространства и коксового остатка на колосниковой решетке. Объем топочного пространства зависит от количества выделяющихся из топлива летучих. Выбор указанного объема ведут по нормативным данным, носящим название «объемное напряжение

Рис. 7.2. Схема слоевой топки



топочного пространства», которое для современных топок составляет 1000—1700 кДж на 1 м³ в час.

Колосниковая решетка выбирается по количеству коксового остатка из расчета плоскостного напряжения топки по сжигаемому топливу. Важнейшим требованием, предъявляемым к колосниковым решеткам, является равномерное распределение топлива и подвод воздуха к нему. Конструкция колосников делается с продольными отверстиями. Сумма площадей всех отверстий называется живым сечением, которое колеблется для различных сортов топлива от 10 до 30 %.

Основной недостаток такой топки — значительные колебания температуры продуктов сгорания и неполная степень горения топлива. После загрузки в топку свежей порции топлива температура в ней резко (на 470—570 К) падает. Образуется избыток воздуха, ибо не все топливо горит. Далее температура начинает повышаться, новые массы топлива вовлекаются в процесс горения. Подаваемого воздуха начинает не хватать. Появляется неполное сгорание некоторой части топлива до СО. С загрузкой в топку новой партии топлива этот процесс усугубляется. Для ликвидации указанного недостатка в конструкции современных слоевых топок закладывается идея совмещения всех трех стадий горения на разных участках колосниковой решетки.

На рис. 7.3 представлены принципиальные схемы современных слоевых топочных устройств. Топливо в такие топки подается непрерывно. Передвигаясь по колосниковым решеткам, топливо постепенно проходит I—III стадию сжигания.

На рис. 7.3, а показана топка, в которой топливо движется по колосникам под действием собственного веса. Решетка 3 состоит из отдельных колосников, располагаю-

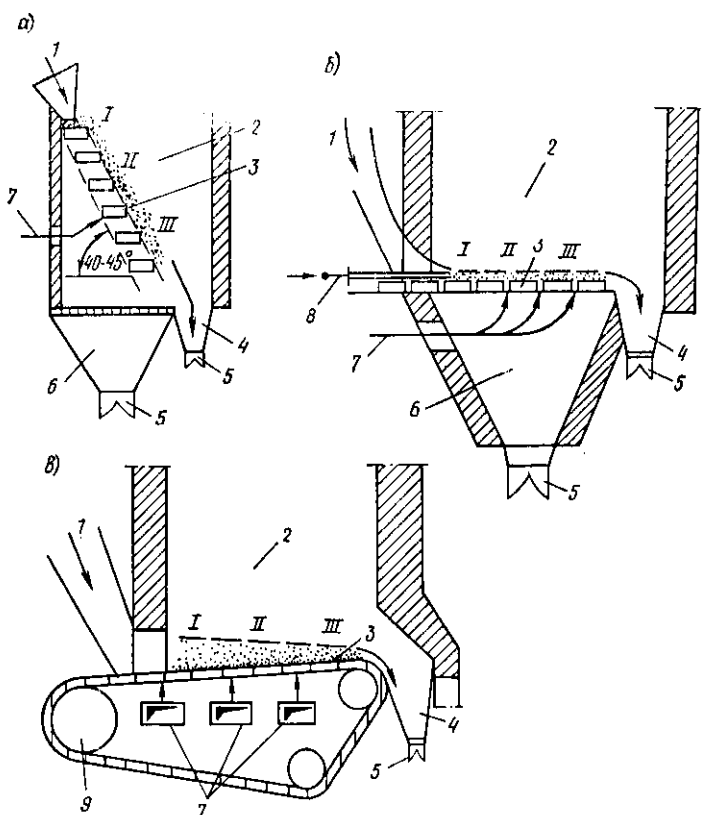


Рис. 7.3. Схемы слоевых топков

а — с наклонной колосниковой решеткой; *б* — с шнурующей планкой; *в* — с движущейся колосниковой решеткой; 1 — подача топлива; 2 — топочное пространство; 3 — колосниковая решетка; 4 — бункер для золы и шлака; 5 — челюстные затворы бункеров; 6 — бункер для просыпи; 7 — отверстия для подачи воздуха на горение; 8 — шнурующая планка; 9 — привод движущейся колосниковой решетки; I—III — стадии сжигания топлива

щихся под углом $40-45^\circ$, что соответствует углу естественного откоса сжигаемого топлива. По колосниковой решетке топливо постепенно передвигается. Сначала подсушивается и подогревается, далее из него выделяются летучие, после чего сгорает коксовый остаток. В бункер 4 поступает зола и шлак, а в бункер 6 — проваленные частицы топлива, которые возвращаются на горение. Выгрузка из бункеров 4 и 6 производится через разгрузочное устройство 5.

На рис. 7.3, б показана топка также с неподвижной колосниковой решеткой и передвигающимся слоем топлива. Передвижение топлива осуществляется периодически шурующей планкой 8. Она выполнена в виде трехгранной призмы из литого чугуна. При движении планки вперед топливо переталкивается к зольному бункеру 4, а при движении планки назад рыхлится горящий слой топлива.

На рис. 7.3, в показана механическая топка с непрерывно движущейся колосниковой решеткой. Топливо из бункера захватывается медленно движущимся полотном колосниковой решетки 3, которая приводится в движение шестерней привода 9 от электродвигателя. Чешуйчатые колосники позволяют вести процесс без провала топлива. Снизу из отверстий 7 подается воздух на горение. Топливо, передвигаясь вместе с колосниковым полотном, сначала подсушивается и нагревается, далее из него выделяются летучие, на III стадии сгорает коксовый остаток.

Камерные топки. Кроме слоевых топок в генераторах, предназначенных для подготовки теплоносителя — нагретого воздуха, могут использоваться и камерные топки. Камерные топки подразделяют на циклонные (вихревые) и факельные. В факельных можно сжигать твердое (в размолотом состоянии), жидкое и газообразное топливо. Однако газообразное топливо для подготовки нагретого воздуха в камерах не используется (оно рассматривается далее).

На рис. 7.4, а показана схема камерной топки для циклонного (вихревого) сжигания топлива. В топочное пространство 4 тангенциально подается пневмотранспортом воздух 1, в котором содержится топливо 2 (размер частиц ~ 200 мкм). Попадая в разогретую до температуры сжигания топку, частицы топлива под действием центробежных сил циркулируют по цилиндрическому сечению топочного пространства (схема циркуляции показана винтовой линией) и сгорают. В отверстие 3 также тангенциально дополнительно подается воздух на горение. Продукты сгорания подаются через полость 5. Такая топка (небольшая по габаритам) может использоваться не только в тепловых генераторах, но и в печах.

В камерной топке для факельного сжигания (рис. 7.4, б) твердое топливо подвергается помолу (до размера частиц 100—200 мкм). Топливная пыль вместе

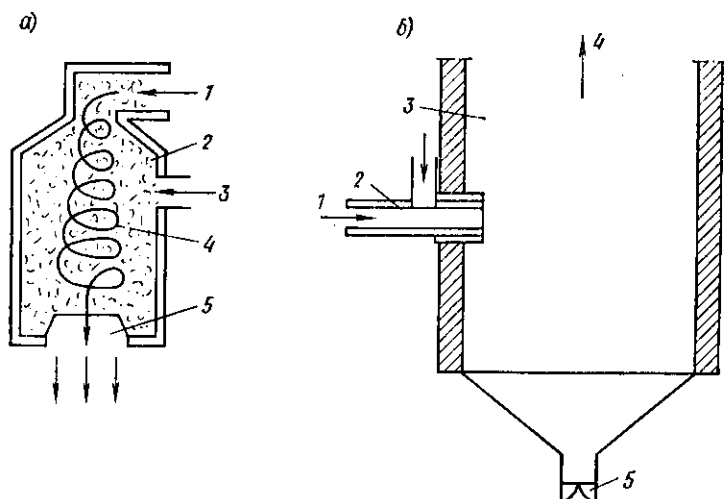


Рис. 7.4. Схемы камерных топок
а — циклонная; б — факельная

с воздухом (аэросмесь 1) подается в пылеугольную горелку 2, туда же поступает и вторичный воздух. Сгорание происходит в камере 3. Зола и шлак выгружаются через челюстной затвор 5, а продукты горения выдаются по направлению стрелки 4. Аналогично сжигается и жидкое топливо, однако вместо пылеугольной горелки используется форсунка для распыления предварительно разогретого мазута. Форсунки выполняют с механическим, паровым или воздушным распылением.

На рис. 7.5 даны принципиальные схемы работы горелок для сжигания пылеугольного топлива. На рис. 7.5, а показана схема горелки с подачей аэросмеси по центральной трубе, а вторичного воздуха по периферийному каналу; на рис. 7.5, б, наоборот, вторичный воздух в горелку подается по центральной трубе, а по периферийному каналу аэросмесь. И аэросмесь и вторичный воздух чаще подают закрученными струями. В этом случае продукты сгорания рециркулируют к основанию факела (показано стрелками) и способствуют устойчивому горению аэросмеси.

На рис. 7.6, а показана схема механической форсунки с продавливанием мазута под давлением 1—2 МПа через отверстие (сопло) малого диаметра. На рис. 7.6, б

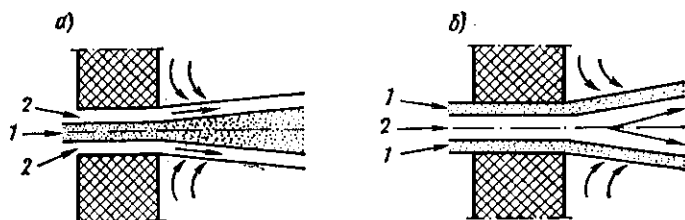


Рис. 7.5. Схема работы горелок для сжигания пылеугольного топлива

1 — подача аэросмеси твердого топлива; 2 — подача вторичного воздуха

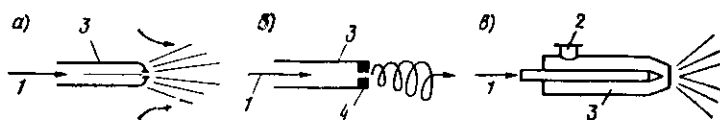


Рис. 7.6. Схемы работы мазутных форсунок (а—в)

1 — подача мазута; 2 — подача пара или воздуха на распыление; 3 — корпус форсунки; 4 — насадок (завихритель)

дана такая же форсунка, но оснащенная механическим завихрителем, создающим вращательное движение частиц топлива. На рис. 7.6, в представлена форсунка, в которой распыление достигается паром под давлением 0,4—1,5 МПа или воздухом под давлением 0,002—0,008 МПа (низкого давления) или 0,2—1 МПа (высокого давления). Мазут подается в форсунки под давлением 0,3—0,4 МПа.

В производстве строительных изделий и конструкций в настоящее время в качестве топлива для приготовления теплоносителя — нагретого воздуха применяется только твердое кусковое топливо. Поэтому тепловые генераторы оснащаются слоевыми топками. Пылеугольное топливо из-за необходимости его подсушки и дорогостоящего помола применяется крайне редко. Жидкое топливо — ценное сырье химической промышленности — заводами строительной индустрии не используется.

Кроме топлива для нагрева воздуха в тепловых генераторах используют водяной пар с избыточным давлением 0,1—0,5 МПа. Схема теплового генератора с обогревом воздуха водяным паром показана на рис. 7.7. Генератор представляет собой теплообменник, в котором по системе орбренных труб 4 проходит пар. В меж-

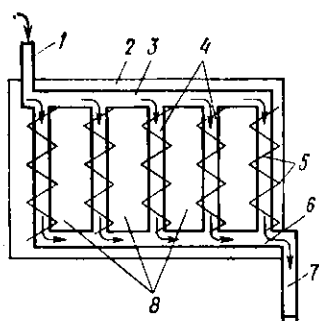


Рис. 7.7. Схема генератора с паровым обогревом

1 — подача пара; 2 — кожух; 3 — коллектор подачи пара в трубы; 4 — трубы для прохождения пара; 5 — оребрение труб; 6 — коллектор сбора конденсата; 7 — штуцер для подсоединения к конденсатопроводу; 8 — межтрубное пространство для движения воздуха

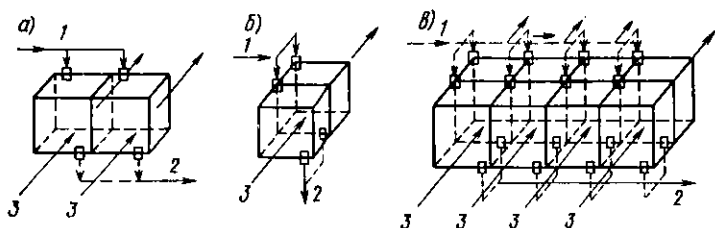


Рис. 7.8. Схема установки генераторов с паровым обогревом

а — параллельная; б — последовательная; в — комбинированная; 1 — подача пара; 2 — отбор конденсата; 3 — подача нагреваемого воздуха

трубное пространство 8 пропускают воздух, который отбирает теплоту парообразования и одновременно нагревается. Нагретый воздух направляется в тепловую установку для использования, а отдавший теплоту пар конденсируется и удаляется в конденсационную систему.

Тепловые генераторы с паровым обогревом устанавливаются параллельно (рис. 7.8, а), последовательно (рис. 7.8, б), комбинированно (рис. 7.8, в). При последовательном включении воздух нагревается до более высокой температуры, но его количество невелико.

Используя тепловые генераторы с паровым обогревом, можно получить нагретый воздух с максимальной температурой $T=350$ К, а генераторы с использованием топлива — до $T \approx 670$ К.

Подготовка теплоносителя — продуктов сгорания топлива. С экономической точки зрения в качестве теплоносителя более предпочтительны продукты сгорания природного газа. Для их приготовления не требуется теплообменник, следовательно, их получение требует меньших затрат. Схема теплового генератора для получения

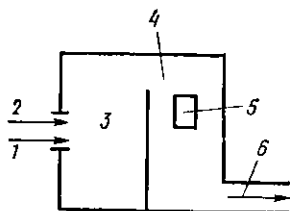


Рис. 7.9. Схема теплового генератора для подготовки теплоносителя — продуктов сгорания топлива

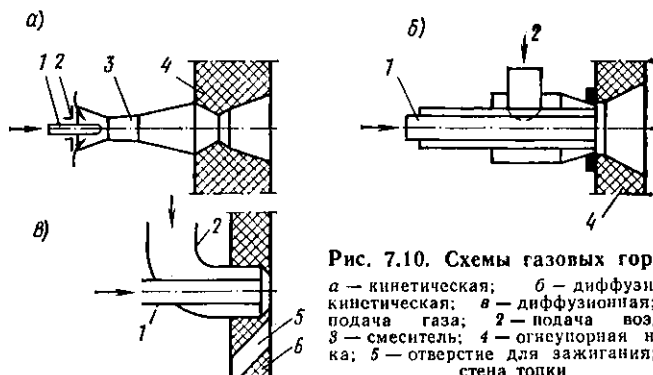


Рис. 7.10. Схемы газовых горелок
a — кинетическая; *б* — диффузионно-кинетическая; *в* — диффузионная; *1* — подача газа; *2* — подача воздуха; *3* — смеситель; *4* — огнеупорная насадка; *5* — отверстие для зажигания; *6* — стена топki

теплоносителя — продуктов сгорания топлива показана на рис. 7.9. В камере сгорания 3 с помощью газовой горелки сжигается газообразное топливо; его подача обозначена поз. 1. Сюда же подается воздух 2 на горение. Продукты сгорания поступают в смесительную камеру 4, где через окно 5 разбавляются до необходимой температуры и в виде теплоносителя — продуктов сгорания топлива — через канал 6 подаются к месту использования. Такой теплоноситель применяют в сушильных установках в качестве сушильного агента, а также для индивидуального теплоснабжения пропарочных камер, предназначенных для пропарки изделий из легкого бетона. Генератор объемом 0,2—0,3 м³ включается при необходимости разогрева камеры (см. п. 13.2.1) и выключается после разогрева.

Сжигание природного газа в тепловом генераторе производится с помощью горелок. Горелки для сжигания природного газа делят на кинетические (газ и воздух смешиваются до выхода их из горелки), диффузионно-кинетические (частичное смешивание происходит до

выхода из горелки) и диффузионные (газ и воздух смешиваются при выходе из горелки).

В кинетической горелке (рис. 7.10, а) газ, вытекающий под давлением 0,1—0,3 МПа из сопла 1, эжектирует (подсасывает) воздух через отверстия 2. В смесителе 3 газ полностью смешивается с воздухом. Смесь, попадая в нагретую до температуры горения огнеупорную насадку 4, сгорает. Горение протекает почти мгновенно и завершается внутри огнеупорной насадки.

В диффузионно-кинетической горелке (рис. 7.10, б) газ подается по трубопроводу 1, по трубопроводу 2 принудительно подается воздух. Газ и воздух частично смешиваются и начинают гореть в огнеупорной насадке 4. Окончательное смешивание и завершение процесса горения происходит в топочном пространстве.

Диффузионная горелка (рис. 7.10, в) по конструкции не отличается от диффузионно-кинетической, однако отсутствует даже частичного предварительного смешивания газа с первичным воздухом, который подается в недостаточном количестве для горения, приводит к образованию факела горения. Вторичный воздух подается в топочное пространство. Изменяя скорость подачи газа и первичного воздуха, можно регулировать длину факела горения.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

1. Расскажите о тепловых генераторах, применяемых в промышленности строительных материалов.

2. Опишите типы применяемых слоевых и камерных топок.

3. Перечислите стадии горения твердого топлива. Как избежать колебаний температур при сгорании твердого топлива?

4. Какие существуют типы горелок и форсунок?

5. Опишите работу паровых генераторов. Как они используются в указанной промышленности?

РАЗДЕЛ 5. ПОНЯТИЕ ОБ УСТАНОВКАХ, ПРЕОБРАЗУЮЩИХ ТЕПЛОВУЮ ЭНЕРГИЮ В МЕХАНИЧЕСКУЮ

Современная энергетика основана главным образом на преобразовании тепловой энергии в механическую работу, за счет которой генераторами вырабатывается электрическая энергия.

Машиной, преобразующей тепловую энергию в механическую работу, является тепловой двигатель. Все тепловые двигатели делят на две группы. К первой относятся двигатели внутреннего сгорания, а ко второй — двигатели внешнего сгорания.

ГЛАВА 8. ТЕПЛОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ И ТЕПЛОВЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ

8.1. Понятие о двигателях внутреннего сгорания

Для снижения потерь энергии горючее сжигают непосредственно в рабочем цилиндре двигателя, отсюда и название — двигатель внутреннего сгорания. Двигатели внутреннего сгорания состоят из устройства, в котором готовится горючая смесь, — карбюратора и собственно двигателя. Схема работы простейшего карбюратора показана на рис. 8.1, а.

В поплавковую камеру карбюратора 2 через штуцер 5 подается топливо. Количество регулируется поплавком 3 с насаженным на него игольчатым клапаном 4. Топливо в момент открытия клапана для впуска смеси в цилиндр 12 за счет разрежения, создаваемого при движении поршня 13 вниз, засасывается из поплавковой камеры по трубке 1 в трубу 6, снабженную диффузором 7. В эту же трубу через отверстие 18 засасывается воздух. Топливо испаряется, и его пары смешиваются в диффузоре с воздухом. Разрежение для забора воздуха регулируется дроссельной заслонкой 8.

Подготовленная таким образом горючая смесь подается в двигатель (рис. 8.1, б). Двигатель представляет собой цилиндр 12, снабженный впускным клапаном 9 для подачи рабочей смеси из карбюратора и выпускным клапаном 11 для выброса продуктов сгорания. В цилиндре 12 совершает возвратно-поступательное движение поршень 13, соединенный кривошипно-шатунным механизмом 14 с рабочим валом 17. Вал получает при возвратно-поступательном движении поршня 13 вращательное движение, которое может быть использовано для привода машин и механизмов. На рабочий вал 17 насажен маховик 16 для более плавной работы двигателя.

За счет энергии вращения, накопленной маховиком,

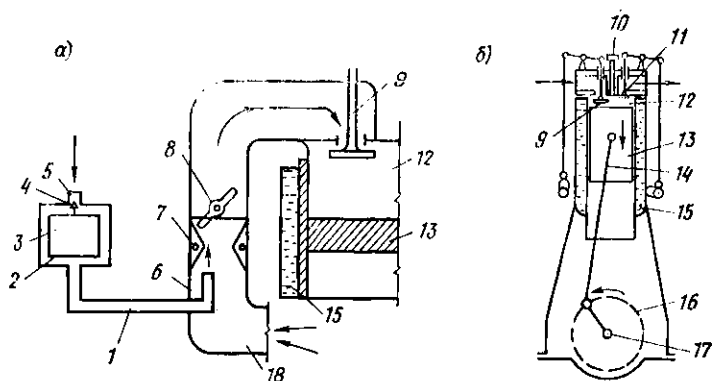


Рис. 8.1. Схема простейшего карбюратора (а) и рабочего органа двигателя внутреннего сгорания (б)

поршень начинает движение вниз — первый ход. В цилиндр через открывшийся клапан 9 поступает горючая смесь. Поршень доходит до нижней крайней точки и начинает движение вверх — второй ход, при этом клапан 8 закрывается. Двигаясь вверх, поршень (при закрытых клапанах) сжимает горючую смесь. Чтобы смесь не достигла за второй ход температуры воспламенения топлива, цилиндр охлаждается водой, циркулирующей через водяную рубашку 15. Когда поршень достигнет своей верхней точки, горючая смесь воспламеняется искрой от запальной свечи 10, происходит сгорание топлива.

Давление и температура в пространстве, ограниченном поршнем, резко возрастают, и поршень начинает движение вниз, совершает третий, но уже рабочий ход. В результате расширения продуктов сгорания это движение поршня вниз через коленчатый вал передается на вал двигателя, снабженный маховиком 16. К концу третьего хода поршня открывается выпускной клапан 11, и продукты сгорания начинают выбрасываться из цилиндра. Поршень по инерции совершает четвертый ход вверх и выталкивает продукты сгорания. Таким образом, четвертый, первый и второй ходы совершаются за счет инерции маховика, накопленной за третий рабочий ход. Далее процесс повторяется в описанной последовательности.

Для того чтобы двигатель не снижал свою мощность,

передаваемую на рабочий вал, его снабжают четырьмя цилиндрами, причем они работают так, чтобы рабочий ход каждого совпадал с тремя холостыми ходами остальных. Следовательно, этот вал за каждый ход, который называют «такт», получает одинаковую механическую энергию. По такой схеме работают простейшие четырехтактные двигатели внутреннего сгорания.

8.2. Понятие о двигателях внешнего сгорания

В отличие от двигателей внутреннего сгорания широко применяются двигатели, в которых используется теплоноситель, полученный в другом агрегате, отсюда и название двигатель внешнего сгорания. Для выработки электрической энергии на электростанциях чаще всего применяются паровые турбины. Паровая турбина использует энергию пара, который образуется за счет теплоты, полученной при сжигании топлива в выносных топках (вне турбины). Водяной пар, имеющий высокое давление и температуру, обладает значительной потенциальной энергией. Если пару, помещенному в емкость 1, дать возможность вытекать из сопла 2 (рис. 8.2) при условии, что в емкости пар находится при p и T больших, чем в среде, куда происходит его истечение, то на выходе из сопел пар развивает большую скорость. Потенциальная энергия пара переходит в кинетическую, которую можно использовать, направив вытекающий из сопла пар на криволинейный (изогнутый) профиль лопаток, которыми оснащают диск турбины (рис. 8.3). Пар, выбрасываемый через сопло 1 на лопатки 2, приводит во вращение диск 3, жестко насаженный на вал 4. Если на этот же вал насадить электрогенератор, то механическая энергия турбины превращается в электрическую.

Газовая турбина в отличие от паровой использует продукты сжигания топлива. Газовая турбина или, как ее называют, газотурбинная установка (рис. 8.4) состоит из турбины 7, компрессора 8 и электрогенератора 9, сидящих на одном валу. Агрегат приводится в действие пусковым электродвигателем 6.

Работа агрегата заключается в следующем. Жидкое топливо насосом 1 нагнетается в форсунку 2, куда подается от компрессора 8 под давлением воздух на горение через трубопровод 10. Топливо сгорает в камере 3, и продукты горения, разбавленные воздухом до $T=$

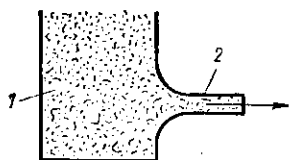


Рис. 8.2. Схема емкости пара с насадком в виде сопла

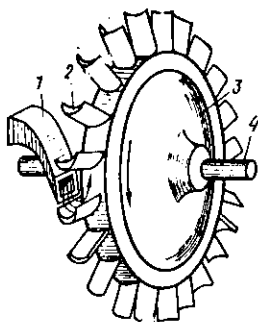


Рис. 8.3. Схема паровой турбины

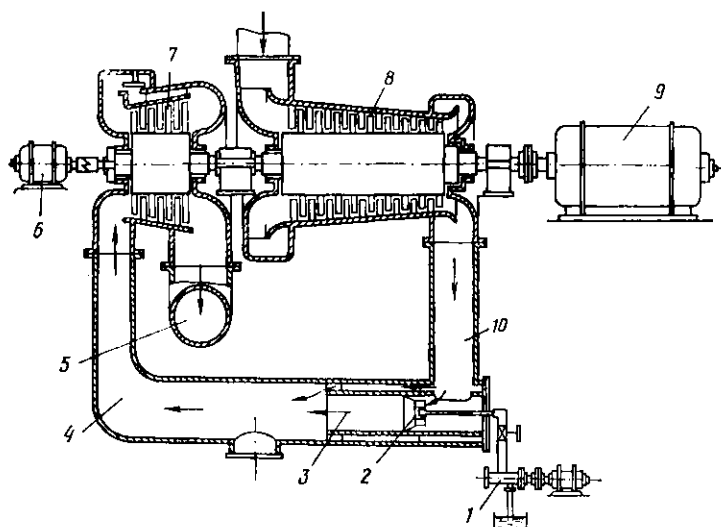


Рис. 8.4. Схема газотурбинной установки

$\approx 873\text{--}1073\text{ K}$, по трубопроводу 4 подаются к соплам турбины 7. Сопла направляют продукты горения на изогнутые лопатки турбины. Турбина получает вращательное движение. Отработанные продукты горения выбрасываются на утилизацию через трубопровод 5. Часть механической энергии, выработанной турбиной, тратится на сжатие воздуха в компрессоре 8, остальная используется для вращения электрического генератора 9.

Газотурбинный агрегат перед паровым имеет преимущества: не требует парового котла для выработки пара, более компактен и занимает меньшую площадь. Если учесть, что газотурбинный агрегат может работать и на газовом топливе, то он перспективен и в качестве двигателя на тепловых электрических станциях. Использование газотурбинных агрегатов на дорогом и дефицитном жидком топливе нерационально.

8.3. Понятие о тепловых электрических станциях

Агрегаты, преобразующие тепловую энергию в механическую, а механическую в электрическую, называют тепловыми электрическими станциями. Схема простейшей тепловой электрической станции показана на рис. 8.5.

В топке 1 парового котла 2 сжигается топливо. Образовавшиеся продукты горения омывают трубки парового котла, в которых находится вода, поступающая из питательного барабана. Образующийся пар передается в перегреватель 3. Продукты горения из топки котла переходят в перегреватель и отдают часть оставшейся энергии на перегрев пара, движущегося по трубкам перегревателя. Отработанные продукты горения поступают в котлы-утилизаторы и далее выбрасываются в атмосферу.

Перегретый пар по паропроводу 4 направляется в паровую турбину 5 и через сопла, попадая на изогнутые лопатки (см. рис. 8.3), совершает работу — вращает турбину. На валу 6 вместе с турбиной находится электрический генератор 7, превращающий механическую энергию вращения в электрическую. Отработанный пар покидает турбину и через патрубок 8 поступает в конденсатор 9. В конденсаторе по трубкам движется холодная вода, подаваемая насосом 10 из источника питания 11. Эта вода нагревается и может быть использована для собственных нужд станции.

Из пара в конденсаторе за счет отдачи теплоты холодной воде получается конденсат, который насосом 12 перекачивается в бак 13 для питания водной системы и оттуда насосом 14 через подогреватель (на чертеже не показан) в бак парового котла. Далее цикл повторяется. Так химическая энергия топлива в паросиловой

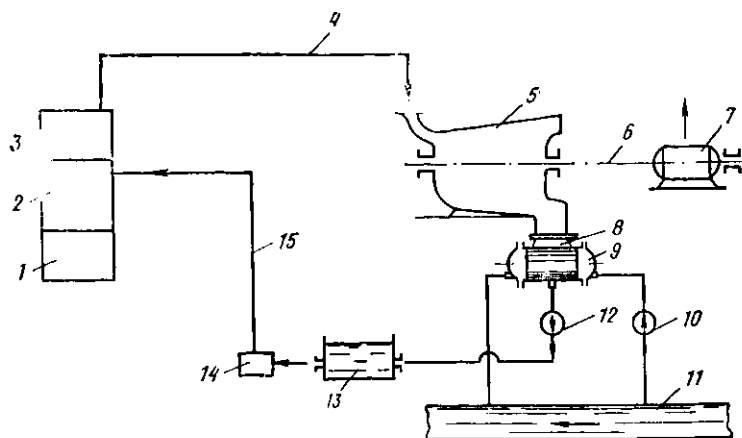


Рис. 8.5. Схема простейшей тепловой электрической станции

установке превращается в электрическую, которая может передаваться на большие расстояния потребителям.

Аналогично на тепловых электрических станциях может быть использован и газотурбинный агрегат, схема которого (начиная от сжигания топлива до электрического генератора) приведена на рис. 8.4.

Понятие об атомных электрических станциях. Атомная электростанция (рис. 8.6) — разновидность обычной тепловой электростанции, в которой атомная энергия преобразуется в электрическую.

Принцип ее работы состоит в следующем. В реактор 1, где находятся урановые стержни 3, подается вода циркуляционным насосом 21. Источник энергии — незаглушаемая длительное время контролируемая реакция деления тяжелого элемента (например, урана). Деление тормозится графитовыми замедлителями 2.

Почти вся энергия выделяется в виде теплоты, которую используют для нагревания воды и ее испарения. Пар из реактора по трубопроводу 4 подается в парогенераторы 5. Далее, пар, отдав свою энергию через трубопровод конденсата первого контура 18, с помощью циркуляционного насоса 21 подается опять в реактор. На пути движения по трубопроводу 18 в конденсат добавляется дистиллят через питательный насос 19 из ба-

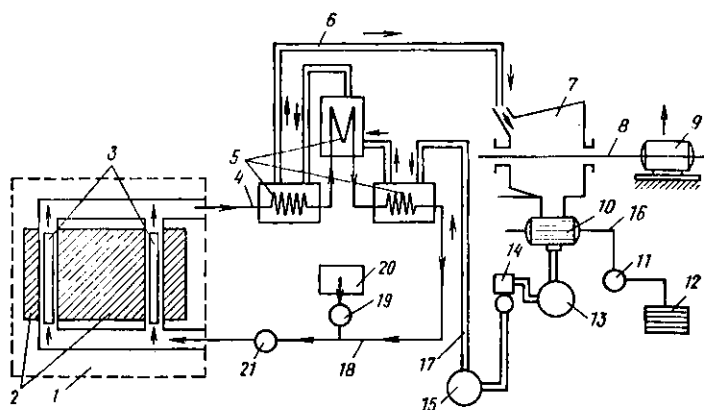


Рис. 8.6. Схема простейшей атомной электростанции

ка дистиллированной воды 20. Указанный путь движения воды и пара, называемый первым контуром, является радиоактивным и требует полной биологической защиты, включая генераторы пара.

Вторым контуром является подаваемый конденсат в генераторы через трубопровод 17 питательным насосом 15. Конденсат, проходя через генераторы 5, омывает трубы, по которым проходит пар первого контура, сам превращается в пар и по паропроводу второго контура 6 подается через сопла на изогнутые лопатки паровой турбины 7. Дальнейшая схема работы установки аналогична разобранной ранее (см. рис. 8.5).

Паровая турбина посажена на один вал 8 с электрическим генератором 9, который превращает механическую энергию вращения в электрическую. Отработанный пар из турбины поступает в конденсатор 10, куда из источника 12 циркуляционным насосом 11 подается по трубопроводу 16 холодная вода. Пар конденсируется и конденсатным насосом 13 передается в деаэратор 14, где освобождается от воздуха, и питательным насосом 15 передается снова в генераторы пара. Далее цикл повторяется.

Наличие больших запасов ядерного горючего, превышающих запасы газа, нефти, угля, делают атомные электрические станции перспективными.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

1. Расскажите о принципе работы двигателя внутреннего сгорания.
2. Объясните принцип действия паровой турбины.
3. В чем отличие действия газотурбинного агрегата от паровой турбины?
4. Опишите принципы работы тепловых и атомных электрических станций.

РАЗДЕЛ 6. СУШКА МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Как указывалось, сушка — процесс удаления влаги из материалов путем ее испарения. Этот процесс сопровождается изменением объема — усадкой.

ГЛАВА 9. СУШКА И СУШИЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ

В процессе сушки материала из него удаляется физико-механически и физико-химически связанная влага. Химически связанная влага из материала при сушке не удаляется. Поэтому для процесса сушки любой влажный материал рассматривают как систему, состоящую из сухого материала и влаги. Под сухим материалом понимают абсолютно сухой материал вместе с химически связанной влагой. Таким образом, массу влажного материала можно представить в виде

$$G_{\text{вм}} = G_{\text{см}} + W, \quad (9.1)$$

где $G_{\text{вм}}$ — масса влажного материала; $G_{\text{см}}$ — масса сухого материала; W — масса физико-химически и физико-механически связанной влаги с материалом.

9.1. Теоретические основы сушки

В сушильной установке изделие (материал) взаимодействует с сушильным агентом. Под сушильным агентом понимают теплоноситель — нагретый воздух или продукты сжигания газообразного топлива с меньшим парциальным давлением водяного пара $p'_{\text{са}}$, чем парциальное давление водяного пара p'_m у поверхности материала. Температура сушильного агента $T_{\text{са}}$ должна

быть выше, чем температура материала T_m . Требование к повышенной температуре сушильного агента объясняется увеличением возможностей сушильного агента к ассимиляции влаги от материала.

9.1.1. Кинетика сушки влажных материалов

Возьмем лабораторную сушилку 2 и поместим на весы 3 материал (изделие) 6 (рис. 9.1). Изделие снабжено термодатчиками 4, заделанными в центр и в поверхностный слой. По стрелке 5 подаем в сушилку нагретый сушильный агент, а отработанный отсасывается вентилятором 1. Материал 6 отдает влагу, сушильный агент эту влагу ассимилирует и выводит из установки. Если снабдить весы и термодатчики самопишущими устройствами, а их запись представить в координатах: по оси абсцисс время сушки t , по оси ординат масса G и температура T материала, то кривые будут иметь вид, представленный на рис. 9.2.

Так как никаких химических реакций и превращений в материале при сушке не происходит, то можно считать, что кривая 1 показывает изменение массы влаги в материале. От точки G_0 до точки a количество влаги, удаляемое в единицу времени, возрастает. Одновременно (см. кривую 2) повышается температура материала, и в точке a' температура поверхности T_n достигает точки росы — температуры сушильного агента по мокрому термометру $T_{мт}$. Период возрастающей влагоотдачи с одновременным нагревом поверхности материала до точки a' называют *первым периодом сушки*, или *периодом нагревания материала*. Этот период кратковременный.

От точки a влагосодержание начинает уменьшаться с одинаковой скоростью до точки b , при этом температура поверхности материала до точки b' не изменяется. Указанное объясняется испарением влаги с поверхности, на что расходуется подводимая к материалу теплота. В этот же период температура в центре материала T_d повышается и сравнивается с температурой поверхности (точка M), $T_d = T_n$.

Второй период носит название *периода постоянной скорости сушки* материала. Точка b , характеризующая окончание этого периода, одновременно соответствует критическому влагосодержанию материала. *Под критическим влагосодержанием материала* понимают такое

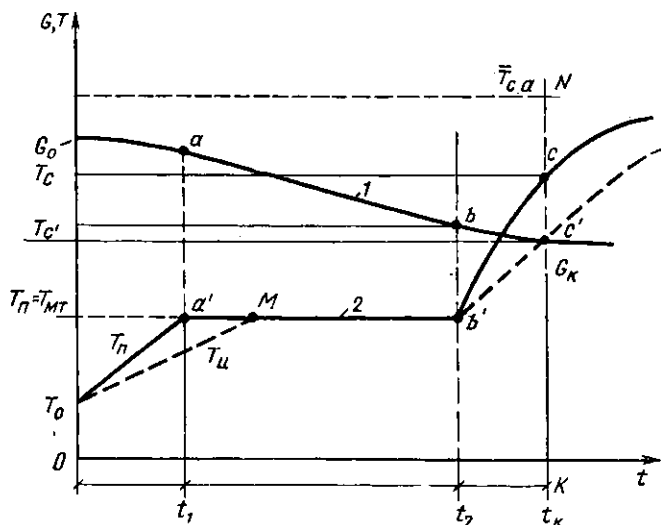
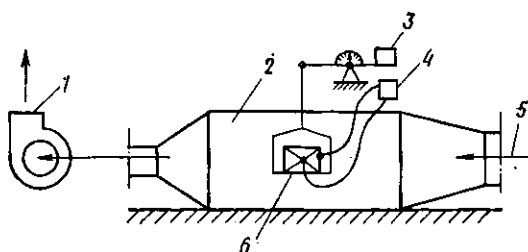


Рис. 9.2. Кривые изменения среднего влагосодержания и температуры в процессе сушки

1 — кривая изменения массы; 2 — то же, температуры; O_0 и T_0 — соответственно начальные масса и температура

его состояние, при котором заканчивается его усадка. Продолжительность периода постоянной скорости сушки обозначена на оси отрезком $t_2 - t_1$.

Начиная от точки b (см. кривую 1), количество испаряемой влаги с поверхности материала за единицу времени начинает снижаться. В точке b' (см. кривую 2) в этот же момент времени начинает резко возрастать температура поверхности материала $T_{\text{п}}$, а за ней и температура центральных слоев материала $T_{\text{ц}}$. Физический смысл повышения температуры объясняется отсутствием

влаги на поверхности. К этому времени общее количество влаги в материале уменьшается, влага к поверхности испарения подается все медленнее, и поверхность испарения как бы перемещается внутрь материала. Пар образуется уже не на поверхности, а на каком-то от несе расстоянии, в глубине материала, и диффундирует через слой материала, покидает его, ассимилируясь сушильным агентом. Постепенно влага покидает материал, а температура поверхности и центра материала асимптотически приближается к средней температуре сушильного агента T_{ca} , работающего в сушилке.

Обычно процесс сушки не ведут до полного удаления влаги, а заканчивают значительно раньше. Проведем на рис. 9.2 прямую KN , перпендикулярную оси t , и будем считать, что именно на этом отрезке времени t_k от начала сушки изделие выгружают из сушилки. При этом масса выгружаемого материала составит G_k , температура поверхности материала T_c , а температура центра материала $T_{c\cdot}$. Изменяя длительность третьего периода — *периода падающей скорости сушки*, можно регулировать необходимую конечную влажность выгружаемого материала.

Обычно конечную влажность материала выбирают по соображениям технологии или сушат до так называемого равновесного состояния, когда парциальное давление водяных паров у поверхности материала соответствует парциальному давлению водяных паров в окружающей среде.

9.1.2. Тепло- и массообмен.

Напряженное состояние в материале при сушке

При сушке между сушильным агентом и поверхностью материала осуществляется процесс внешнего тепло- и массообмена по формулам: $q = \alpha_k (T_{ca} - T_{pm})$ и $q_m = \beta_m (p'_{pm} - p'_{ca})$ [см. формулы (4.34) и (4.33)]. Для данного случая температура теплоносителя T_T заменена температурой сушильного агента T_{ca} , ибо теплоносителем здесь является сушильный агент. Движение влаги к поверхности материала осуществляется за счет возникающих в материале градиентов влагосодержания ∇U , температуры ∇T и давления ∇p . Суммарный поток влаги q_m^u определяется по формуле (4.45): $q_m^u =$

$= q^B_{mU} + q^B_{mT} + q^B_{mP}$; поток теплоты внутрь материала определяется по формуле (4.44): $q^B_T = -\lambda \nabla T + i q^B_m$.

В процессе сушки за счет перепадов влагосодержания ΔU , температуры ΔT и давления Δp в материале возникает напряженное состояние; причем напряженное состояние будет возрастать с увеличением перепадов ΔU , ΔT и Δp .

Для безопасной скорости сушки в первую очередь необходимо, чтобы перепад влагосодержания ΔU не возрастал, а это возможно только в том случае, если к поверхности испарения будет подводиться столько же влаги, сколько испаряется с поверхности. Но каждый материал обладает определенной способностью пропускать влагу, т. е. массопроводностью. Массопроводность материала зависит от свойств материала, его плотности и характера пористости (поры закрытые, открытые). Следовательно, для каждого материала существует своя массопроводность.

Движение влаги внутри материала к поверхности ее испарения есть функция от ∇U , ∇T и ∇p [см. формулу (4.45)]. Изменение скорости нагрева материала влечет за собой изменение значений ∇T и ∇p . Перераспределение потоков влаги внутри материала вызовет и изменение ∇U . Отсюда при увеличении начальной температуры сушильного агента и скорости его течения количество влаги, удаляемой с поверхности, будет возрастать.

Как указывалось, максимальная возможность материала пропускать влагу к поверхностям испарения определяется его массопроводностью, при которой напряженное состояние его будет соответствовать его прочностным характеристикам. Если материал не будет иметь возможность пропускать влагу, она начнет разрушать сначала наиболее слабые поры, перегородки, затем и всю структуру материала. Напряженное состояние, возникающее при этом, будет выше прочностных характеристик материала. Следовательно, для каждого материала (изделия) существует какая-то своя безопасная скорость сушки — скорость удаления влаги с поверхностей испарения, при которой материал может пропускать без нарушения структуры влагу из центральных слоев к поверхности.

Отсюда для расчета безопасной скорости сушки необходимо рассчитать безопасную скорость подвода вла-

ги к поверхности, однако такой расчет требует длительных исследований; кроме того, ряд зависимостей не всегда можно учесть. Положение осложняется еще и тем, что прочностные характеристики материала (изделия) в процессе сушки, как и его массопроводность, могут изменяться. Поэтому в лабораториях скорость и срок сушки большинства материалов подбирают экспериментально.

9.2. Система: материал — сушильная установка

Для анализа взаимодействия сушильной установки с материалом целесообразно составить такую же структурную блок-схему, как и на рис. 4.19 (см. рис. 9.3).

В пп. 9.1.1 и 9.1.2 установлено, что скорость сушки материала определяется его свойствами, параметрами сушильного агента и условиями взаимодействия сушильного агента с материалом. Очевидно, что взаимодействие сушильного агента с материалом также зависит и от конструкции сушильной установки.

Рассмотрим взаимодействие штучного — сформованного изделия (материала) с сушильной установкой. Поступающее на сушку из формовочного цеха изделие характеризуется физическими свойствами, которые для процесса сушки будут входными нерегулируемыми параметрами. К таким параметрам относятся: плотность ρ_0 , теплопроводность λ_0 , теплоемкость c_0 , влагосодержание U_0 , температура T_0 . Необходимо установить прочностную характеристику материала R_0 , отсюда можно установить количество рядов изделий, устанавливаемых один на другой при погрузке в транспортные устройства. Тогда входными параметрами материала, поступающего в сушильную установку, являются: ρ_0 , λ_0 , c_0 , U_0 , T_0 , R_0 . При более детальном анализе можно говорить об изменении размеров изделия, о массопроводности и других свойствах, однако в целях некоторого упрощения эти данные здесь не рассматриваются.

Изделие выходит из сушильной установки с другими параметрами, ибо оно нагревается до более высокой температуры, изменяется его плотность и влагосодержание. Внутри изделия произойдут другие процессы. На выходе из сушильной установки изделие имеет выходные параметры (обозначены индексом и): $\rho_{\text{и}}$, $\lambda_{\text{и}}$, $c_{\text{и}}$, $U_{\text{и}}$, $T_{\text{и}}$, $R_{\text{и}}$.

Сушильный агент, поступающий в установку, характеризуется входными параметрами (обозначены индексом са): температурой $T_{са}$, влагосодержанием $d_{са}(\varphi_{са})$, скоростью обтекания материала $v_{са}$. Выходные параметры отработанного сушильного агента (обозначены индексом ос): температура $T_{ос}$, относительная влажность $\varphi_{ос}$. Скорость в отсасывающей системе на тепло- и массообмен не влияет.

Взаимодействие сушильного агента с материалом характеризуется следующими параметрами: коэффициентом теплоотдачи α ; коэффициентом массопередачи β ; временем, затраченным на сушку, t , а также поверхностью изделия, которая будет контактировать с сушильным агентом. Изделие необходимо загрузить на транспортное устройство в несколько рядов. Следовательно, для испарения влаги закрыта сторона поверхности изделия, на которой оно лежит и которой оно соприкасается с другим изделием. Поэтому в качестве входного параметра взаимодействия сушильного агента с материалом вводят характеристический размер изделия R_v — отношение объема изделия к его поверхности, открытой для испарения.

По проведенному анализу составим блок-схему (рис. 9.3) с учетом средней температуры $T_{са}$ и относительной влажности сушильного агента $\varphi_{са}$.

Введем следующие обозначения. Группу входных параметров, характеризующих материал и изделие: $\rho_0, \lambda_0, c_0, U_0, T_0, R_0, R_v$, обозначим $\bar{X}$ и отнесем к контролируемому, но нерегулируемому. Группу входных параметров, характеризующих сушильный агент, отнесем к контролируемому и регулируемому и обозначим H_1 . Группу параметров, характеризующих взаимодействие сушильного агента с материалом, также отнесем к контролируемому и регулируемым параметрам, но будем помнить, что α, β, t являются зависимыми от $T_{са}, \varphi_{са}, v_{са}$, поэтому обозначим их H_2 .

В блок-схему входит группа параметров $\bar{Z}$: тепловая инерция сушильной установки z_1 , подсосы наружного воздуха и выбивание теплоносителя z_2 , неравномерность температурного поля z_3 . Величины z_1, z_2, z_3 определяют характеристику конструкции сушильной установки. Кроме того, в группу $\bar{Z}$ входит z_4 , определяющая инерцию регулирующих систем и управляющих воздействий ЭВМ.

На выходе из сушильной установки выходными пара-

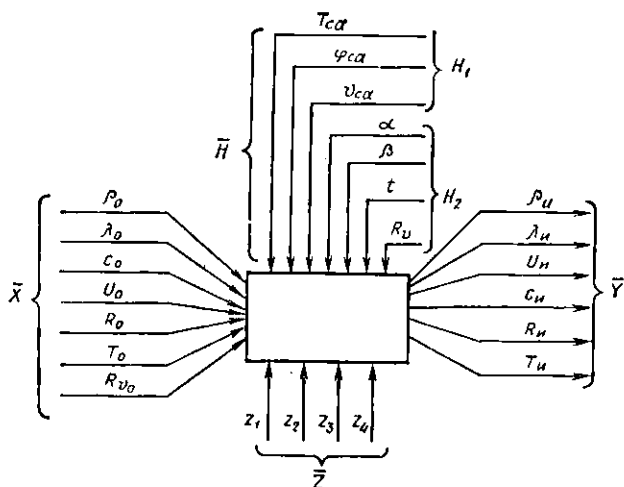


Рис. 9.3. Блок-схема сушильного процесса

$\bar{X}$ — контролируемые нерегулируемые параметры; $\bar{H}$ — контролируемые и регулируемые параметры; H_1 — параметры, характеризующие сушильный агент; H_2 — параметры, характеризующие взаимодействие сушильного агента с материалом; $\bar{Z}$ — возмущающие воздействия (входные неконтролируемые и нерегулируемые параметры); $\bar{Y}$ — выходные параметры материала после сушки

метрами будут: $\rho_u, \lambda_u, U_u, c_u, R_u, T_u$. Обозначим эту группу $\bar{Y}$ (выходные параметры материала).

По рассмотренной блок-схеме (см. рис. 9.3) для процесса, который происходит при сушке, можно записать общую функциональную зависимость

$$dU/dt = f(\rho, \lambda, c, U, R, R_v, T, T_{ca}, \phi_{ca}, \alpha, \beta, t).$$

Подвергая анализу технологическую часть установки, возмущающие воздействия $\bar{Z}$ отбрасывают. Эти параметры учитывают при разработке систем автоматического регулирования.

По рассмотренной блок-схеме можно решать много задач. Однако нас интересует оптимизация процесса сушки изделий.

Для упрощения изображенной на рис. 9.3 блок-схемы анализируем переменные, вошедшие в это уравнение. 1. Величины α, β, ϕ_{ca} зависят от величин T_{ca} и v_{ca} , поэтому, оставляя T_{ca} и v_{ca} , параметры α, β, ϕ_{ca} можно исключить. 2. Величина R_v — постоянная для садки изделий, величина λ — функция плотности ρ и влагосодержания; температура входящего изделия T то-

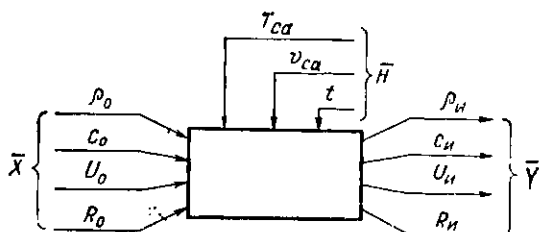


Рис. 9.4. Упрощенная структурная блок-схема сушильного процесса (X , Y , N — см. подпись к рис. 9.3)

же постоянна, поэтому параметры R_v , λ , T тоже исключаются.

Таким образом упрощенную для анализа структурную блок-схему сушильного процесса можно представить на рис. 9.4.

Упрощенная структурная блок-схема работы сушильной установки дает возможность решать несколько задач, при этом можно переносить какую-то часть входных нерегулируемых параметров в группу регулируемых. Например, вводя различные пластифицирующие добавки в формовочную массу, можно изменять начальное влагосодержание материала, следовательно, U_0 можно из нерегулируемых параметров группы X перевести в регулируемые группы N . Если, например, мы хотим процесс оптимизировать по сроку сушки t , то должны значение срока сушки t перенести из параметров группы N в параметры группы Y , тогда t будет критерием оптимизации.

9.2.1. Разработка математической модели системы: материал — сушильная установка

Разработку математической модели начинают с выполнения по блок-схеме физической модели. В простейшем случае в качестве физической модели можно взять существующую лабораторную конвективную сушильную установку. Для проведения эксперимента необходимо уточнить масштаб лабораторной установки по отношению к промышленной установке, в этом же масштабе изготовить модельное изделие. Далее в лабораторной установке для проведения экспериментов создают в со-

ответствии с теорией подобия модельный процесс тепловой обработки.

Разработку математической модели ведут по следующей схеме: выбор метода исследования (структурный или кибернетический); составление рабочей блок-схемы и установление параметров, определяющих ход процесса; выбор интервалов варьирования и матрицы планирования эксперимента; проведение эксперимента; анализ и обработка экспериментальных данных; составление уравнений, регрессии; анализ полученных уравнений. Уравнения регрессии, решенные в отношении любого выходного параметра материала P_m , $P_m = f(X, A)$, и будут математической моделью системы. Полученные данные — формально-знаковое описание объекта — можно переносить с учетом теории подобия на промышленную установку.

На составленной блок-схеме (см. рис. 9.4) имеется четыре входных неуправляемых параметра X , три входных управляющих процессом параметра A и четыре выходных, определяющих свойства изделия после сушки, параметра Y . Чтобы избежать длительного системного изучения процессов, проходящих внутри изделий, принимают кибернетический метод исследования такой системы. Далее, чтобы получить информацию, связывающую выходные и входные параметры, необходимо исследовать (проведением эксперимента) эти зависимости. Таких зависимостей очень много, поэтому прибегают сначала к ранжированию параметров — делению входных и выходных параметров на значимые и мало значимые.

Ранжирование параметров ведут экспериментально либо по литературным данным. Из последних известно, что для описания процесса сушки в качестве основных параметров на входе выбираются: начальное влагосодержание материала U_0 , температура T_{ca} и скорость движения по установке поступающего сушильного агента v_{ca} .

Для планирования эксперимента обозначим эти параметры соответственно X_1, X_2, X_3 .

В качестве выходных параметров, подлежащих определению, также по литературным данным выбирают предел прочности материала при изгибе (сжатии) R_n и длительность сушки t . Эти выходные параметры обозначают соответственно Y_1 и Y_2 . В этом случае рабочая

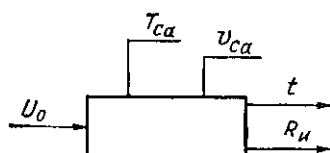


Рис. 9.5. Рабочая блок-схема сушильного процесса

блок-схема процесса может быть представлена на рис. 9.5.

Далее определяются уровни варьирования (см. курс вычислительной техники и программирования). Выбрав исходный нулевой уровень X_{i0} , интервал варьирования ΔX_i , верхний (+1) и нижний (-1) уровни варьирования получают путем прибавления значения интервала варьирования к нулевому уровню или вычитания интервала варьирования из нулевого уровня. Полученную информацию по условиям планирования эксперимента сводят в таблицу. В табл. 9.1 даны примерные величины сушки керамических изделий.

ТАБЛИЦА 9.1. ВХОДНЫЕ ФАКТОРЫ И УРОВНИ ИХ ВАРЬИРОВАНИЯ ПРИ СУШКЕ КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

Факторы		Уровень варьирования			Интервал варьирования
натуральный вид	кодированный вид	нижний	средний	верхний	
Начальное влагосодержание	X_1	0,20	0,25	0,30	0,05
Температура сушильного агента, К	X_2	353	373	393	20
Скорость движения сушильного агента по установке, м/с	X_3	1,0	1,5	2,0	0,5

Взаимосвязь между натуральными X_i и кодированными значениями факторов X_i определяют по формуле

$$X_i = (\bar{X}_i - X_i) / \Delta X_i. \quad (9.2)$$

При изучении простейших тепловых процессов чаще имеют место линейные и неполные квадратичные зависимости между входными и выходными параметрами, нахождение которых связано с проведением полного факторного эксперимента (ПФЭ).

Проведение ПФЭ осуществляется на верхнем (+1) и нижнем (—1) уровнях. Число экспериментов N , которое необходимо выполнить для достоверности полученных результатов, зависит от числа факторов (входных параметров) K и равно 2^K . Для трех факторов $N=2^3=8$. Далее берется матрица планирования ПФЭ при $K=3$ (табл. 9.2).

ТАБЛИЦА 9.2. МАТРИЦА ПЛАНИРОВАНИЯ ПФЭ
ПРИ $K=3$

Номер опыта	Факторы (входные параметры)			Выходные параметры	
	X_1	X_2	X_3	Y_1	Y_2
1	+	+	+	Y_{11}	Y_{21}
2	+	—	+	Y_{12}	Y_{22}
3	—	+	+	Y_{13}	Y_{23}
4	—	—	+	Y_{14}	Y_{24}
5	+	+	—	Y_{15}	Y_{25}
6	+	—	—	Y_{16}	Y_{26}
7	—	+	—	Y_{17}	Y_{27}
8	—	—	—	Y_{18}	Y_{28}

Согласно матрице планирования ПФЭ, изготавливаются образцы модельных изделий, проводят эксперимент и полученные результаты сводят в таблицу, аналогичную матрице планирования.

С помощью методов математического планирования эксперимента, варьируя значениями независимых переменных согласно матрице планирования и полученным экспериментальным данным, получают математическое описание исследуемой зависимости.

Для выбранной матрицы планирования можно получить необходимые математические зависимости и математическую модель в виде линейных или неполных квадратичных уравнений. Неполное квадратичное уравнение для трехфакторного эксперимента имеет вид

$$y_i = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3. \quad (9.3)$$

Свободный член уравнения b_0 определяется из формулы $b_0 = \left(\sum_{i=1}^N y_n \right) / N$, где N — число экспериментов; y_n — значение выходного параметра в n -ом эксперимен-

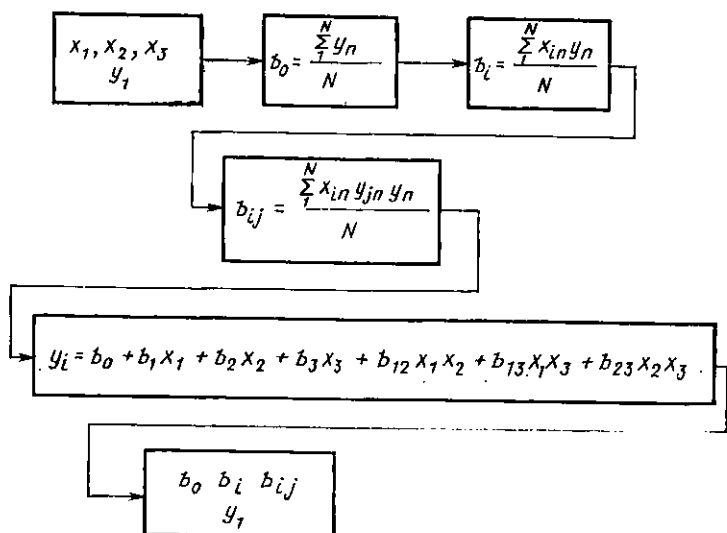


Рис. 9.6. Пример упрощенного алгоритма для определения коэффициентов в уравнении регрессии трехфакторного эксперимента

те. Определяют коэффициенты линейных членов уравнений: $b_i = \left(\sum_{n=1}^N x_{in} y_n \right) / N$, где x_{in} — значение i -го фактора в n -м опыте. Коэффициенты парных взаимодействий $b_{ij} = \left(\sum_{n=1}^N x_{in} x_{jn} y_n \right) / N$, где x_{jn} — значение j -го фактора в n -ом опыте.

Для расчета проведенных экспериментальных исследований на ЭВМ составляются алгоритмы с целью определения коэффициентов в уравнении регрессии, проверки значимости полученных коэффициентов по критерию Стюдента. Проверку адекватности полученных уравнений регрессии ведут по критерию Фишера, также составляя для этого алгоритм. Пример упрощенного алгоритма для определения коэффициентов в уравнении регрессии дан на рис. 9.6.

При централизованной обработке результатов экспериментальных работ на вычислительном центре следует применять стандартные программы.

9.2.2. Анализ математических моделей, и оптимизация процесса сушки

Полученные уравнения регрессии необходимо проанализировать. Легче всего анализу поддаются линейные модели. При коэффициенте знаки показывают: (+), что с увеличением фактора значение соответствующего выходного параметра увеличивается, а (—), что оно убывает. Чем больше значение коэффициента, тем сильнее влияние фактора. Если необходимо получить максимальное значение выходного параметра, значения всех факторов, коэффициенты b_i которых имеют знак (+), следует принимать максимальными, а значения факторов, коэффициенты b_i которых имеют знак (—) — минимальными. Абсолютные значения коэффициентов уравнений регрессии увеличиваются с увеличением интервалов варьирования.

В неполных квадратичных уравнениях регрессии знак перед коэффициентом линейного числа соответствует направлению изменения выходного параметра при условии, что другие факторы приняты на основном уровне. Знак (+) перед коэффициентом взаимодействия свидетельствует о том, что увеличение выходного параметра возможно в том случае, если взаимодействующие факторы находятся одновременно на верхнем или на нижнем уровне, а знак (—) о том, что один фактор находится на верхнем, а другой на нижнем уровне.

Задачи оптимизации заключаются в нахождении такого сочетания факторов, которое обеспечивает максимальное (минимальное) значение выходного параметра. Часть параметров в этом случае может выступать в качестве ограничений. Экстремум определяется путем дифференцирования уравнения последовательно по x_1 , x_2 , x_3 . Полученная система линейных уравнений приравнивается к нулю. Путем ее решения находят значение X_i , обеспечивающее экстремальное значение y . Подставляя найденные значения X_i в исходное уравнение, определяют экстремальные значения выходного параметра.

9.3. Сушильные установки

Сушильными называют установки, в которых тепловые процессы связаны с удалением влаги, химически не связанной с материалом.

Классифицировать их можно по различным признакам: по режиму работы — периодические и непрерывные, по конструкции — барабанные, шахтные, туннельные и т. д; по способу передачи теплоты — конвективные, контактные, радиационные; по способу движения теплоносителя — прямоточные, противоточные, смешанные. Ниже рассматриваются установки, классифицируемые по виду обрабатываемого материала: сушилki для суспензий, кусковых и сыпучих материалов, сформованных изделий.

9.3.1. Сушилki для суспензий

Для сушки суспензий типа глиняного шликера применяют башенные распылительные сушилki (рис. 9.7). Материал — суспензию с помощью форсунок 4 диспергируют в потоке сушильного агента, циркулирующего в корпусе установки 5. Для распыления применяют механические и центробежные форсунки и центробежные дисковые распылители. Сушильный агент из топki 1 по каналу 2 подается в сушилку с температурой 973—1073 К.

Взаимодействие сушильного агента и струй шликера при турбулизации потока приводит к быстрому испарению влаги. Частицы глины или другого компонента суспензии, вращаясь в потоке сушильного агента, ударяются о стенки корпуса, теряют скорость и выпадают в нижнюю, конусную, часть корпуса, снабженную челюстным затвором. По мере заполнения нижней части корпуса материалом затвор открывают, и готовую продукцию выгружают на конвейер 9. Отработанный сушильный агент через вмонтированный в нижнюю часть корпуса трубопровод 6 отбирается, поступает в циклон 7 для очистки, затем выбрасывается вентилятором 8 в атмосферу.

Кроме рассмотренной башенной распылительной сушилki с выносной топкой (тепловым генератором) выполняют сушилki с сжиганием топлива непосредственно в сушильном объеме, для чего камеру оснащают газовыми горелками. Удельный расход теплоты для таких сушилок составляет 5000—6000 кДж/кг испаренной влаги. Влажность суспензий на входе составляет 45 %, влажность выгружаемого порошка 8—10 %.

Башенные распылительные сушилki, кроме их оцен-

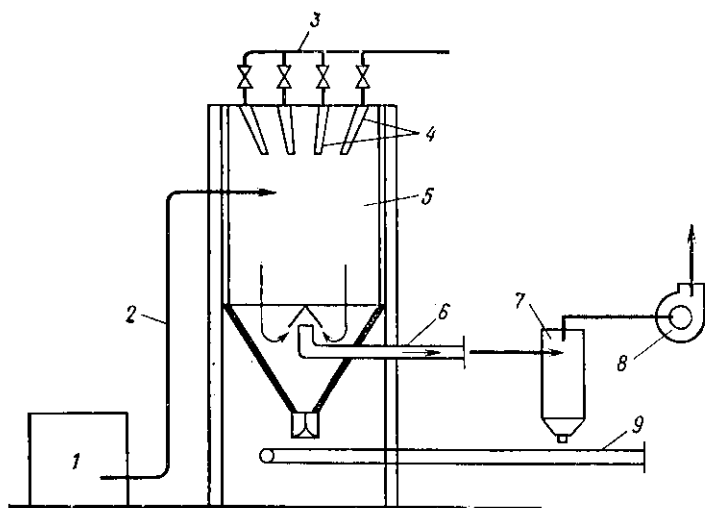


Рис. 9.7. Схема башенной распылительной сушилки

1 — тепловой генератор; 2 — подача продуктов горения; 3 — подача суспензии; 4 — распылительные форсунки; 5 — корпус сушилки; 6 — отбор отработанных газов; 7 — циклон; 8 — вентилятор; 9 — конвейер выгрузки продукта

ки по расходу теплоты, оценивают по количеству испаряемой влаги в 1 ч с 1 м³ сушильного объема. Указанная величина оценивается в 5—20 кг/(м³·ч). Отсюда подбор сушильных установок для суспензий может быть осуществлен по формуле

$$V_0 = W / W_y, \quad (9.4)$$

где V_0 — необходимый объем распылительной сушилки; W — заданная производительность по испаряемой влаге в 1 ч; W_y — количество испаряемой влаги в 1 ч с 1 м³ сушильного объема, называемое удельным напряжением по испаряемой влаге.

9.3.2. Сушилки для кусковых и сыпучих материалов

Для сушки кусковых и сыпучих материалов в промышленности строительных материалов широко применяют барабанные сушилки (рис. 9.8). Они просты в обращении, надежны в эксплуатации и достаточно экономичны.

Барабанная сушилка состоит из теплового генерато-

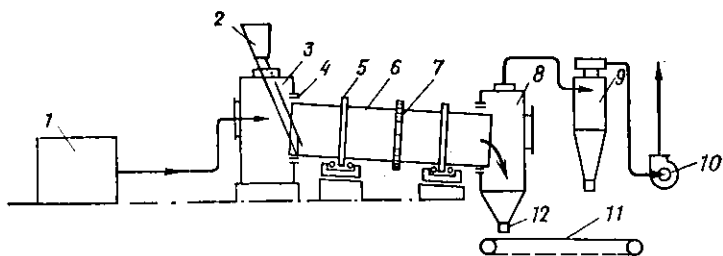


Рис. 9.8. Схема барабанной сушилки

ра 1, где готовится сушильный агент с температурой 973—1073 К, и металлического барабана 6, в котором и производится сушка материала. Барабан удерживается роликовыми опорами с помощью опорных бандажей 5 в фиксированном положении с наклоном к горизонту под углом 4—6°. Размещенная на барабане венцовая шестерня 7 с помощью электропривода позволяет вращать его.

Для исключения подсосов наружного воздуха концы барабана установлены в концевых камерах 3, 8 и снабжены уплотнительными кольцами 4. Камера 3 предназначена для подачи через нее материала и теплоносителя (при работе по принципу прямотока). Камера 8 служит для выгрузки готовой продукции через челюстной затвор 12 на транспортирующее устройство 11 и для отбора из нее отработанного сушильного агента.

Материал непрерывно питателем подается через воронку 2, попадает в барабан, заполняя его на 12—15 %, и продвигается за счет наклона и вращения барабана к выгрузочному концу. Выгрузка также идет непрерывно. Сушильный агент с температурой 973—1073 К подается в барабан либо навстречу движению материала (по принципу противотока) либо (как показано на рис. 9.8) в том же направлении (по принципу прямотока). Отработанный теплоноситель проходит очистку в циклоне 9 и выбрасывается в атмосферу вентилятором 10.

Сушильные барабаны, как и сушилки для суспензий, подбираются из расчета созданного в них объемного напряжения по влаге. Для выбора используют формулу (9.4). Однако допустимое количество испаряемой влаги W_y в них значительно выше, например для сушки песка $W_y = 50 \text{ кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{ч})$, для сушки щебня $W_y = 100 \text{ кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{ч})$.

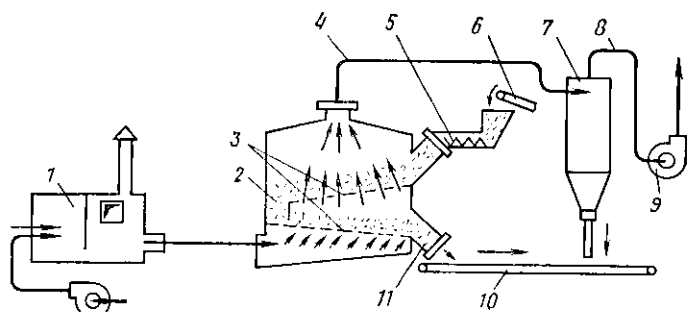


Рис. 9.9. Схема установки для сушки материалов в кипящем слое

Удельный расход теплоты составляет 4200—5800 кДж/кг испаряемой влаги.

Установка для сушки материала в кипящем слое. Сушка в кипящем слое — наиболее перспективный способ сушки кусковых и сыпучих материалов. При таком способе сушки коэффициент теплоотдачи от теплоносителя к материалу в 8—10 раз больше, чем в барабанных сушилках, а время сушки (например, песка) исчисляется секундами.

Рассмотрим конструкцию простейшей установки для сушки сыпучих материалов в кипящем слое (рис. 9.9). Установка состоит из сушильной камеры 2, оснащенной решетками, выполненными в виде наклонных ступеней, по которым передвигается материал. Материал на сушку непрерывно подается шнековым питателем 5 с помощью конвейера 6. Сушильный агент готовится в тепловом генераторе 1 с температурой порядка 473 К и подается под решетку 3 нижнего яруса. Проходя через отверстия решетки, сушильный агент поступает в слой со скоростью, равной скорости витания частиц среднего диаметра, и создает кипящий слой для окончательного высушивания уже прошедшего частичную сушку на верхней решетке материала.

Далее сушильный агент повторяет свою работу на верхней решетке и отработанный через трубопровод 4 поступает в циклон 7. В циклоне 7 отработанный сушильный агент очищается от унесенных частиц материала и через трубопровод 8 вентилятором 9 выбрасывается в атмосферу. Материал, передвигаясь по наклонной верхней решетке, попадает на нижнюю решетку, пере-

двигается по ней, окончательно высушивается и выгружается через выгрузочное устройство 11 на конвейер 10. На этот же конвейер выгружается материал из циклона. Использование двухъярусного принципа кипящего слоя позволяет уменьшить количество уносов, ибо на верхней решетке находится более влажный материал.

Подбор установок для сушки материала в кипящем слое производят из расчета удельного объемного напряжения по влаге, которое для таких установок составляет $150\text{--}200 \text{ кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{ч})$. Плоскостное напряжение (допустимый сьем влаги с 1 м^2 решетки в час) составляет $800\text{--}1000 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, а расход теплоты $4000\text{--}5000 \text{ кДж/кг}$ испаряемой влаги.

Более крупные кусковые материалы сушат в установках виброкипящего слоя, ибо создавать скорость витания для таких материалов экономически нецелесообразно. Воздействуя на решетку вибратором, можно получить подобие кипящего слоя, а стало быть, и все теплотехнические выгоды от его применения.

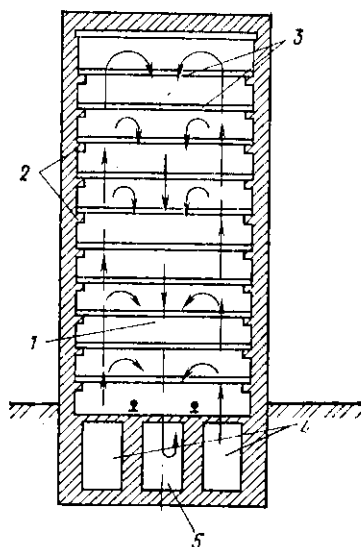
9.3.3. Установки для сушки сформованных изделий

Камерные сушилки впервые стали применять в кирпичном производстве.

Камерные сушилки — сушилки периодического действия (рис. 9.10). Камера 1 имеет десять рядов кирпичных выступов 2, на которые помещается десять полок 3 с кирпичом-сырцом. Загрузка камеры осуществляется двигающейся по рельсам десятиполочной загрузочной вагонеткой, которая заезжает в камеру, опускает на кирпичные выступы 2 десять полок с кирпичом-сырцом и отправляется за следующей партией. Так повторяется до загрузки всей камеры.

Камера имеет высоту 3,5 м, длину 10—13 м. Камеры строятся блоками по 20—30 шт. Ниже уровня пола камеры перекрыта двумя деревянными решетками, через которые подводится теплоноситель по каналам 4. Отработанный теплоноситель отводится по одному каналу, также перекрытому решеткой. Блоки работают на продуктах горения топлива и имеют централизованное снабжение сушильным агентом. Продукты горения через каналы 4 попадают в камеру и так как они легче воздуха, занимающего объем камеры, поднимаются вверх (показано стрелками) до тех пор, пока их температура не

Рис. 9.10. Схематический разрез камерной сушилки периодического действия



сравнивается с температурой продуктов горения и воздуха в камере.

Далее отработанный сушильный агент начинает движение вниз и отбирается из камеры через канал 5. Смешивание восходящих и нисходящих потоков вызывает многократную циркуляцию и достаточно равномерную сушку кирпича-сырца, которая длится 2—3 сут, после чего кирпич выгружается. Удельный расход теплоты камерных сушилок составляет 4200—6300 кДж/кг испаряемой влаги.

Камерные сушилки применялись в производстве кирпича до 1930-х годов, затем стали вытесняться туннельными. Однако принцип циркуляции газов, характерный для камерных сушилок, используется и в современных сушилках.

Туннельные сушилки. На рис. 5.3, б рассмотрена схема аэродинамического баланса и диаграммы сопротивлений туннельной сушилки. Рассмотрим принцип ее работы.

Кирпич-сырец укладывают на полочные вагонетки (один ряд на полку; при высокой прочности сырца может быть бесполочная его укладка в шесть — восемь рядов), и он поступает в сушильный туннель. Туннель снабжен входной и выходной дверью, имеет ширину

1,2 м, высоту 1,4 и длину 30 м. Для загрузки открывают обе двери и с помощью толкателя подают вагонетку в туннель, продвигая весь поезд на одну позицию. Одновременно из туннеля выходит вагонетка с готовой продукцией. Через определенный интервал (30—40 мин) операция повторяется.

Для сушки сырца в туннель подается сушильный агент — продукты сжигания природного газа или нагретый воздух. Движение сушильного агента производится за счет отрицательного давления, создаваемого вентилятором (см. рис. 5.3). Теплоноситель продвигается по туннелю в результате динамического напора $v^2\rho/2$.

Таким образом, аэродинамика туннельной сушилки коренным образом отличается от камерной, где используется естественная циркуляция. Принудительное движение сушильного агента по туннелю позволило сократить срок сушки с 2—3 сут (в камерных) до 36—48 ч (в туннельных). С уменьшением срока сушки до 24—30 ч стало заметно ухудшаться качество продукции. Удельный расход теплоты в туннельных сушилках был несколько снижен до 3800—4800 кДж/кг испаряемой влаги.

Развитие промышленности строительных материалов потребовало поиска новых конструктивных решений сушилок. В последнее время в этом отношении определились два направления: первое — для камерных сушилок — увеличить скорость циркулирования во всех направлениях сушильного агента; второе — для туннельных — снизить высоту садки изделий до одного ряда и за счет увеличения скорости сушильного агента без расщеления температур получить хорошее качество изделий.

В промышленности, особенно за рубежом, появилось много различных конструкций сушилок периодического и полунепрерывного действия со сложной циркуляционной системой. Принцип создания непрерывной поперечной циркуляции сушильного агента позволяет значительно уменьшить недостатки обычных туннельных сушилок.

Туннельная сушилка с принудительной циркуляцией конструкции института Союзгипростром (рис. 9.11) предназначена для сушки керамических камней и кирпича. Длина 3-путного туннеля 43,5 м; ширина 6 м; высота 2,2 м. Сушилка разделена на две зоны; первая занимает 2/3 длины туннеля, вторая 1/3. Срок сушки 32 ч.

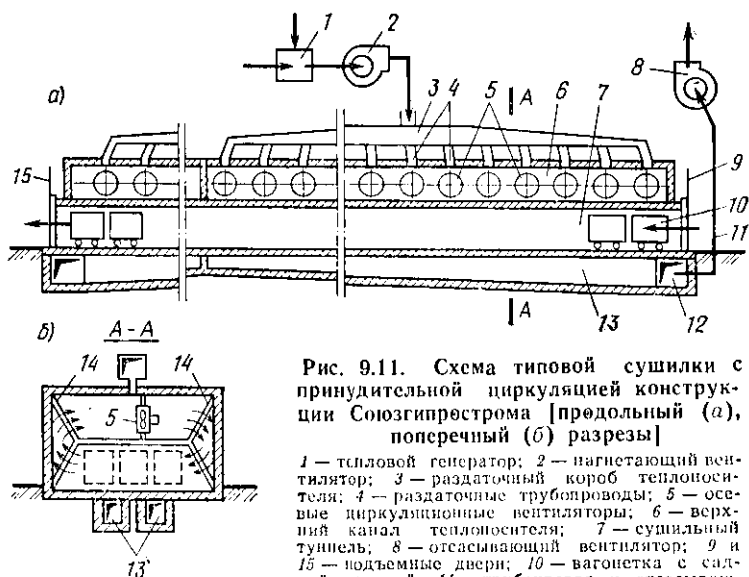


Рис. 9.11. Схема типовой сушилки с принудительной циркуляцией конструкции Союзгипрострома [продольный (а), поперечный (б) разрезы]

1 — тепловой генератор; 2 — нагнетающий вентилятор; 3 — раздаточный короб теплоносителя; 4 — раздаточные трубопроводы; 5 — осевые циркуляционные вентиляторы; 6 — верхний канал теплоносителя; 7 — сушильный туннель; 8 — отсасывающий вентилятор; 9 и 15 — подъемные двери; 10 — вагонетка с садкой изделий; 11 — трубопровод к отсасывающему вентилятору; 12 — сборный канал; 13 — отводящие каналы; 14 — распределительные дефлекторы

Работает сушилка на теплоносителе, представляющем собой смесь нагретого воздуха, поступающего из зоны охлаждения печи, наружного воздуха и рециркулята. Теплоноситель готовится в тепловом генераторе 1 и вентилятором 2 подается в раздаточный короб 3 первой зоны. Из раздаточного короба по трубопроводам 4 теплоноситель поступает в верхний канал 6, откуда осевыми вентиляторами 5, расположенными над каждым рядом трех вагонеток, осуществляется непрерывная поперечная циркуляция теплоносителя сквозь садку изделий. Для выравнивания скоростей циркуляционных потоков по всей высоте садки изделий предусмотрены направляющие (распределительные) дефлекторы 14.

Направление поперечной циркуляции на рис. 9.11, б показано стрелками. Часть отработанной смеси теплоносителя, имеющей более низкую температуру и высокое влагосодержание, опускается вниз и попадает в отсасывающие каналы 13, откуда через сборный канал 12, трубопровод 11 забирается вентилятором 8 и выбрасывается в атмосферу.

Здесь рассмотрен принцип работы теплоносителя с начальной температурой 363 К в первой зоне. Аналогично с начальной температурой 338 К работает он и во второй зоне. Однако скорость циркуляции в ней несколько выше. Отбор теплоносителя после работы во второй зоне производится по аналогичной схеме вентилятором. Часть отработанного теплоносителя (около 20 %) выбрасывается в атмосферу, остальная возвращается в тепловой генератор на рециркуляцию.

Запроектированный удельный расход теплоты такой сушилки 5000—6000 кДж/кг испаряемой влаги.

Ранее указывалось, что перспективным является и второе направление, заключающееся в создании щелевых сушилок, рассчитанных на один ряд изделий. В настоящее время созданы щелевые установки только для сушки керамической плитки. Установки для сушки кирпича и более крупных изделий находятся пока в стадии разработок.

9.4. Принципы теплового и аэродинамического расчета сушильных установок

Тепловой расчет сушилок начинают с составления материального и теплового балансов, в которых устанавливают удельные и общие расходы теплоты и сушильного агента. Далее составляют аэродинамический баланс, диаграмму сопротивлений, производят подбор сечений подводящих и отводящих каналов. По диаграмме сопротивлений производят аэродинамический расчет сопротивлений и выбирают необходимые вентиляторы.

9.4.1. Расчет материального баланса

По заданной годовой производительности сушилки G определяют часовую производительность $G_{\text{ч}}$

$$G_{\text{ч}} = G / [nm(1-K)], \quad (9.5)$$

где n — число часов работы установки в сутки; m — число рабочих дней в году; K — безвозвратные потери материала в процессе сушки в долях единицы.

Составим материальный баланс сушилки в общем виде на 1 ч работы. Для статей прихода введем индекс 1, для статей расхода — индекс 2, тогда

$$G_{\text{м1}} + G_{\text{са1}} = G_{\text{м2}} + G_{\text{са2}}, \quad (9.6)$$

где $G_{\text{м}}$ — масса материала; $G_{\text{са}}$ — масса сушильного агента.

Представим массу влажного материала (только для процесса сушки) в виде смеси сухого материала $G_{см}$ и влаги, тогда можно записать соответственно $G_{м1} = G_{см} + G_{вл1}$ и $G_{м2} = G_{см} + G_{вл2}$. Сушильный агент представим в виде смеси сухого воздуха $G_{св}$ и водяных паров. Тогда для сушильного агента можно записать $G_{св1} = G_{св} + G_{вп1}$ и $G_{св2} = G_{св} + G_{вп2}$. В этих равенствах соответственно $G_{см}$, $G_{вл}$, $G_{св}$ и $G_{вп}$ — массы сухого материала, влаги, сухого воздуха и водяных паров.

Из приведенных равенств можно записать уравнение материального баланса (9.6)

$$G_{см} + G_{вл1} + G_{св} + G_{вп1} = G_{см} + G_{вл2} + G_{св} + G_{вп2}. \quad (9.7)$$

Сократив одноименные члены, получим

$$G_{вл1} + G_{вп1} = G_{вл2} + G_{вп2}. \quad (9.8)$$

Но $G_{вл1} - G_{вл2} = \Delta G_{вл}$ — количество удаляемой влаги за 1 ч в сушилке, которое можно представить в виде

$$\Delta G_{вл} = G_{м1} - G_{м2}. \quad (9.9)$$

Количество влаги, поступающей с материалом в сушилку, и количество остаточной влаги в материале после сушки может быть представлено в виде абсолютной влажности поступающего материала $G_{см}W_1/100$ и абсолютной влажности выгружаемого материала $G_{см}W_2/100$. Тогда в сушилке можно представить количество испаряемой влаги

$$\begin{aligned} \Delta G_{вл} &= [(G_{см}W_1)/100] - [(G_{см}W_2)/100] = \\ &= [G_{см}(W_1 - W_2)/100], \end{aligned} \quad (9.10)$$

где W_1 и W_2 — соответственно влажность материала до сушки и после нее.

Можно также представить количество влаги, ассимилированное сушильным агентом: $\Delta G_{вп} = G_{св2} - G_{св1}$, или $\Delta G_{вп} = G_{вп2} - G_{вп1}$. Количество водяных паров, равное количеству влаги, испаряемой из материала $\Delta G_{вл} = G_{м1} - G_{м2}$, уносится из сушилки отработанным сушильным агентом.

Обозначим влагосодержание сушильного агента соответственно при входе в сушилку через d_1 и при выходе из нее через d_2 , г/кг сухого воздуха. Чтобы испарить 1000 г влаги в сушилке, надо затратить неизвестное количество (l_0 кг) сушильного агента, при этом его влаго-

содержание изменится от d_1 до d_2 , г/кг сухого воздуха. Указанное можно записать

$$l_0 = 1000/(d_2 - d_1). \quad (9.11)$$

Следовательно, l_0 — удельный (на 1 кг испаряемой влаги) расход сушильного агента. Часовой расход сушильного агента G_{ca} можно представить в виде

$$G_{ca} = \Delta G_{вл} l_0. \quad (9.12)$$

9.4.2. Расчет теплового баланса

Определим удельный (на 1 кг испаряемой влаги), часовой и годовой расходы теплоты на сушку. Известно, что сушильный агент должен быть нагрет до температуры, которая выше, чем температура материала. Только при этом условии он может ассимилировать влагу из материала. Представим в общем виде нагрев l_0 кг (удельный расход) сушильного агента от энтальпии J_1 до энтальпии J_2 и обозначим этот (тоже удельный) расход q_0 . Тогда получим

$$q_0 = l_0(J_2 - J_1). \quad (9.13)$$

По этим данным составим тепловой баланс сушилки на 1 кг испаряемой влаги. В сушилку поступает сушильный агент в количестве l_0 с энтальпией J_2 , нагретый до температуры цеха материал, содержащий влагу, транспорт, на котором размещен этот материал. Из сушилки удаляется отработанный сушильный агент с энтальпией J_3 в количестве l_0 и материал с остаточной влагой на транспорте. Они имеют уже другую температуру. Кроме того, сушилка обменивается теплотой с окружающей средой (потери теплоты в окружающую среду) и, вместе с тем, в сушилку все время дополнительно подводится тепловая энергия.

Обозначим количество тепловой энергии, поступающей в сушилку: с сушильным агентом $l_0 J_2$, с влагой материала $q_{вл}$, с дополнительной подводимой теплотой q_d , с материалом $q_{м1}$, с транспортом $q_{т1}$. Расходуемое количество тепловой энергии: с отработанным сушильным агентом $l_0 J_3$, с выходящим материалом $q_{м2}$, с транспортом $q_{т2}$, в окружающую среду q_{oc} . Если считать, что значения q для всех приходных и расходных статей вычислены на 1 кг испаряемой влаги, то уравнение теплового баланса на это количество влаги можно записать

$$l_0 J_2 + q_{вл} + q_d + q_{м1} + q_{т1} = l_0 J_3 + q_{м2} + q_{т2} + q_{oc}. \quad (9.14)$$

Здесь $q_{m2}-q_{m1}=q_m$ — теплота, израсходованная на нагрев материала; $q_{\tau 2}-q_{\tau 1}=q_\tau$ — теплота, израсходованная на нагрев транспорта. Тогда уравнение теплового баланса на 1 кг испаряемой влаги можно записать в окончательном виде

$$l_0 J_2 + q_{вл} + q_d = l_0 J_3 + q_m + q_\tau + q_{ов}. \quad (9.15)$$

Решать аналитически уравнение теплового баланса трудно, а потому прибегают к графическому решению, используя Jd -диаграмму.

9.4.3. Теоретический процесс сушки в Jd -диаграмме

Рассмотрим схему процесса сушки (рис. 9.12, а). Материал, начальная масса которого G_{m1} и влагосодержание U_1 , поступает в сушилку 3, проходит по ней и высушивается. Конечная масса выгружаемого материала — G_{m2} , при этом его влагосодержание снижается до U_2 .

Вентилятор 1 забирает из атмосферы воздух с параметрами T_1 , d_1 , ϕ_1 , J_1 . На Jd -диаграмме найдем точку А, соответствующую этим параметрам (рис. 9.12, б). Протянув линию ϕ_1 за относительную влажность наружного воздуха, спустимся по линии ϕ_1 (линии постоянной относительной влажности) до пересечения с изотермой T_1 (температурой наружного воздуха). Наружный воздух вентилятором 1 подается в тепловой генератор.

В качестве теплового генератора принят генератор, используемый для подготовки теплоносителя — нагретого воздуха (см. рис. 7.1). В таком генераторе наружный воздух подогревается от температуры T_1 до температуры T_2 , на что затрачивается количество теплоты Q_τ . Воздух проходит через межтрубное пространство нагревателя, но с рабочим телом не смешивается, поэтому влагосодержание его не изменяется; $d_1=d_2$.

Пусть из теплового генератора нагретый воздух (далее будем называть его сушильным агентом) выходит с параметрами T_2 ; $d_1=d_2$ (точка B_0 на Jd -диаграмме). Чтобы найти эту точку, надо из точки А провести прямую, параллельную линиям постоянного влагосодержания ($d=\text{const}$) до изотермы T_2 (см. рис. 9.12, в).

Сушильный агент, характеризуемый точкой B_0 с энтальпией J_2 , подается в сушилку, где в качестве рабочего тела используется для сушки материала. Сушильный

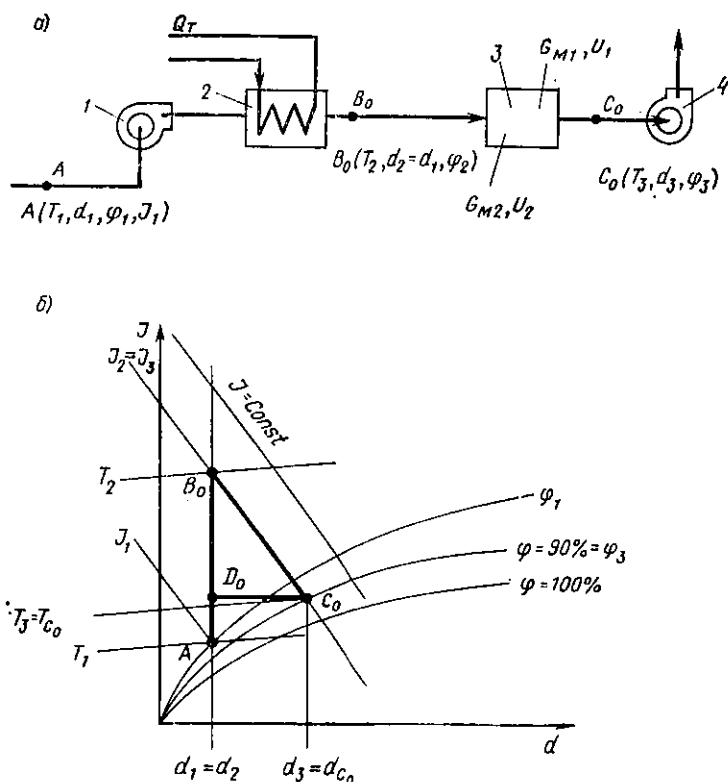
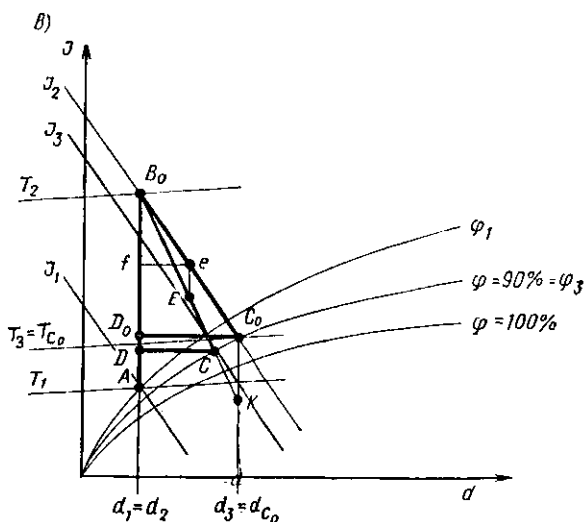


Рис. 9.12. Схема построения и расчета процесса сушки в Jd -диаграмме

а — технологическая схема; б — построение теоретического процесса; в — построение действительного процесса

агент, ассимилируя влагу, приобретает большее влагосодержание и с параметрами в точке C_0 удаляется из сушильной установки вентилятором 4 (см. рис. 9.12, а). Чтобы отыскать точку C_0 , строят сначала теоретический процесс сушки.

Под теоретическим процессом сушки понимают идеальный (воображаемый) процесс, в котором отсутствуют все потери тепловой энергии. В этом случае тепловая энергия расходуется только на испарение влаги, но влага в виде водяных паров с энергией, затраченной на



ее испарение, возвращается в сушильный агент. Для такого теоретического процесса сушки может быть записано уравнение теплового баланса (9.15)

$$I_0 J_2 = I_0 J_3. \quad (9.16)$$

Следовательно, работа сушильного агента будет идти из точки B_0 по изотермальной линии, т. е. $J_3 = J_2$. Проведем эту линию из точки B_0 (см. рис. 9.12, б). Если полностью израсходовать энергию сушильного агента, то процесс сушки закончится в точке пересечения изотермальной с $\varphi = 100\%$ (содержание водяных паров при данной температуре и давлении максимально).

Дальнейшая, даже незначительная, задержка сушильного агента в установке приведет к его охлаждению. Процесс при этом продолжается по линии $\varphi = 100\%$ в сторону уменьшения влагосодержания с конденсацией влаги на поверхности материала. Поэтому процесс сушки ведут до φ порядка 85—90%. Например, закончим теоретический процесс сушки при $\varphi_3 = 90\%$. Тогда точка C_0 лежит на линии изотермальной, проведенной из точки B_0 при пересечении ее с $\varphi = 90\% = \varphi_3$, отметим эту точку на диаграмме. Параметрами, характеризующими точку C_0 , будут $T_3 = T_{C_0}$ (проведем данную изотерму из точки

C_0); $d_3 = d_{C_0}$ (проведем перпендикуляр из точки C_0 на ось d); энтальпия $J_{C_0} = J_{B_0}$ или $J_3 = J_2$.

Jd -диаграмма, как указывалось, рассчитана на 1 кг работающего сухого воздуха (сушильного агента). Следовательно, для построенного процесса легко определить по уравнению (9.11) удельный расход сушильного агента l_0 . Для этого в уравнение (9.11) необходимо подставить истинное влагосодержание для d_2 и d_1 на реальной Jd -диаграмме (см. рис. 9.12, в).

Еще проще определить l_0 графически. Для этого из точки C_0 проводят линию, параллельную оси d до пересечения ее с линией AB_0 . Точку пересечения нанесем на схему и обозначим буквой D_0 . Нетрудно увидеть, что полученный отрезок C_0D_0 графически равен отрезку $d_3 - d_1$ (см. рис. 9.12, б). Тогда уравнение (9.11) можно переписать в следующем виде:

$$l_0 = 1000 / (d_3 - d_1) = 1000 / C_0 D_0 M_d, \quad (9.17)$$

где M_d — масштаб по d , обычно указываемый на Jd -диаграмме.

Таким образом, разность влагосодержаний $(d_3 - d_1)$, выраженная в г/кг сухого воздуха, численно равна отрезку C_0D_0 (в мм), помноженному на масштаб M_d Jd -диаграммы. Уравнение (9.17) предназначено для определения удельного расхода сушильного агента l_0 в теоретическом процессе на испарение 1 кг влаги.

Согласно уравнению (9.13), для нагрева сушильного агента в количестве l_0 до точки B_0 затрачено теплоты $q_0 = l_0(J_2 - J_1)$. Подставим в это уравнение графическую длину отрезков из Jd -диаграммы. В данном случае на рис. 9.12, в будет $J_2 - J_1 = AB_0 M_t$.

$$q_0 = (1000 / C_0 D_0 M_d) AB_0 M_t. \quad (9.18)$$

Указанную формулу для определения удельного расхода теплоты в теоретическом процессе можно переписать и в другом виде

$$q_0 = (AB_0 / C_0 D_0) (1000 M_t / M_d). \quad (9.19)$$

Величину $1000 M_t / M_d$ называют масштабным фактором Jd -диаграммы и обозначают буквой m , тогда

$$q_0 = (AB_0 / C_0 D_0) m. \quad (9.20)$$

9.4.4. Действительный процесс сушки в I_d -диаграмме

В действительном процессе сушки, как показывает уравнение теплового баланса (9.15), J_2 не равно J_3 . Это уравнение для реального процесса можно переписать в другом виде

$$I_0 J_3 = I_0 J_2 + (q_d + q_{вл} - q_m - q_t - q_{oc}), \quad (9.21)$$

т. е. энтальпия отработанного сушильного агента J_3 будет отличаться от энтальпии сушильного агента, поступающего в сушилку J_2 , на величину: $\Delta = (q_d + q_{вл} - q_m - q_t - q_{oc})$, где q_d — дополнительно вводимая теплота в установку; $q_{вл}$ — теплота, поступившая с 1 кг влаги материала; q_m , q_t , q_{oc} — соответственно потери теплоты на нагрев материала, на транспорт и в окружающую среду, вычисленные из расчета на 1 кг влаги, испаряемой в сушилке. Следовательно, действительный процесс сушки является не изоэнтальпийным, а политропным процессом, и ассимиляция сушильным агентом влаги (процесс B_0C_0 ; см. рис 9.12, в) должна идти по политропе.

В условиях реальной сушки возможны три варианта: 1) $\Delta = 0$, в этом случае $(q_d + q_{вл}) = (q_m + q_t + q_{oc})$, отсюда $J_3 = J_2$, и политропа процесса пройдет по линии изоэнтальпии; 2) $\Delta > 0$, тогда $(q_d + q_{вл}) > (q_m + q_t + q_{oc})$, отсюда $J_3 > J_2$, и политропа процесса пойдет выше линии изоэнтальпии; 3) наиболее распространенный вариант: $\Delta < 0$, при этом $(q_d + q_{вл}) < (q_m + q_t + q_{oc})$; $J_3 < J_2$, и политропа процесса пройдет ниже линии изоэнтальпии.

Отсюда уравнение (9.21) для общего случая может иметь вид

$$J_3 = J_2 + (\Delta/I_0). \quad (9.22)$$

Необходимо помнить, что Δ может быть равна нулю, больше или меньше нуля.

Для построения действительного процесса сушки в I_d -диаграмме построим на рис. 9.12, в сначала теоретический процесс по тем же данным, что и на рис. 9.12, б. Обозначим его теми же буквами — $AB_0C_0D_0$. Далее установим величину отрезка, откладываемого от точки C_0 , на который политропа процесса пройдет ниже или выше изоэнтальпийной линии теоретического процесса. Обозначим этот отрезок C_0K , или в масштабе диаграммы C_0KM_i . Очевидно, он должен быть численно равен разности $J_3 - J_2$. Отсюда можно записать

$$C_0KM_i = J_3 - J_2 = \Delta/I_0. \quad (9.23)$$

Подставив значение l_0 из (9.17), получим $C_0K = \Delta / [(1000M_i / C_0 D_0 M_d)]$. Заменим $1000M_i / M_d = m$, получим

$$C_0K = \Delta C_0 D_0 / m. \quad (9.24)$$

Далее по теплотехническим формулам определим дополнительную теплоту, поступившую в сушилку из расчета на 1 кг влаги, а также потерянную теплоту на нагревание материала, его транспортирование и в окружающую среду.

В большинстве случаев в сушилку дополнительная теплота не вводится, а потери на $q_m + q_T + q_{oc}$ преобладают над потерями на $q_{пл}$. Для такого случая и построим отрезок C_0K (см. рис. 9.12, в). Отложим вертикально вниз от точки C_0 вычисленный отрезок в миллиметрах и из точки B_0 через точку K проведем политрону действительного процесса. На пересечении политропы с линией $\phi = 90\%$ по аналогии с нахождением точки C_0 найдем точку C . Соединив точку C , параллельную оси d , линией с AB_0 , на их пересечении получим точку D .

Отрезок CD в масштабе Id -диаграммы показывает то действительное количество влаги (в г), которое может ассимилировать 1 кг работающего сушильного агента с данными параметрами в конкретной сушилке. Тогда по аналогии с формулой (9.17) для процесса сушки (потери q_{oc} и q_T взяты для конкретной сушилки) можно записать удельный расход сушильного агента

$$l_d = 1000 / CDM_d. \quad (9.25)$$

Для приготовления 1 кг сушильного агента в действительном процессе потребовалось нагреть воздух от точки A до точки B_0 (см. рис. 9.12, в). Согласно формуле $q_0 = l_0 (J_2 - J_1)$, напишем

$$q_d = l (J_2 - J_1) = (1000 / CDM_d) (AB_0 M_l), \quad (9.26)$$

или по аналогии с (9.20) эту формулу можно записать

$$q_d = (AB_0 / CD) m. \quad (9.27)$$

Для построения действительного процесса обязательно находить точку C_0 . Можно найти точку B_0 и определить направление линии изохлальной, затем взять на ней любую точку, например точку e , и провести из нее линию, параллельную оси d до пересечения с AB_0 . Точку пересечения обозначим f . Тогда по формуле легко

найти отрезок eE , характеризующий отклонение политропы от изоэнтальпийной линии в точке e

$$eE = \Delta ef / m. \quad (9.28)$$

Для доказательства сравним два подобных треугольника: $B_0C_0D_0$ с B_0ef и B_0C_0K с B_0eE . Из подобия можно записать

$$eE/ef = C_0K/C_0D_0. \quad (9.29)$$

Так как отношения отрезков равны, то равны и углы наклона политропы, проведенной из точки B_0 через точку K и из точки B_0 , проведенной через точку E .

На основании проведенных расчетов можно строить действительный процесс сушки. Для этого находят точку B_0 , берут любую точку, например e на изоэнтальпийной линии, проходящей через B_0 , соединяют точку e линией, параллельной оси d , с прямой AB_0 , получают точку f и по формуле $eE = \Delta ef / m$ находят направление политропы. На политропе находят точку C и далее определяют удельный расход сушильного агента e_d и удельный расход теплоты на приготовление сушильного агента q_d .

9.4.5. Процесс сушки с частичным использованием отработанного сушильного агента

Процесс сушки с частичным использованием отработанного сушильного агента (с рециркуляцией) затрагивался при изложении туннельных сушилок. В настоящее время этот процесс позволяет упростить применение систем автоматического регулирования. Кроме того, использование рециркуляции при сушке изделий способствует улучшению их качества.

Технологическая схема процесса сушки с рециркуляцией показана на рис. 9.13, а. Наружный воздух с параметрами T_0 и ϕ_0 (параметры d_0 и J_0 находим на Id -диаграмме) забирается из атмосферы вентилятором 1 и подается в смесительную камеру 2, куда одновременно подается рециркулят (отработанный сушильный агент). Смесь наружного воздуха с рециркулятом поступает в тепловой генератор 3, где нагревается до температуры T_2 без увеличения влагосодержания ($d_2 = d_1$). После нагревания сушильный агент подается в сушильную установку 4, где ассимилирует влагу от материала, затем с параметрами T_3 , d_3 , ϕ_3 , J_3 вентилятором 5 выбрасывается

Такой процесс в виде фигуры $AB_0C_0D_0$ на рис. 9.13, б дан пунктиром. Процесс сушки заканчивается (точка C_0) при $\varphi=90\%$.

Составляем тепловой баланс; определяем точку K , принадлежащую политропе действительного процесса (отрезок C_0K), и из точки B_0 через точку K проводим эту политропу, что и сделано на рис. 9.13, б. На политропе при ее пересечении с $\varphi=90\%$ находим точку C действительного процесса сушки с параметрами $T_3, d_3, \varphi_3=90\%, J_3$. Затем можно смешать воздух (см. точку A и параметры T_0, d_0, φ_0, J_0) с отработанным теплоносителем (см. точку C и параметры T_3, d_3, φ_3, J_3) в смесительной камере. Графически это смешивание на Id -диаграмме покажем прямой AC .

Для определения кратности смешивания воздуха с рециркулятом исходим из необходимой температуры сушки T_2 . Для этого на пересечении политропы действительного процесса и изотермы T_2 возьмем точку L , до которой по технологическим соображениям необходимо подогревать смесь, чтобы получить заданный сушильный агент. Из точки L до пересечения с линией смеси AC проведем перпендикуляр к оси d (точка N), получим необходимую кратность смешивания воздуха с рециркулятом, равную отношению отрезков AN/NC . Причем, по правилу рычага отрезок NC определяет необходимое количество воздуха, а AN — количество рециркулята. Если принять отрезок AN за единицу и измерить его, то сколько раз отрезок AN уложится в отрезке NC (например, 2,5 раза), во столько раз рециркулята надо взять больше, чем воздуха, для получения необходимых параметров смеси.

Для определения удельных расходов сушильного агента и теплоты необходимо определить длину отрезков, характеризующих ассимилируемое количество влаги при процессе с рециркуляцией и без нее. Для этого из точки C проведем линию, параллельную оси d , до пересечения с линией NL ; найдем точку M и продлим линию до пересечения ее с AB_0 ; найдем точку D .

Удельные расходы сушильного агента и теплоты по ранее приведенным формулам составят

$$l_d = 1000/CDM_d \text{ и } q_d = (AB_0/CD)m. \quad (9.30)$$

Рассмотрим процесс с рециркуляцией. Воздух, забираемый вентилятором I , и рециркулят смешиваются в

смесительной камере 2 (рис. 9.13, а). Процесс смешивания идет по линии AN (рис. 9.13, б). Точка N характеризует параметры смеси, которые определяются по Id -диаграмме. Смесь, характеризуемая точкой N (а не воздух), подогревается в тепловом генераторе до температуры T_2 (см. точку L и параметры T_2, d_2, φ_2, J_2) и поступает в сушилку. Здесь сушильный агент также ассимилирует влагу от материала, насыщаясь до $\varphi=90\%$ (см. точку C) и выбрасывается в атмосферу вентилятором 5. Часть его в качестве циркулянта возвращается и смешивается с воздухом. Используя формулы (9.25) и (9.27) для процесса с рециркуляцией, можно определить удельные расходы сушильного агента и теплоты

$$l_{др} = 1000/CM\alpha; q_{др} = (NL/CM)m. \quad (9.31)$$

Далее сравним удельные расходы сушильного агента и теплоты (см. формулы 9.30 и 9.31) для процессов с рециркуляцией и без нее.

1. $l_{др} > l_d$, так как $CM < CD$. Следовательно, при рециркуляции сушильного агента на испарение 1 кг влаги надо подавать в сушильную установку больше.

2. $q_{др} = q_d$, так как $AB_0/CD = NL/CM$ (треугольник AB_0C подобен треугольнику NLC), а CD и CM — их высоты. Поэтому расход теплоты в процессах с рециркуляцией и без нее одинаков. Однако начальная температура $T < T_{в0}$, а начальное влагосодержание d_0 меньше d_1 , следовательно, режим сушки изделий при рециркуляции будет способствовать улучшению их качества.

Здесь приведены основы графоаналитического расчета удельных расходов сушильного агента и теплоты. Зная количество влаги, испаряемое в сушилке за единицу времени, можно рассчитать процесс сушки, т. е. необходимые расходы тепловой энергии и сушильного агента за 1 ч, одну смену, 1 сут и за год.

Аэродинамический расчет сушильной установки, его составление и расчетная схема аэродинамических сопротивлений приведены в гл. 5 (см. 5.3.2 и 5.4). По данным аэродинамического расчета выбирают вентиляционные установки.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

1. Какой процесс называют процессом сушки?
2. В чем суть критического влагосодержания?
3. Из каких величин складывается суммарный поток влаги внутри материала и от чего он зависит?

4. Что подразумевается под входными и выходными параметрами процесса сушки? Расскажите о принципах их выбора.

5. Для каких целей составляют структурную блок-схему сушильного процесса?

6. Как составить математическую модель сушильного процесса?

7. Какие сушилки используются для сушки кусковых и сыпучих материалов?

8. Назовите установки, применяемые для сушки сформованных изделий?

9. Как определяется удельный расход теплоты и теплоносителя по I_d -диаграмме?

10. В чем состоит преимущество использования рециркуляции при сушке?

РАЗДЕЛ 7. ОБЖИГ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

ГЛАВА 10. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССОВ ОБЖИГА

Обжиг — высокотемпературная тепловая обработка материалов и изделий, при которой в результате необратимых физико-химических процессов изменяются физико-технические свойства полученной продукции.

Обжигу в технологии строительных изделий подвергают глины для получения изделий строительной керамики и искусственных пористых заполнителей бетона, известковые породы с целью получения извести, гипсовый камень для получения различных видов строительного гипса. Обжиг сопровождается эндотермическими и экзотермическими реакциями, связанными с дегидратацией, фазовыми превращениями, появлением жидкой фазы и т. д.

10.1. Особенность физико-химических процессов обжига

Физико-химические процессы обжига керамических изделий. Керамический сырец является капиллярно-пористым коллоидным телом. Он может сорбировать влагу из окружающей среды — набухать, а также отдавать влагу в процессе сушки — усаживаться.

При нагревании сырец теряет физико-механически и физико-химически связанную влагу и высушивается. Удаление химически связанной влаги происходит в широком интервале температур (670—1170 К). Потеря глинистыми минералами химически связанной влаги (де-

гидратация) приводит к утрате пластичности массы. Она теряет связующую способность, и из нее невозможно сформовать изделие.

Нагревание глины в интервале 1200—1300 К ведет к кристаллизации аморфного кремнезема и образованию муллита ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), нагревание в интервале 1370—1470 К увеличивает количество муллита в материале.

При нагревании кремнеземных примесей свободный кремнезем (не входящий в состав глинообразующих минералов) претерпевает ряд обратимых модификационных превращений. Так, например, α -кварц при 846 К может переходить в β -кварц, при 1143 К — в α -тридимит, при 1743 К — в α -кристобалит. Все модификационные превращения кварца сопровождаются изменением плотностей, ведущих к изменению его объема. В свою очередь, объемные изменения, возникающие при обжиге, сказываются в значительной мере на напряженном состоянии изделий.

Рассмотренные модификационные превращения кварца не являются единственными при обжиге, они сопровождаются другими проходящими в материале процессами. Например, при дегидратации каолинита, проходящей в интервале 770—870 К, он теряет две молекулы воды, которые превращаются в пар. Пар внутри изделия образует избыточное давление.

В том же интервале температур начинается окисление органических примесей, которых в глинах содержится до 4—6 %. Известно, что все твердые тела, а керамические в особенности, являются катализаторами процесса горения. Поэтому выделившиеся водяные пары при дегидратации принимают участие в процессе окисления органических примесей.

Продукты окисления органических примесей за счет избыточного давления внутри материала начинают диффундировать из материала в окружающую среду. Их место в освобождающемся поровом пространстве занимает диффундирующий воздух или теплоноситель. Одновременно с дегидратацией каолинит может разлагаться с выделением аморфных глинозема и кремнезема.

Начиная с 1070 К аморфный кремнезем вступает в реакцию в плавнями (оксидами магния, кальция, калия, железа), образуя жидкую фазу — силикатные стекловидные расплавы, количество которых с повышением температуры возрастает.

Плавление отдельных компонентов массы приводит к сближению частиц твердой фазы за счет сил поверхностного натяжения жидкой фазы; кроме того, с ней реагируют частицы глинистых минералов и несвязанного кварца, образуя новые кристаллические фазы более устойчивых компонентов. Этот процесс и называют *спеканием глиняной массы* при обжиге.

При температурах выше 1270 К в процессе перекристаллизации элементарные частицы кристаллической решетки, становясь более подвижными, обмениваются за счет внутренней диффузии местами с частицами других кристаллов, приобретая равновесное состояние. Такое состояние принято называть течением химических реакций в твердой фазе.

На процесс спекания особое влияние оказывает состав газовой среды, в которой происходит обжиг. Газовую среду по составу делят на окислительную, сильно окислительную, восстановительную и нейтральную. Окислительной средой считают такую, в которой избыточного кислорода содержится 2—5 %, сильно окислительной — соответственно 8—10 %, восстановительной — не более 1 %. Нейтральную среду получают при сжигании топлива с избытком воздуха на горение α , не превышающем 1,02.

При обжиге легкоплавких глин, из которых производится строительная керамика, состав газовой среды играет исключительную роль. Легкоплавкие глины содержат до 8—10 % железистых окислов. В восстановительной среде при 1070 К происходит переход железистых примесей в легкоплавкие силикаты железа с выделением газообразных продуктов. Если эти газообразные продукты не смогут продиффундировать к поверхности до появления достаточного количества жидкой фазы для связывания изделия, то изделие вспучивается, и на нем появляются сквозные трещины.

Процесс газообразования резко усиливается, когда в высокожелезистых глинах присутствуют карбонатные включения. Карбонаты медленно разлагаются в широком интервале температур (870—1170 К) с выделением CO_2 . Сложение газовых составляющих резко усиливает эффект вспучивания и трещинообразования. Поэтому изделия из такого сырья необходимо выдерживать в интервале 900—1100 К, медленно доводя до температуры спекания.

Физико-химические процессы обжига известковых и карбонатных пород. Обжигу подвергают известняки, мел, доломитизированные известняки, доломиты и другие карбонатные породы. В состав известняков входит углекислый кальций — CaCO_3 и небольшое количество примесей, таких, как глина, кварцевый песок и др. Обжиг таких пород — основная технологическая операция в производстве извести. Цель обжига — получение высококачественной извести путем термического разложения CaCO_3 и $\text{MgCO}_3 \cdot \text{CaCO}_3$ на CaO , MgO и CO_2 .

Разложение известковых пород за счет высокотемпературной обработки (1370—1470 К) начинается с поверхности. Постепенно реакция разложения (декарбонизации) углубляется и захватывает новые слои кусков породы. Скорость декарбонизации известковых пород при 1370—1470 К по практическим данным составляет 10—15 мм/ч. Температура обжига во многом зависит от состава исходного сырья. Наличие в сырье MgCO_3 заставляет снижать температуру обжига до 1170—1270 К, ибо при более высокой температуре получается оксид магния, который почти не обладает вяжущими свойствами.

При углублении реакции декарбонизации внутрь кусков известняка выделяемый оксид углерода продвигается к поверхности, с которой происходит массоотдача, вызывая трещины и нарушая структуру материала.

Для полученного продукта, сразу подвергаемого после обжига гашению либо предварительному размолу, а потом гашению, наличие трещин не является показателем, снижающим качество материала. Поэтому скорость нагрева материала и его выдержка при максимальной температуре определяется условием этого нагрева и длительностью декарбонизации, определяемой размерами кусков известняка.

Физико-химические процессы обжига гипса. Гипсовый камень подвергают обжигу с целью получения строительного гипса. Обжигают гипсовый камень в варочных котлах, в шахтных и вращающихся печах, а также при совмещении операций помола и сушки в пневматических установках.

При обжиге гипсового камня, представляющего собой двуводный гипс $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, получают полуводный гипс $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$. Реакция идет в интервале 370—430 К с выделением полутора молекул воды. Для полу-

чения ангидритового вяжущего гипсовый камень обжигают при 870—970 К. При обжиге гипсового камня для получения ангидритового цемента сырье должно содержать 98,5 % $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, не более 0,05 % оксида железа и 0,5 % карбоната.

Рассмотренные представления о материалах, подвергаемых обжигу, позволяют сделать вывод об уязвимости к высокотемпературной обработке (обжигу) только штучных изделий, ибо наличие трещин или нарушение структуры не определяет качества известня и строительного гипса.

10.2. Схемы и принципы работы промышленных печей

Промышленная печь представляет собой рабочую камеру, в которой материалу в результате высокотемпературного воздействия придаются заданные свойства. Для обжига материал необходимо нагреть, затем обжечь (т. е. придать необходимые свойства за счет прохождения химических реакций при заданных высоких температурах), после обжига охладить, чтобы закрепить полученные свойства материала.

В общем виде материал в промышленной печи должен проходить три последовательных процесса: нагревание, обжиг, охлаждение. Эти процессы могут осуществляться как в нескольких отдельных агрегатах, так и в одном. Простейшая схема промышленной печи с различным расположением зон показана на рис. 10.1. Рассмотрим работу каждой зоны.

В зону нагревания 1 поступает материал из цеха. Его необходимо нагреть до максимальной температуры, близкой к температуре обжига. Для нагревания целесообразно использовать отработанный теплоноситель из зоны обжига 2. Для постепенного нагревания материала целесообразно теплоноситель из зоны обжига направить противотоком по отношению к движению материала. Теплоноситель, двигаясь по зоне нагревания, нагревает материал, а сам охлаждается. Следовательно, его объем по пути движения, согласно закону физики $V_T = V_0(1 + \beta T)$, уменьшается. Нагретый воздух занимает верхнюю часть канала. Покажем на схеме (рис. 10.2) продольный разрез канала зоны нагревания 1, куда поступает материал 2 и противотоком к материалу подается теплоноситель 3 из зоны обжига

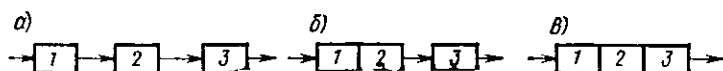
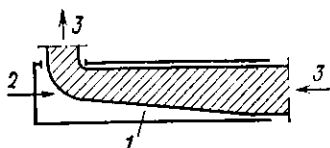


Рис. 10.1. Функциональная схема промышленной печи

а — с отдельными зонами тепловой обработки; б — с вынесенной зоной охлаждения 3 в отдельную установку; в — с сблокированными зонами в одной установке; 1—3 — соответственно зоны: нагрева, обжига, охлаждения

Рис. 10.2. Схема работы зоны охлаждения (изменяющийся объем теплоносителя заштрихован)



Предположим, объем поступившего теплоносителя 3 достаточен для заполнения всего печного канала. По мере продвижения теплоносителя к месту подачи материала его объем уменьшается (этот объем заштрихован). Теплоноситель 3, отдав часть теплоты материалу, удаляется из зоны в направлении, показанном стрелкой. Из рис. 10.2 видно, что в незаштрихованной зоне материал не нагревается, что является конструктивным недостатком печи, который необходимо устранить с помощью технических решений.

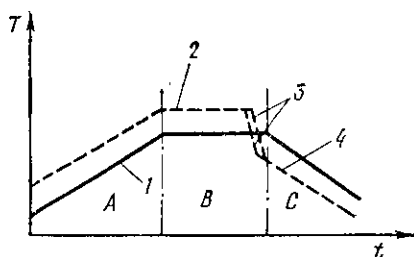
Зона обжига представляет собой основную часть тепловой установки. Она может снабжаться тепловыми генераторами для подготовки теплоносителя. Применительно к промышленным печам эти установки чаще традиционно называют выносными топками.

Топливо может сжигаться непосредственно в канале зоны или даже запрессовываться внутрь материала и сжигаться за счет диффузии кислорода к запрессованному источнику теплоты. Длительность нахождения материала в зоне обжига или время передвижения его по зоне обжига должно определяться временем, необходимым для прохождения химических реакций. Как правило, процесс сжигания топлива непосредственно в печи позволяет получать в зоне обжига достаточно равномерное температурное поле по всему сечению канала.

Зона охлаждения во многом определяет качество готовой продукции, особенно штучных изделий. В нее поступает изделие с температурой обжига, здесь оно должно быть охлаждено, затем выгружено с температурой

Рис. 10.3. Схема изменения температур материала и теплоносителя по зонам (А—С) промышленной печи

1 — кривая изменения температур материала; 2 — кривая изменения температур продуктов горения; 3 — процесс окисления топлива воздухом; 4 — кривая температур охлаждающего воздуха



не выше 310—320 К. Охлаждение производится подаваемым противотоком холодным воздухом.

При конструировании промышленных печей очень редко прибегают к разделению всех трех зон (см. рис. 10.1, а). Чаще зону охлаждения отделяют от печи (см. рис. 10.1, б). По такому принципу работают вращающиеся печи для обжига искусственных заполнителей бетона, цементного клинкера и др. При конструировании печей все три зоны могут быть сблокированы в одну установку, например в печах для обжига керамических и теплоизоляционных изделий (см. рис. 10.1, в).

Рассмотрим кривую изменения температуры материала при его обжиге в такой печи (рис. 10.3, линия 1). В зоне нагревания А материал готовится к обжигу. Из него испаряется остаточная влага; начинаются модификационные превращения. Физико-химические процессы для трех типов материалов рассмотрены в параграфе 10.1.

В зоне обжига В заканчиваются химические реакции, окончательно формируется структура материала. В зоне С материал охлаждается. Рассмотрим кривую работающего теплоносителя с зоны охлаждения. В зону охлаждения подается наружный воздух, он отбирает теплоту от нагретого материала и сам нагревается. Если его подать в качестве вторичного на горение топлива в зону В, то, вступая в реакцию, он окислит топливо, и температура продуктов горения станет выше (показана пунктирной линией 2). Переход воздуха в продукты горения показан двойной пунктирной линией 3. Далее продукты горения охлаждаются, отдают теплоту материалу.

Такую кривую изменения температур в обжиговой печи называют *кривой обжига* и строят для каждого материала. Причем скорость нагревания dT/dt для раз-

личных участков обрабатываемого материала зависит от условий тепло- и массообмена и вызываемого ими напряженного состояния материала.

Режим обжига промышленной печи необходимо поддерживать с достаточной точностью. Например, печь для обжига строительной керамики имеет длину 80—100 м. Соблюдать режим обжига такой печи можно только с помощью системы дистанционного контроля параметров режима обжига и систем автоматического регулирования. Даже оператор, управляя системами автоматического регулирования вручную, не всегда может точно поддерживать заданный режим обжига. Поэтому на данном этапе управление системами автоматического регулирования передают ЭВМ. В этом случае на инженерно-технический персонал ложится самая трудная часть работы — составление программ и алгоритмов. Однако ни одна ЭВМ вместе с системой автоматического регулирования не сможет обеспечить работу промышленной печи, если она неправильно запроектирована с точки зрения движения материала и теплоносителя.

Для организации воздушно-газовых потоков конструируют аэродинамическую систему, а для подачи воздуха и отбора отработанного теплоносителя устанавливают вентиляторы.

Аэродинамические схемы работы промышленных печей. Тепло- и массообмен в промышленных печах определяется движением теплоносителя, его скоростью, полнотой заполнения канала, подсосываемым и выбиваемым воздухом. Поэтому организации движения воздуха и продуктов горения в промышленных печах уделяется очень большое внимание.

Рассмотрим аэродинамическую схему действующей туннельной печи конструкции Росстромпроекта (рис. 10.4,а).

Материал 1 через определенные интервалы на вагонетке поступает в печь и нагревается за счет продуктов горения, движущихся из зоны обжига В в зону подогрева А. Для ликвидации расслоения температур в зоне нагревания (см. рис. 10.2) в нее подается нагретый воздух 3, отбираемый из зоны охлаждения С. С целью охлаждения материала в зону охлаждения С подается наружный воздух 6. Работающий воздух 5 в зоне охлаждения частично отбирается, а частично (в необходимом количестве для вторичного воздуха 4 на горение), проходит в зону обжига материала В. В зону обжига по-

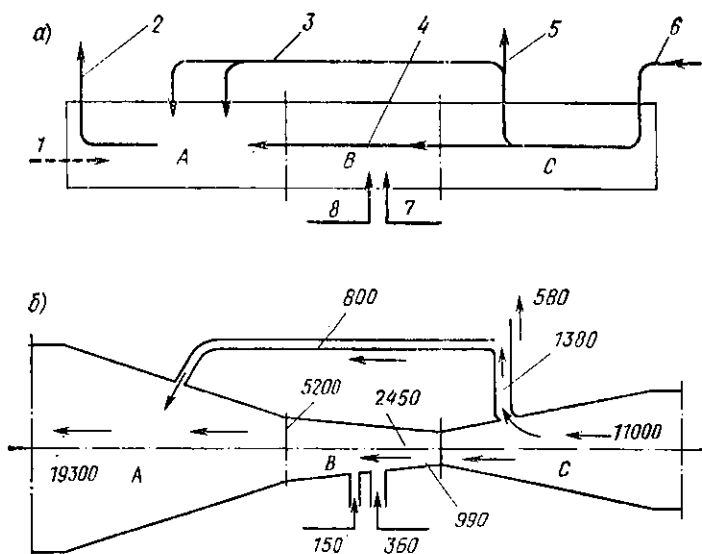


Рис. 10.4. Аэродинамическая схема туннельной печи

а — схема работы печи; б — аэродинамический баланс печи; А—С — соответственно зоны: нагрева, обжига, охлаждения

дается природный газ 8 и первичный воздух 7 на горение. Образующиеся продукты горения проходят в зону подогрева, куда дополнительно поступает нагретый воздух 3. Отработанный теплоноситель 2 удаляется из печи.

На рис. 10.4, б в качестве примера показан аэродинамический баланс печи Бескудниковского керамического комбината.

Вентилятором в зону охлаждения подается $11\,000 \text{ nm}^3/\text{ч}$ наружного воздуха; отбирается из зоны охлаждения $1380 \text{ nm}^3/\text{ч}$ вторичного воздуха; приходит в зону обжига на горение $990 \text{ nm}^3/\text{ч}$; подается на горение газа $150 \text{ nm}^3/\text{ч}$, первичного воздуха $360 \text{ nm}^3/\text{ч}$. Работает в конце зоны обжига $2450 \text{ nm}^3/\text{ч}$, в начале зоны обжига $5200 \text{ nm}^3/\text{ч}$. Подается в зону нагрева $800 \text{ nm}^3/\text{ч}$ горячего воздуха. Удаляется из печи отсасывающим вентилятором $19\,300 \text{ nm}^3/\text{ч}$.

Подвергнем анализу приведенный аэродинамический баланс. Например, в зону охлаждения подается $11\,000 \text{ nm}^3/\text{ч}$ воздуха, а уходит из нее $990 + 1380 = 2370 \text{ nm}^3/\text{ч}$. Остальной воздух ($11\,000 - 2370 = 8630 \text{ nm}^3/\text{ч}$) выбивает (зона работает на избыточном давлении) через неплотности стен, стыков вагонеток, дверей и т. д. в окружающую среду. В зоне обжига работает $2450 \text{ nm}^3/\text{ч}$ продуктов горения топлива, в зону подогрева поступает $800 \text{ nm}^3/\text{ч}$ нагрет-

¹ Здесь nm^3 обозначает объем воздуха или газа, приведенного к температуре 293 K (20°C) и давлению $0,1 \text{ КПа}$ (1 атм).

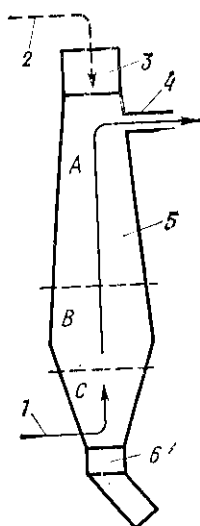


Рис. 10.5. Аэродинамическая схема работы шахтной печи

А, В, С — соответственно зоны: нагрева, обжига, охлаждения; 1 — подача воздуха; 2 — подача шихты, известняка и твердого топлива; 3 — загрузочное устройство; 4 — отбор отходящих газов; 5 — шахта печи в металлическом кожухе; 6 — выгрузочное устройство

того воздуха, а отсасывается от печи $19\,300 \text{ м}^3/\text{ч}$ отходящих газов. Остальное $[19\,300 - (2450 + 800) = 16\,050 \text{ м}^3/\text{ч}]$ подсасывается через неплотности зон обжига и подогрева.

Таким образом, выбиваемый и подсасываемый воздух требует увеличения расхода энергии на вентиляционное хозяйство печи, нарушает проектируемые режимы тепловой обработки и создает неравномерное распределение температур по сечению печного канала. Приведенный пример показывает, что важно не только запроектировать аэродинамическую систему, но и создать условия для ее выполнения.

Рассмотрим аэродинамическую схему работы шахтной печи для обжига извести (рис. 10.5). Материал и топливо непрерывно загружаются в печь через шлюзовое загрузочное устройство. Шахта полностью заполнена шихтой; непрерывная выгрузка материала производится через шлюзовое устройство. Аэродинамическая схема печи обеспечивает движение воздуха снизу вверх. В нижнюю часть зоны охлаждения подается наружный воздух 1 и под действием созданного в печи отрицательного давления передвигается вверх и нагревается.

К выгрузочному устройству 6 предъявляется жесткое требование быть герметичным. Для просасывания воздуха через слой шихты высотой 10—15 м приходится создавать полную герметичность стен, заключая кирпичную кладку в сварной стальной кожух. В противном

случае за счет подсасываемого воздуха (а при высоком отрицательном давлении любая кладка стены не является препятствием подсосам) нельзя осуществлять работу печи.

Воздух из зоны охлаждения поступает в зону обжига, окисляет топливо и в виде продуктов горения отсасывается через трубопровод 4. К загрузочному устройству печи 3 также предъявляется требование герметичности. Если такой герметичности не создать, через трубопровод 4 будет отбираться воздух, подсасываемый через загрузочное устройство, а не отработанный теплоноситель. Отсюда следует, что аэродинамическая система шахтной печи определяет требования к ее конструированию.

10.3. Тепло- и массообмен при обжиге

Принцип тепло- и массообмена при обжиге одинаков, например для гипса, известняка, керамических изделий. Далее рассматриваются эти процессы на примере керамических изделий.

10.3.1. Внешний тепло- и массообмен при обжиге

Внешний тепло- и массообмен при обжиге целесообразно анализировать по периодам.

Внешний теплообмен.

Первый период начинается с загрузки материала в печь и продолжается до достижения им температуры 470—570 К. Первый период тепловой обработки материала называют *периодом досушки*. Из материала удаляется физико-химически связанная влага. Испарение влаги происходит с поверхности материала. Взаимодействие теплоносителя с материалом в этот период с некоторым приближением (излучение очень незначительно) можно описать уравнением конвективного теплообмена

$$q_k = \alpha_k (T_T - T_{пм}), \quad (10.1)$$

где q_k — удельный поток теплоты, полученный материалом за счет конвективного теплообмена; α_k — коэффициент теплоотдачи конвекцией от газов к материалу; T_T и $T_{пм}$ — соответственно температура теплоносителя и температура получающей теплоту поверхности материала.

При омывании газами поверхности материала по направлению движения газового потока образуется пограничный слой как бы «прилипшего» к поверхности материала. Толщина пограничного слоя зависит от характера движения газового потока — при ламинарном движении он толще, чем при турбулентном. Количество теплоты, переданной конвекцией, зависит от толщины пограничного слоя — чем он меньше, тем больше конвективный перенос.

Второй период начинается с температур 470—570 К и продолжается до начала обжига. По мере увеличения температуры нагрева материала возрастает теплообмен излучением $q_{\text{л}}$.

Количество теплоты, передаваемой излучением от теплоносителя к материалу, можно записать в следующем виде:

$$q_{\text{л}} = \varepsilon_{\text{пр}} C_0 [(T_{\text{г}}/100)^4 - (T_{\text{пм}}/100)^4], \quad (10.2)$$

где $\varepsilon_{\text{пр}} = (\varepsilon_{\text{г}} \varepsilon_{\text{пм}}) / [\varepsilon_{\text{пм}} + \varepsilon_{\text{г}} (1 - \varepsilon_{\text{г}})]$ — приведенная степень черноты поверхности материала; $\varepsilon_{\text{пм}}$ и $\varepsilon_{\text{г}}$ — соответственно степень черноты поверхности материала и теплоносителя; C_0 — коэффициент излучения абсолютно черного тела; $T_{\text{г}}$ и $T_{\text{пм}}$ — соответственно температура теплоносителя и поверхности материала.

Полный поток теплоты $q_{\text{п}}$, который будет получать материал при возрастающей степени его нагревания за счет конвекции и излучения, составит

$$q_{\text{п}} = q_{\text{к}} + q_{\text{л}} = \alpha_{\text{к}} (T_{\text{г}} - T_{\text{пм}}) + \varepsilon_{\text{пр}} C_0 [(T_{\text{г}}/100)^4 - (T_{\text{пм}}/100)^4]. \quad (10.3)$$

Формулу внешнего теплообмена (10.3) можно записать иначе

$$q_{\text{п}} = (\alpha_{\text{к}} + \alpha_{\text{п}}) (T_{\text{г}} - T_{\text{пм}}). \quad (10.4)$$

Третий период осуществляется в зоне обжига. Приведенная формула (10.4) расчета внешнего теплообмена справедлива для всей зоны нагревания и может быть использована для расчета теплообмена между теплоносителем и материалом в зоне обжига, если теплоноситель готовится в выносном тепловом генераторе. Однако в большинстве промышленных печей с целью экономии тепловой энергии процесс горения топлива происходит в зоне обжига. В этом случае топливо горит непосредственно в пространстве, окружающем материал. Пространство, где организуется процесс горения, принято называть *пламенным пространством*.

Расчет внешнего теплообмена в пламенном пространстве чрезвычайно сложен. Степень черноты (см. рис. 5.2) и температура факела пламени, а также температура обрабатываемого материала неравномерны. Факел горения не имеет правильной геометрической формы. Кроме того, в теплообмене участвуют слои газов, находящихся между факелом горения и материалом. Поэтому расчет внешнего теплообмена в пламенном пространстве печей ведут с упрощениями, причем, некоторые физические параметры процесса приходится использовать по экспериментальным данным с учетом их усреднения.

Методика расчета теплообмена в пламенном пространстве заключается в определении уравнения теплового баланса всех составляющих, участвующих в теплообмене излучением. Так как конвективная составляющая по сравнению с лучистой энергией, получаемой материалом, невелика, то она опускается из расчета (ошибка при этом составляет не более 1 %).

Количество теплоты, полученной материалом в пламенном пространстве печи с указанными приближениями и без учета потерь в окружающую среду, составит

$$q_{\text{л}} = C_{\text{г}} \epsilon_{\text{пм}} \frac{\psi_{\text{к}} (1 - \epsilon_{\text{г}}) + 1}{\psi_{\text{к}} (1 - \epsilon_{\text{г}}) [\epsilon_{\text{пм}} + \epsilon_{\text{г}} (1 - \epsilon_{\text{пм}})] + \epsilon_{\text{г}}} (T_{\text{г}}^4 - T_{\text{пм}}^4), \quad (10.5.)$$

где $C_{\text{г}}$ — коэффициент излучения факела горения; $\epsilon_{\text{пм}}$ и $\epsilon_{\text{г}}$ — соответственно степень черноты поверхности материала и факела; $\psi_{\text{к}}$ — доля полного количества теплоты, излучаемая стенами пламенного пространства, приходящаяся на единицу поверхности обжигаемого материала; $T_{\text{г}}$ и $T_{\text{пм}}$ — соответственно температура факела и температура поверхности материала.

Более сложные расчеты внешнего теплообмена в пламенном пространстве печи выполнены для конкретных случаев и здесь не приводятся.

Четвертый период — период охлаждения материала за счет движущегося противотоком по отношению к этому материалу холодного воздуха. Охлаждение начинается от температуры обжига и продолжается до температур порядка 320—330 К. За счет излучения и конвективного теплообмена материал отдает теплоту воздуху. Этот теплообмен описывается формулой (10.4). Снижение температуры материала постепенно ведет к снижению теплообмена излучением. При 570—470 К основной вид теплообмена материала с воздухом — конвективный, определяемый формулой (10.1).

Внешний массообмен.

Первый период — период нагрева до 470—570 К; массообмен ничем от рассмотренного для сушильных процессов не отличается (см. гл. 4).

Второй период продолжается от 570 К до достижения температуры обжига, т. е. занимает весь период подогрева материала. В это время начинаются все модификационные превращения, выделяется влага за счет дегидратации, идет окисление органических примесей. Количество газообразных продуктов, диффундирующих через поверхность изделий, определяется массовым количеством веществ, вовлеченных в реакции дегидратации и окисления, разностью концентраций этих веществ в центре и на поверхности изделия и сопротивлением процессу диффузии слоя материала, через который эти продукты диффундируют. Учитывая, что этот процесс внешний, и диффузия происходит в теплоноситель, ее скорость будет определяться также концентрацией водяных паров и оксида углерода на поверхности материала и в теплоносителе.

Обозначим для внешнего массообмена диффундирующей газообразной фазы с единицы поверхности dU за единицу времени dt , тогда dU/dt — удельный поток массы, поступающий в теплоноситель. Этот поток также будет определять и уменьшение массы материала в единицу времени. Запишем для этого потока в общем виде

$$q_m = \beta_{m1}(C_{1\text{пм}} - C_{1\tau}) + \beta_{m2}(C_{2\text{пм}} - C_{2\tau}), \quad (10.6)$$

где $q_m = dU/dt$ — общий поток массы, диффундирующий с поверхности материала; первый член правой части: $\beta_{m1}(C_{1\text{пм}} - C_{1\tau})$ — частный поток массы водяных паров; второй член $\beta_{m2}(C_{2\text{пм}} - C_{2\tau})$ — частный поток массы продуктов горения от органических включений; остальные обозначения: β_{m1} и β_{m2} — соответственно коэффициенты массоотдачи, характеризующие перенос водяных паров и продуктов горения за счет диффузии и конвекции; $C_{1\text{пм}}$ и $C_{2\text{пм}}$ — соответственно концентрация водяных паров и продуктов горения на поверхности раздела фаз; $C_{1\tau}$ и $C_{2\tau}$ — соответственно концентрация водяных паров и продуктов горения в потоке теплоносителя.

Процессы дегидратации, а также горения органических включений идут сначала по возрастающей, а после достижения материалом температур 1150—1250 К прекращаются. Давление газообразных продуктов в материале падает, и освобождающиеся поры и капилляры постепенно заполняются теплоносителем.

В этот период может происходить еще один процесс, на котором следует остановиться. В материале может

быть запрессовано топливо в виде выгорающих добавок — древесных опилок, а иногда порошка дробленого твердого топлива. Температура горения таких опилок близка к температуре горения органических включений, следовательно, количество продуктов горения при этой температуре внутри материала возрастает. Сжигание частиц твердого топлива удлиняет с точки зрения интервалов температур процесс внутреннего горения, который может идти до температур обжига (1270—1370 К). Следовательно, внешняя массопередача, описываемая формулой (10.6), будет идти до этих же температур.

Третий период — период спекания. Он проходит непосредственно в зоне обжига, где поддерживается постоянная температура. В зависимости от термических свойств смеси температура этого периода колеблется от 1150 до 1600 К. В этот период появляются стекловидные расплавы; сначала их появляется немного, по мере повышения температуры их количество увеличивается.

Процесс спекания сопровождается огневой усадкой изделий. Размеры пор и капилляров уменьшаются, что приводит к диффузии газообразной фазы к поверхности изделия, с которой они и удаляются. В зоне обжига огневая усадка закапчивается, заканчивается и процесс массообмена материала с теплоносителем.

Четвертый период — охлаждение материала. В этом случае постепенно температурное расширение снимается, поры и капилляры уменьшаются и опять часть газообразной фазы диффундирует через поверхность в охлаждающий воздух.

Процессы массообмена в зоне охлаждения (как и при огневой усадке) с количественной точки зрения незначительны, поэтому рассматривать их более детально не следует.

Таким образом, первый период массопереноса определяется формулой: $q_m = \beta_m (p'_{\text{пм}} - p'_{\text{т}})$, а второй и последующие периоды — формулой: $q_m = \beta_m (C_{1\text{пм}} - C_{1\text{т}}) + + \beta_{m2} (C_{2\text{пм}} - C_{2\text{т}})$.

Учитывая, что масса материала в процессе обжига обменивается с массой теплоносителя (материал отдает часть массы), для определения внешнего теплообмена формулы можно переписать. Для первого периода напишем балансовое уравнение теплоты, расходуемой на нагревание. Материал получает теплоту в количестве:

$q_k = \alpha_k (T_T - T_{пм})$; теплота расходуется на испарение влаги с поверхности $r \rho_0 R_V dU/dt$ и на нагревание поверхности изделия $c \rho_0 R_V dT/dt$, следовательно, уравнение теплового баланса равно

$$\alpha_k (T_T - T_{пм}) = r \rho_0 R_V dU/dt + c \rho_0 R_V dT/dt, \quad (10.7)$$

где r — теплота парообразования; ρ_0 — плотность материала; R_V — отношение объема материала к поверхности, с которой происходит испарение; dU/dt — уменьшение влагосодержания материала; dT/dt — изменение температуры материала; c — удельная теплоемкость материала.

Составляем балансовое уравнение теплоты для второго и третьего периодов. Материал получает теплоту в количестве: $q_n = q_{вн} + (\alpha_k + \alpha_n) (T_T - T_{пм})$. Теплота расходуется на нагрев материала: $c \rho_0 R_V dT/dt$, на испарение и перегрев водяных паров, образующихся в процессе дегидратации (химически связанная влага): $i_{вп} \rho_0 R_V dU/dt$, а также на нагрев органических включений (теплота, удаляющаяся с продуктами горения топлива): $i_{пг} \rho_0 R_V \times dU_2/dt$. Отсюда определяется уравнение теплового баланса для второго и третьего периодов

$$q_{вн} + (\alpha_k + \alpha_n) (T_T - T_{пм}) = c \rho_0 R_V dT/dt + i_{вп} \rho_0 R_V dU_1/dt + i_{пг} \rho_0 R_V dU_2/dt, \quad (10.8)$$

где значения c , ρ_0 , R_V , dT/dt аналогичны их значениям в формуле (10.7); dU_1/dt — массосодержание водяных паров и dU_2/dt — массосодержание продуктов горения; $q_{вн}$ — теплота продуктов горения органических включений.

По уравнениям (10.7) и (10.8) определен внешний тепло- и массообмен теплоносителя с материалом.

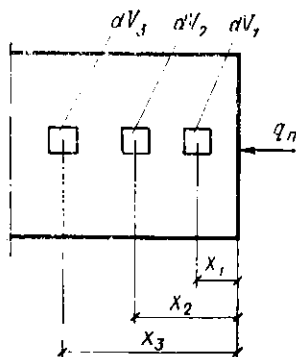
10.3.2. Внутренний тепло- и массообмен при обжиге

Ранее указывалось, что теплота, которую получает поверхность материала при внешнем тепло- и массообмене, распространяется внутрь изделия за счет теплопроводности, масса (водяных паров и продуктов горения органических составляющих) перемещается к поверхности и удаляется в теплоноситель. Суммарное количество теплоты, поступающее в материал, может быть описано уравнением

$$q_T^n = -\lambda \nabla T + i q_m^n, \quad (10.9)$$

где q_T^n — плотность удельного потока теплоты, распространяемого внутрь материала от поверхности; λ — теплопроводность материа-

Рис. 10.6. Схема модели изделия с выделенными в нем элементарными объемами



ла; ∇T — градиент температуры; $iq_{m,n}$ — теплота, перемещающаяся в материале с удельным потоком массы.

При нагревании материала физико-химические процессы идут как с поглощением, так и с выделением теплоты, с новообразованием и структурообразованием.

Для анализа внутреннего тепло- и массообмена возьмем модель изделия, к поверхности которого за счет внешнего тепло- и массообмена подводится полный удельный поток теплоты q_n (рис. 10.6). Выделим в этом изделии элементарный объем dV_1 на расстоянии x_1 от поверхности и проанализируем проходящие в нем единичные процессы.

Элементарный объем dV_1 получает за счет q_n определенное количество теплоты по формуле: $dQ_1 = -\lambda \nabla T dV_1$, где λ — теплопроводность материала; ∇T — градиент температуры. Часть этой теплоты уходит из выделенного объема (рассеивается в окружающий материал), а в основном расходуется на нагревание выделенного объема dV_1 . Расход теплоты на нагревание объема dV_1 можно записать $(c\rho_0 dT/dt) dV_1$, где c — удельная теплоемкость материала; ρ_0 — плотность абсолютно сухого материала; dT/dt — скорость изменения температуры при нагревании объема dV_1 .

По мере нагревания элементарного объема dV_1 до 670—770 К в нем начинают происходить химические реакции. Протекает дегидратация глинистого вещества с выделением химически связанной воды, на что затрачивается определенное количество теплоты.

Обозначим удельную теплоту на выделение химически связанной воды с учетом теплоты, расходуемой на

перегрев водяных паров до температуры, при которой находится выделенный объем, r_x . Тогда расход теплоты на полную дегидратацию вещества в объеме dV_1 можно представить как энтальпию в виде $(r_x q_{mx}/c\rho_0)dV_1$, где q_{mx} — количество химически связанной влаги, выделяемой при дегидратации массы вещества, находящегося в объеме dV_1 ; c — удельная теплоемкость; ρ_0 — плотность материала.

Одновременно начинается и химическая реакция окисления органических включений в объеме dV_1 . В этой реакции принимает участие воздух, находящийся в dV_1 и диффундирующий в этот объем, а также водяной пар, выделяющийся при дегидратации вещества в объеме dV_1 . При этом выделяется тепловая энергия.

Обозначим удельную энтальпию, содержащуюся в продуктах горения, выделяемых при сжигании органических включений в объеме dV_1 , $i_{нг}$, а количество продуктов горения — $q_{мнг}$, тогда энтальпия в объеме dV_1 может быть представлена в следующем виде: $q_{вн} = (iq_{мнг}/c\rho_0)dV_1$.

Выделяющиеся водяные пары и продукты горения органических включений смешиваются (назовем эту смесь парогазовой) и диффундируют через поверхность в теплоноситель, работающий в зоне подогрева печи.

На рис. 10.6 выделим элементарный объем dV_2 , расположенный на расстоянии X_2 от поверхности изделия. Фронт прогрева материала продвигается дальше, и в объеме dV_2 происходят те же процессы, что и в объеме dV_1 . Если в материале присутствуют известковые включения, то в интервале 870—1170 К начнется разложение карбонатов с выделением CO_2 , и резко усилится процесс диффузии газовых составляющих.

Рассмотрим опять выделенный из изделия объем dV_1 . Постепенно в этом объеме температура достигнет 1070—1100 К, закончатся реакции дегидратации и горения органических включений. Из объема dV_1 прекратится выделение парогазовой смеси (предположим, что включения карбонатов отсутствуют).

В объеме dV_1 начинается следующий этап физико-химических процессов. Аморфный кремнезем вступает в реакцию с плавнями. Образовывается жидкая фаза — силикатный стекловидный расплав. На получение этого расплава затрачивается определенное количество теплоты; далее с повышением температуры происходят ре-

акции в твердой фазе, в результате образуется муллит (эти процессы изложены в параграфе 10.1). На реакции в твердой фазе также затрачивается определенное количество теплоты. Теплообмен в твердой фазе происходит с большими скоростями. При этом теплота подводится с постоянной температурой, как и при дегидратации.

Теплота фазового вещества, отнесенная к 1 г, называется *удельной теплотой перехода* и обозначается $r_{\text{ф}}$. Тогда количество теплоты, подводимое к объему dV_1 для перевода в расплав части вещества, вступающего в химическую реакцию с плавнями и на реакции, проходящие в твердых фазах, можно выразить в виде $(r'_{\text{ф}}/c\rho_0)dV_1$, где $r'_{\text{ф}}$ — теплота, затраченная на получение расплава и на реакции в твердых фазах массы вещества, заключенного в объеме dV_1 ; c — теплоемкость материала; ρ_0 — плотность материала.

Следует отметить, что при прохождении химических реакций с плавнями за счет образования легкоплавких железистых оксидов выделяются в незначительном количестве газообразные продукты. Если рассматривать весь материал, например объем dV_2 , а также объем dV_3 , находящийся от поверхности до центра на расстоянии X_3 (см. рис. 10.6), то пока центральные слои не прогреются до максимальной температуры обжига (1070—1100 К), парогазовая смесь из этих объемов будет диффундировать в основном к поверхности.

Появление расплава и течение реакций в твердых фазах происходит при спекании, которое сопровождается усадкой (уменьшением размеров на 1—4 % в зависимости от сырья). Усадка материала приводит к уменьшению пористости, вследствие чего диффузия парогазовой смеси к поверхности и ее удаление через поверхность затрудняются. Поэтому нагревание материала в данный период необходимо замедлять.

В процессе выдержки материала при максимальной температуре обжига выделение парогазовой смеси из центральных слоев полностью заканчивается, температурное поле в выделенных объемах dV_1 , dV_2 , dV_3 и т. д. полностью выравнивается. Далее материал охлаждается. При охлаждении усадки не происходит, однако температурные расширения материала по слоям последовательно уменьшаются. Пористость материала немного уменьшается за счет сужения пор и капилляров. Запол-

няющая их газообразная фаза пропорционально пористости уменьшается.

Для представления о тепло- и массообмене при обжиге проведем его математический анализ.

Известно, что вдоль длины капиллярных трубок (капилляров материала) существует градиент общего давления $dp/dx = \nabla p$. В данном случае перенос массы в виде пара или газа происходит за счет этого градиента. Для определения удельного потока массы в таких условиях применима формула

$$q_m'' = -K_p \nabla p = -a_p C_v P \nabla p, \quad (10.10)$$

где K_p — коэффициент молярного переноса; a_p — коэффициент конвективной диффузии пара или газа; C_v — пароемкость капиллярно-пористого тела; P — пористость тела; ∇p — градиент давления.

Движение пара или газа за счет градиента общего давления всегда сопровождается наличием градиента температур ∇T . [При точных расчетах по формуле (10.10) ∇T учитывается. В нашем расчете такое уточнение не требуется]. Температурный градиент, в свою очередь, вызывает противоположное потоку пара или газа пристеночное (по стенкам капилляров) тепловое скольжение газа, воздуха или теплоносителя, которые воздействуют на материал.

Таким образом, если в обжигаемом изделии под действием градиента давления парогазовая смесь будет (как показано ниже) передвигаться к обогреваемой поверхности изделия, навстречу ей за счет теплового скольжения будет передвигаться поток теплоносителя из окружающей среды. Учитывая незначительную массу потока встречного скольжения, при описании процесса опустим его.

Тогда количество теплоты, движущейся внутрь материала (по уравнению Фурье: $q_{\tau}'' = -\lambda \nabla T$), уменьшится на количество теплоты, движущееся к поверхности с массой q_m'' . Отсюда удельный поток теплоты, распространяемый внутрь материала, с учетом формулы (10.9), может быть записан

$$q_{\tau}'' = -\lambda \nabla T + l (a_p C_v P \nabla p), \quad (10.11)$$

где l — энтальпия потока массы.

Приведенная формула (10.11) справедлива для описания теплового потока внутрь материала в периоды на-

гревания и обжига, т. е. до окончания процесса выделения из материала парогазовой смеси. При охлаждении материала массообмен практически заканчивается. Незначительный поток массы с некоторым сужением капилляров материала в этот период в расчетах не учитывают.

При сжигании топлива, запрессованного внутрь материала, приведенные уравнения тепло- и массопереноса справедливы, однако продуктов сгорания органических примесей (считая в том числе и запрессованное топливо) будет значительно больше.

Для наглядного представления о процессе массопереноса необходимо рассмотреть возникновение градиента общего давления.

Возникновение градиента давления при обжиге. Как уже указывалось, при достижении керамическим материалом температуры 670—770 К из него в поры и капилляры выделяется химически связанная влага. Объем этой влаги при испарении должен был бы увеличиться в 10 раз и более, однако объем пор и капилляров постоянен и заполнен воздухом. Именно в этот объем и выделяется в виде пара химически связанная влага.

Из рассмотренного ранее известно, что $pv = RT$. Следовательно, при увеличении температуры T и при постоянном объеме v в порах и капиллярах возрастает давление p . Отсюда следует, что в материале при нагревании возникает избыточное давление.

Для определения избыточного давления возьмем неограниченную пластину (рис. 10.7) и по ее центру проведем ось ординат, на которой в выбранном условном масштабе отложим температуру T , давление p и сопротивление материала Δp прониканию через него парогазовой смеси (в единицах давления). По оси ординат отложим расстояние от центра до поверхности пластины (пластина моделирует изделие). Проведем на расстоянии X_1 от поверхности пластины линию, параллельную оси X .

Пластина нагревается. Через определенный момент времени температура в пластине распределилась по кривой $T_{пл}$. Предположим, в точке пересечения линии X_1 с кривой $T_{пл}$ температура достигла 700 К. При этом за счет выделения и испарения химически связанной влаги в сечении X_1 образовалось давление p_1 . Отложим возникшее избыточное давление в выбранном масштабе

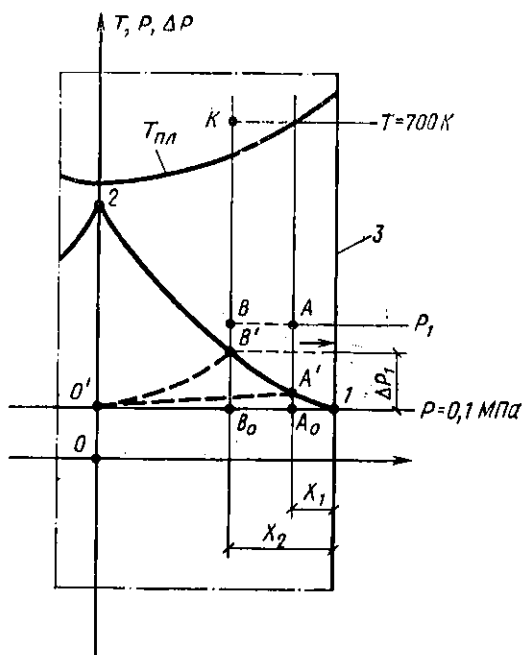


Рис. 10.7. Схема возникновения избыточного давления в материале при обжиге

(точка A в сечении X_1). В это же время давление на поверхности пластины остается равным давлению в печи и составляет $p \approx 0,1$ МПа.

Капиллярная система материала оказывает сопротивление давлению (задерживает паровоздушную смесь внутри материала). Это сопротивление рассчитано по формуле (4.46), т. е. $\Delta p = a v^2$. Рассчитанное сопротивление в том же масштабе (выбранном для избыточного давления) нанесем на половину пластины (кривая 1—2). Другая половина пластины работает аналогично. Следовательно, в сечении X_1 образовалось избыточное давление.

Согласно кривой 1—2, материал в сечении X_1 оказывает сопротивление движению паровоздушной смеси, характеризуемое точкой A' , лежащей на пересечении кривой 1—2 с сечением X_1 . Это сопротивление численно равно ординате $A_0 A'$, умноженной на выбранный мас-

штаб, и оно значительно меньше, чем возникшее избыточное давление A_0A . Поэтому значительная часть паровоздушной смеси будет смещена в сторону наименьшего сопротивления, т. е. в сторону поверхности (показано стрелкой). Избыточное давление действует во все стороны, и его направление в центр пластины из точки A' изображено пунктиром.

Поступившая часть парогазовой смеси внутрь изделия резко увеличила тепловой поток, и температура на сечении X_2 (оно более удалено от поверхности) тоже достигла $T=700$ К. Естественно, что в сечении X_1 температура стала выше 700 К.

Теперь в сечении X_2 проведем линию, параллельную оси пластины. На ней отложим в том же масштабе температуру 700 К (точка K). Здесь также началась реакция дегидратации, и химически связанная влага испаряется в поры и капилляры.

Допустим, испарение влаги в обоих случаях создало одинаковое давление в порах. В объеме пор и капилляров образовалось давление p_1 (точка B). Но в этом сечении материал оказывает гораздо большее сопротивление для выхода парогазовой смеси. Оно равно ординате B_0B' . Отсюда часть парогазовой смеси, равная ординате BB' , будет смещена в сторону поверхности, а избыточное давление в сечении X_2 равно ординате B_0B' (или $B_0B - BB' = \Delta p_1$), и действуя в обе стороны, оно распределится по кривым $O'B'$ и $B'I$. Запишем эпюру этого давления в виде $O'B'-I$.

Нагревание пластины, сопровождаемое передачей теплоты внутрь материала, приведет к распределению избыточного давления по кривой 2—1. При достижении максимальной температуры обжига сначала в поверхностных, а потом и в центральных слоях материала пройдут все химические реакции, которыми сопровождается выделение парогазовой смеси, и избыточное давление начнет снижаться.

Таким образом, возникший в процессе обжига материала градиент давлений ∇p является своеобразной движущей силой процесса массообмена.

10.4. Усадка и деформации в процессе обжига

В результате нагрева и затем охлаждения материала (т. е. перепада температур) он изменяет свои размеры. Для представления о перепадах температур рас-

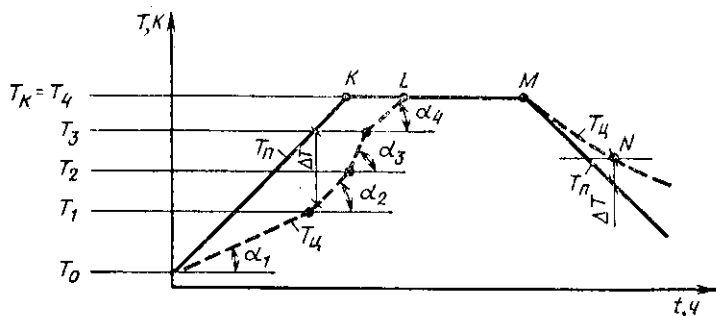


Рис. 10.8. Характер перепада температур между поверхностью T_n и центром T_c материала при его нагревании и охлаждении

смотрим на рис. 10.8 кривую обжига, выражающую зависимость изменения температуры обжигаемого материала от времени тепловой обработки t , т. е.: $T=f(t)$, а также перепад температур $\Delta T = T_n - T_c$ и характер его изменения в процессе обжига.

В целях упрощения анализа примем, что температура поверхности материала T_n при нагревании возрастает по прямой. Из ранее рассмотренного известно, что в первый период нагревания из материала удаляется остаточная влага. Поэтому на ее испарение затрачивается часть поступившей в глубь материала теплоты. Прогрев материала замедляется, что и показано на рис. 10.8 пунктиром.

Угол наклона пунктирной линии α_1 характеризует нарастание температуры в центре материала. По достижении температуры T_1 испарение остаточной влаги закончится. Расхода теплоты на испарение влаги не будет, и температура в центре изделия, определяемая только теплопроводностью, станет возрастать быстрее. Кривая наклона прогрева T_c будет иметь другой угол, α_2 . Так будет продолжаться до достижения центром материала температуры T_2 , составляющей 670—870 К, т. е. когда из материала начнут выделяться химически связанная влага и выгорающие органические включения.

Выделяющиеся пары влаги и продукты горения выносятся через поверхность, а какая-то часть их диффундирует внутрь материала. Скорость прогрева центральных слоев увеличится, и угол наклона, характеризующий прогрев центральных слоев, возрастет (см. α_3).

Выделение парогазовой смеси идет практически до T_3 , составляющей 1070—1100 К. С температуры 1100 К начинается реакция образования жидкой фазы, на которую затрачивается теплота, в том числе и внутри изделия. Скорость прогрева центра изделия начинает замедляться, и угол кривой прогрева центра изделия становится α_4 . При температуре T_4 (максимальная температура обжига — точка К) дальнейший нагрев изделий заканчивается. Подводимый тепловой поток к поверхности только компенсирует теплоту, распространяющуюся внутрь изделия. Центральные слои, прогреваясь медленнее, чем поверхностные, достигают температуры поверхности ($T_{\text{ц}}=T_{\text{п}}$) в точке L, и температура всех слоев выравнивается.

В зоне обжига продолжительностью Δt , равной отрезку KM, спекание заканчивается. Далее материал охлаждают.

Охлаждение, как и нагрев, идет с поверхности. Заданный темп охлаждения поверхности показан прямой $T_{\text{п}}$. Кривая охлаждения центра показана пунктиром. Перепад температур между поверхностью и центром изделия увеличивается.

В этот период основное количество теплоты от изделия к воздуху передается излучением, передача конвекцией по сравнению с лучистым обменом мала. Такой темп охлаждения наблюдается до 770 К. При этих температурах передача теплоты излучением резко снижается; остается конвективный теплообмен.

Начиная с точки N перепад температур между поверхностью и центральными слоями изделия начнет резко увеличиваться. Поэтому, чтобы поддержать снижение $T_{\text{ц}}$ хотя бы на данном уровне, необходимо увеличить циркуляцию воздуха в этой части печи, что и делают в конструкциях печей. Кривая охлаждения с данным интервалом нарастания $\Delta T = T_{\text{п}} - T_{\text{ц}}$ показана на рис. 10.8.

Напряженное состояние в материале в процессе его обжига. Возникающие в процессе обжига материала перепады температур между его поверхностью и центром создают напряженное состояние. Напряженное состояние развивается в материале во всех направлениях и, следовательно, является функцией трех координат. Для пояснения опять возьмем неограниченную пластину толщиной $t \rightarrow 0$. Конечная ширина пластины $2X$. В этом случае взаимодействие пластины с теплоносителем воз-

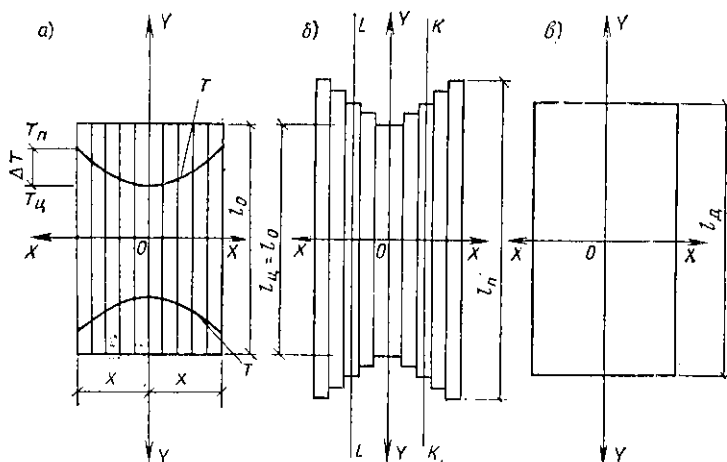


Рис. 10.9. Напряженное состояние в изделии в процессе обжига (перепад температур $\Delta T = T_n - T_u$)

можно только по граням пластины (см. стрелки на рис. 10.9). Из пластины вырежем ее часть с ограниченной длиной l_0 (рис. 10.9, а). Проведем оси координат X и Y . По оси X будем откладывать ширину пластины $2X$, по оси Y — в определенном масштабе кривую распределения температуры T .

Предположим, что пластина набрана из отдельных, не связанных между собой полосок. Для упрощенного анализа принимаем, что изменение размеров тела под влиянием температуры идет по линейному закону $l_T = l_0(1 + \beta T)$. Рассмотрим совместно рис. 10.8 и 10.9.

В начальный период нагрева изделие имеет температуру T_0 . Перепад температур $\Delta T = 0$. Далее начинается перепад температур, и с увеличением времени нагрева t в какой-то точке он равен ΔT (см. рис. 10.9, а).

Если пластина состоит из не связанных одна с другой полосок, то длина каждой полоски станет различной. Длина полоски на поверхности будет l_n . По мере приближения к центру пластины длина каждой последующей полоски будет меньше, а длина центральной пластины будет соответствовать той температуре, которая положена в основу измерения l_0 . В действительности пластина цельная, и ее длина при данном перепаде температур станет l_d (см. рис. 10.9, в).

Из рис. 10.9, *в* видно, что поверхностные слои удлинились меньше, чем должны были, а центральные полосы, наоборот, больше, чем должны были. Поверхностные слои в этом случае испытывают напряжения сжатия, а центральные — растяжения. Причем, изменение знака напряженного состояния проходит через нейтральные слои *L*, *K* (см. рис. 10.9, *б*), удлинение которых соответствует их температуре.

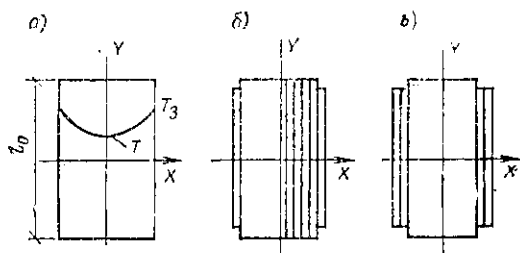
Известно, что ни растягивающие и ни сжимающие напряжения не приводят к нарушению целостности структуры материала. Материал растрескивается или разрушается в том случае, если возникающие от растягивающих и сжимающих напряжений касательные напряжения превышают его предельные величины прочностных характеристик.

В процессе нагревания материала от T_0 (см. рис. 10.8) напряженное состояние в нем возрастает до T_1 , далее оно остается постоянным до T_2 , а после T_2 начинает снижаться до T_3 . Начиная с T_3 до максимальной температуры обжига, напряженное состояние снижается; в точке *L* оно исчезнет. Здесь не показано (с целью упрощения) напряженное состояние, которое также увеличивает длину воображаемых полосок при прохождении их через температурный барьер, равный 846 К. При этом α -кварц претерпевает модификационное превращение в β -кварц, идущее с увеличением объема на величину около 4 %.

Конечные размеры пластины l_d в каждый момент нагрева, а следовательно, и размеры изделий, которые моделирует пластина, можно измерить приборами.

Напряженное состояние в изделии в процессе его спекания. Появление жидкой фазы при температурах 1070—1100 К вызывает, как указывалось, сокращение материала. Возьмем опять такую же пластину длиной l_0 с теми же ограничениями, что и на рис. 10.9, *а*, и покажем ее на рис. 10.10, *а*. На пластине виден перепад температур в момент времени, когда температура ее поверхности T_3 достигла 1070—1100 К. Распределение температурного поля показано на пластине в виде кривой T (см. рис. 10.10, *а*). Условимся, что эта пластина также состоит из несвязанных полосок; тогда за время Δt в крайних полосках происходят химические реакции аморфного кремнезема с плавнями, при этом выделяется жидкая фаза.

Рис. 10.10. Напряженное состояние в изделии в процессе сжатия

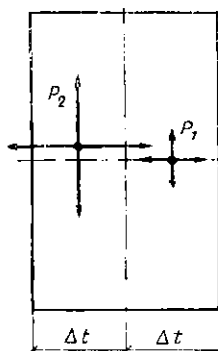


Плавление отдельных компонентов приводит к сближению частиц твердой фазы за счет сил поверхностного натяжения, и крайние полоски уменьшаются в размере (рис. 10.10, б). За время Δt температура поверхности возрастет и температура вторых от края полосок достигнет T_3 . В них также идут химические реакции, и их длина уменьшается. Равномерность усадки отдельных полосок зависит от процентного содержания в них компонентов, вступающих в реакцию. Здесь для упрощения принят их равномерный химический состав.

На рис. 10.10, в покажем пластину с двумя сократившимися по длине полосками, причем их сокращение направлено от поверхности к центру. На границе между сократившейся полоской и остальной (несократившейся) полоской пластины появится напряженное состояние. Сократившаяся полоска, будучи связана с несократившейся, стремится ее уменьшить по длине; несократившаяся также находится в напряженном состоянии. В сечениях материала, следовательно, развивается напряженное состояние, которое по мере прогревания будет продвигаться к центральным слоям.

Напряженное состояние в материале в результате перепада давлений. Для объяснения причин образования напряженного состояния условно вырежем из изделия (пластины) два граничащих слоя толщиной Δt каждый (рис. 10.11). В одном слое образовалось избыточное давление p_1 , в другом p_2 , причем $p_2 > p_1$. Давление по закону Паскаля действует во все стороны с одинаковой силой. Покажем результат действия давления в условном масштабе по слоям пластины. Перепад давлений $\Delta p = p_2 - p_1$ в отличие от температурного перепада не увеличивает длину слоев, а старается сдвинуть один слой относительно другого. Следовательно, из-за

Рис. 10.11. Перепад давлений в двух граничащих слоях пластины толщиной Δt



перепада давлений в материале образуются касательные напряжения. С увеличением перепада давлений они возрастают и при больших перепадах давлений могут разрушить материал.

Выше рассмотрены принципы возникновения напряженного состояния в материале в зоне нагревания и в начале зоны обжига. В дальнейшем по мере выравнивания температур в центре и на поверхности материала, окончания процессов массопереноса напряженное состояние в материале постепенно снимается (релаксируется). Во время релаксации напряжения формируется структура материала, которую необходимо сохранить при охлаждении.

Напряженное состояние в материале при охлаждении. Как указывалось, при охлаждении материала возникает перепад температур между поверхностью и центром материала. В то же время, по мере снижения температуры растут прочностные характеристики большинства материалов. Если материал охлаждать без разрушения даже самой мелкой и слабой межпоровой перегородки, получим максимально возможные прочностные его характеристики. Однако практически такой режим охлаждения невыполним, часть межпоровых перегородок при охлаждении нарушается, поскольку в материале возникает напряженное состояние. И чтобы избежать нежелательных последствий такого состояния на качестве изделия, необходимо знать природу его возникновения.

Для этого возьмем опять неограниченную пластину и вырежем из нее пластину длиной l_0 . Предположим, что

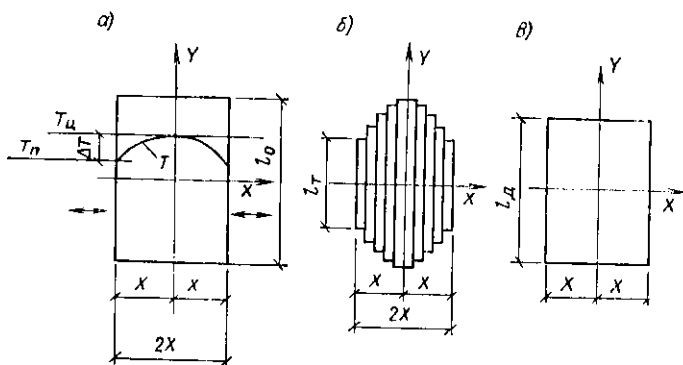


Рис. 10.12. Напряженное состояние в изделии в процессе его охлаждения

такая пластина может взаимодействовать с теплоносителем только по своим боковым граням (рис. 10.12). Проведем оси координат на оси абсцисс и отложим размер $2X$. На ординате отобразим температурное поле в какой-то момент охлаждения, например, когда центр пластины находится в точке N (см. рис. 10.8). Отложим в условном масштабе температуру в центре пластины $T_{\text{ц}}$ и на ее поверхностях $T_{\text{п}}$. Через эти точки проведем кривую T , характеризующую температурное поле в точке N (рис. 10.12, а). При этом перепад температур составляет $\Delta T = T_{\text{ц}} - T_{\text{п}}$.

Вообразим опять, что пластина состоит из не связанных между собой полосок, длины которых можно представить как $l_T = f(T)$. Тогда центральные полоски будут иметь наибольшую длину, а поверхностные наименьшую (рис. 10.12, б). В действительности все полоски связаны одна с другой, и вся пластина сокращается до какой-то средней конечной длины $l_{\text{д}}$. Отсюда поверхностные слои сократились на меньшую длину, чем должны были; причем они стремятся к уменьшению (усадке), а центральные слои сократились больше, но стремятся к расширению. Следовательно, материал, который моделирует пластина, находится в напряженном состоянии. В интервале температур 846—850 К на напряженное состояние оказывает и обратное модификационное превращение β -кварца в α -кварц, проходящее с поверхности, еще более увеличивая усадку пластины.

Здесь рассмотрены теоретические основы усадки и деформации при обжиге таких изделий, как керамических камней, плиток, кирпича, нарушение структуры которых приводит к растрескиванию, короблению и другим видам брака. Для кусковых материалов типа известняка, гипсового камня и т. п. такого анализа не требуется, ибо растрескивание и нарушение их структуры на конечные свойства материала не влияет.

10.5. Система: материал — обжиговая установка

Для анализа взаимодействия обжиговой установки с материалом составим структурную блок-схему. Принцип составления такой блок-схемы рассмотрен ранее. В обжиговой установке в отличие от сушильной проходит много процессов, поэтому структурную блок-схему целесообразно представить в виде совокупности блоков, каждый из которых имитирует какую-то группу процессов. Составление таких структурных моделей является основой для подготовки исследований кибернетическим методом.

На этом этапе целесообразно включить все факторы, предположительно влияющие на качество материала. Далее путем ранжирования факторов оставляют для анализа две или три основные блок-схемы, определяющие качество изделий или оптимальные условия ведения процесса.

Выполнение поставленной задачи будет одним из возможных вариантов построения имитационной модели, которая в этом случае будет представлять некоторую комплексную программу ЭВМ, описывающую поведение компонентов системы и их взаимозависимость. Таким образом, совокупность взаимосвязанных блоков и дальнейшее объединение математических моделей отдельных технологических переделов в единую модель для имитации всей технологии обжига позволяет провести исследование системы: материал — обжиговая установка.

Рассматривая эту сложную систему, необходимо отметить, что каждое воздействие на материал в процессе обжига носит вероятностный характер. Выходные параметры каждого отдельного участка нельзя определить

по набору входных параметров, характеризующих материал, и по управляемому воздействию параметров, характеризующих теплоноситель. Такая ситуация обычна для сложных технологических систем. Эта сложность обусловлена физическими процессами, зависимыми от течения химических реакций.

В свою очередь, химические реакции зависят от сопровождающих их физических процессов. Такая сложная физико-химическая система может быть решена двумя методами: методом системного анализа с детальным изучением взаимосвязанных внешних и внутренних процессов (внутри материала), а также стохастическим моделированием (стохастический от греч. *stochastikós*, в буквальном смысле вероятностный, случайный метод).

При стохастическом моделировании предполагается, что выходные параметры для каждого конкретного процесса связаны случайным образом, но коррелированы (взаимосвязаны) с входными параметрами и управляющими воздействиями. Следовательно, для изучения такой сложной системы, как взаимодействие материала с обжиговой установкой, необходимо составить структурные блок-схемы отдельных участков технологической системы; с учетом теплового моделирования по ним заполнить модельную тепловую установку для проведения необходимых исследований; по полученным данным составить имитационную математическую модель искомой системы.

Таким образом, любую обжиговую установку целесообразно представить в виде структурных блок-схем технологических участков, где идут отдельные процессы. В этом случае (см. рис. 10.1 и 10.3) первым был бы участок удаления физико-химической влаги, вторым — участок модификационных превращений кварца, третьим — участок выделения химически связанной влаги и т. д.

Для упрощения разделим обжиговый агрегат на более крупные участки (зоны) и покажем описанный выше принцип анализа (естественно, точность в этом случае резко снижается). Такими зонами будут: нагревания, обжига и охлаждения.

Построение структурной блок-схемы зон нагревания, обжига и охлаждения начнем с перечня параметров, отражающих свойства материала на отдельных переделах, а также параметров, воздействующих на материал

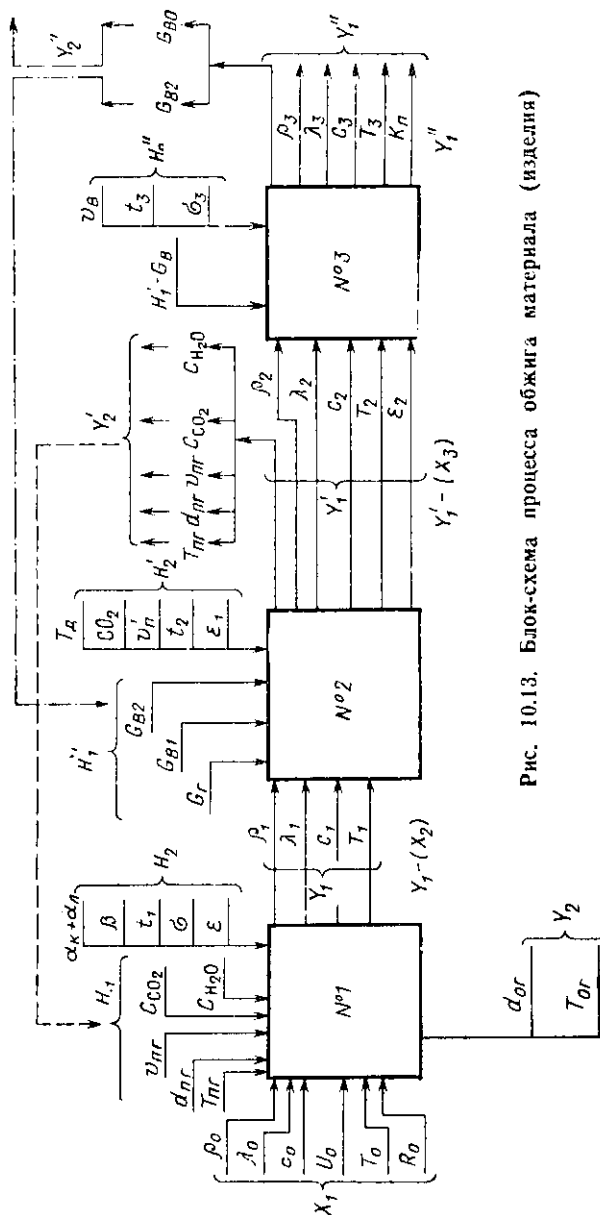


Рис. 10.13. Блок-схема процесса обжига материала (изделия)

по переделам с выяснением выходных параметров для каждой блок-схемы.

Для блока № 1 — зоны нагревания (рис. 10.13) — входными параметрами, характеризующими материал, будут плотность ρ_0 , теплопроводность λ_0 , теплоемкость c_0 , влагосодержание U_0 , температура T_0 и прочностная характеристика R_0 . Все эти параметры — входные, контролируемые, но нерегулируемые. Обозначим их X_1 .

На материал воздействуют отходящие газы, поступающие из зоны обжига, с контролируемыми и регулируемыми параметрами H_1 : температура продуктов горения $T_{\text{пр}}$, их влагосодержание $d_{\text{пр}}$, скорость движения по зоне нагревания $v_{\text{пр}}$, концентрация оксида углерода и паров воды соответственно C_{CO} и $C_{\text{H}_2\text{O}}$.

Воздействие на материал параметров H_1 и их изменение повлечет за собой изменение входных параметров H_2 : коэффициентов теплоотдачи конвективного α_k и лучистого α_l , массоотдачи β , времени нагрева t . Изменение этих параметров повлечет за собой изменение начала и скорости течения всех ранее рассмотренных химических реакций и изменение возникающих напряженного состояния σ и деформаций ϵ .

Воздействия параметров на блок № 1 (зона нагревания) приведут к изменению свойств материала и параметров отработанных газов, которые выходят из этой зоны. К этим параметрам, обозначаемым Y_1 , относим: плотность ρ_1 , теплопроводность λ_1 , теплоемкость c_1 , температуру T_1 . Параметрами выбрасываемых из зоны отработанных газов Y_2 будут: температура $T_{\text{ог}}$, влагосодержание $d_{\text{ог}}$.

Для блока № 2 — зоны обжига — входными контролируемыми, но нерегулируемыми параметрами X_2 , характеризующими материал, будут выходные параметры материала Y_1 из зоны нагревания; обозначим их на рис. 10.13: $Y_1 \rightarrow (X_2)$. Этими параметрами являются ρ_1 , λ_1 , c_1 , T_1 .

Входные контролируемые и регулируемые параметры H'_1 в зоне обжига: массовый расход газа G_r , массовый расход первичного воздуха, подаваемого на горение газа $G_{\text{в1}}$, масса нагретого воздуха $G_{\text{в2}}$, поступающего из зоны охлаждения.

Контролируемые и регулируемые параметры H'_2 , зависящие от расхода газа и воздуха, конструктивных особенностей печи: действительная температура горения

газа T_d , окислительная или восстановительная среда, определяемая концентрацией кислорода в продуктах горения CO_2 , скорость движения продуктов горения по зоне v'_n , их температура t_2 , деформация ϵ_1 .

Выходные параметры Y'_1 для материала из зоны обжига: плотность ρ_2 , теплопроводность λ_2 , теплоемкость c_2 , температура T_2 и деформация ϵ_2 . Выходными параметрами продуктов горения Y'_2 являются входные параметры в зону нагревания, а именно: $T_{нг}$, $d_{нг}$, $v_{нг}$, C_{CO_2} и $C_{\text{H}_2\text{O}}$. Полученные данные представим на блок-схеме № 2.

Для блока № 3 — зоны охлаждения — входными контролируруемыми, но нерегулируемыми параметрами X_3 , характеризующими материал, являются выходные параметры материала Y'_1 из зоны обжига: ρ_2 , λ_2 , c_2 , T_2 , ϵ_2 ; обозначим их на рис. 10.13: $Y'_1 \rightarrow (X_3)$.

Входными контролируемыми и регулируемыми параметрами H'_1 в зоне охлаждения является массовый расход наружного воздуха G_B .

Контролируемыми и регулируемыми параметрами H''_2 , зависящими от массового расхода наружного воздуха, будут: скорость воздуха v_B , время охлаждения изделий t_3 , напряженное состояние изделий σ_3 , а выходными параметрами для материала Y''_1 из зоны охлаждения — плотность ρ_3 , теплопроводность λ_3 , теплоемкость c_3 , температура T_3 и качество готовой продукции K_n .

Показатель качества готовой продукции включает прочностную характеристику R_3 , морозостойкость, трещиностойкость и т. д.

Для блок-схемы № 3 выходными параметрами воздуха в зоне охлаждения Y''_2 являются: масса нагретого воздуха, поступающего в зону обжига G_{B2} и масса нагретого воздуха G_{B0} , отбираемого из зоны охлаждения. Кроме того, соединим пунктирной линией выходные параметры из зоны обжига $Y'_2 (T_{нг}, d_{нг}, v_{нг}, C_{\text{CO}_2} \text{ и } C_{\text{H}_2\text{O}})$, являющиеся входными H_1 для зоны нагревания. Также пунктирной линией соединим выходной параметр из зоны охлаждения $Y''_2 (G_{B2})$, являющийся входным H'_1 для зоны обжига.

Для того чтобы не перегружать блок-схемы отдельными периодами тепловой обработки, не рассматривались параметры взаимодействия зон с окружающей средой. Весь аэродинамический режим печи представлен

только одним результирующим параметром — создаваемой скоростью работающих в печи газов. И, самое главное, применение стохастического моделирования освобождает от необходимости детального изучения сложного процесса физико-химических превращений, на которое понадобились бы многие годы. В этом случае все физико-химические процессы представлены в виде некоторой случайной коррелируемой функции H_1 входных параметров обжиговой установки.

Составление схемы технологического процесса обжига изделий называют структурным моделированием технологии. Оно предназначено для полного анализа тепловой обработки: определения оптимальных условий ведения тепловой обработки с точки зрения технологии и экономики процесса, решения задач по контролю и регулированию хода процесса и управления им с помощью ЭВМ.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

1. Что такое обжиг? При производстве каких материалов его применяют?
2. Расскажите о принципах работы промышленной печи.
3. В чем суть внешнего и внутреннего тепло- и массообмена при разных периодах обжига?
4. Как возникает градиент давления при обжиге?
5. Объясните причины возникновения усадки при обжиге.
6. Постройте структурные блок-схемы различных зон печи.

ГЛАВА 11. ОБЖИГОВЫЕ УСТАНОВКИ

Промышленная печь в технологии строительных материалов и изделий представляет собой установку, в которой в результате воздействия относительно высоких температур на сырье и физико-химических превращений ему придают требуемые свойства. Процесс обжига в промышленных печах является в большинстве случаев конечным при получении строительных материалов и изделий.

Промышленные печи можно классифицировать по различным признакам: по режиму работы — периодического и непрерывного действия; по конструкции рабочей камеры — шахтные, туннельные, кольцевые, вращающиеся и др.; по применяемому источнику теплоты — пламенные и электрические; по технологическому признаку — установки для обжига гипса, извести, искусственных за-

полнителей бетона, сформованных изделий и др. Ниже рассматриваются печи, классифицируемые по последнему признаку.

11.1. Установки для обжига гипса

Простейшей и наиболее распространенной установкой для обжига или, как принято называть, для варки гипса является гипсоварочный котел. В настоящее время гипсоварочные котлы выпускают вместимостью 3 и 15 м³.

Котел (рис. 11.1) представляет собой стальной барабан 4, снабженный стальной крышкой 7. В крышке два отверстия: первое 10 предназначено для загрузки гипсового порошка с помощью шнека-питателя 9, другое 6 — для отвода паров воды, выделяющихся при варке. Котел снабжен четырьмя нагревательными трубами 11 и двумя (верхней и нижней) мешалками 13 с приводным валом 8. Для выгрузки готовой продукции в нижней части установлена течка 15, снабженная открывающимся шибером 14. Топливо (газ) 2 подается в горелку толки, эжектирует воздух 1 на горение. Газ горит в топке 3.

Продукты горения омывают сборное чугунное днище 16, проходят через каналы 12, выполненные в обмуровке, и обогревают стенки котла. Далее продукты горения проходят через нагревательные трубы 11, поступают в дымовую трубу 5 и удаляются в атмосферу.

Для более полного использования теплоты дымовые газы целесообразно не выбрасывать в атмосферу, а направлять в установки для помола гипсового камня. Помол гипсового камня при обогреве отработанным теплоносителем требует меньшей затраты энергии, ибо дробление в этом случае идет не влажного, а подсушенного гипсового камня.

Обжиг гипсового порошка в котле осуществляется следующим образом. Включается топка и прогревается котел до температуры 390—400 К. В нагретый котел, предварительно включив перемешивающее устройство, постепенно загружают гипсовый порошок. Постепенно гипсовый порошок прогревается до температуры варки 410—420 К, при этом очень интенсивно проходит реакция дегидратации. Вся подводимая тепловая энергия расходуется на испарение влаги. Необходимо следить за

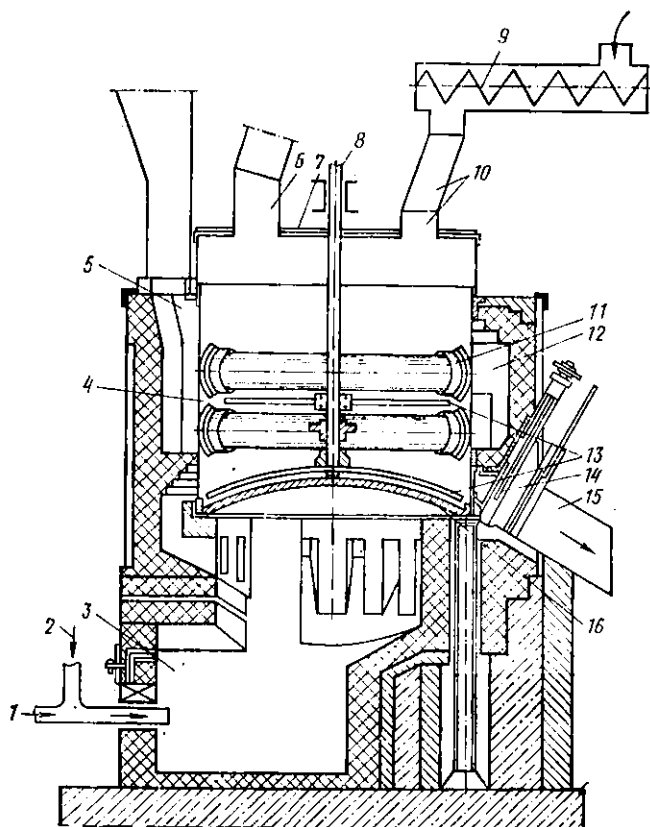


Рис. 11.1. Схема гипсоварочного котла

изменением температуры, так как повышение ее до 450 К приводит к полному обезвоживанию и резкому снижению качества продукции. В случае повышения температуры снижают количество газа, подаваемого на горение.

Продолжительность варки в котлах малой вместимости составляет 1—2 ч, в котлах большой вместимости — 2—3 ч. По окончании варки топка выключается, открывается шибер и готовый материал через течку 15 направляют в бункера для его выдерживания (иногда называемого томлением). Выдерживание в бункерах приводит к усреднению гипса, так как частицы, в которых

реакция прошла не полностью за счет теплоты, содержащейся в нем, переходят в полуводный гипс.

Расход условного топлива на варку гипса составляет 50—60 кг/1т готовой продукции, или 5—6 % массы готовой продукции.

Для обжига гипсового камня применяют также вращающиеся печи непрерывного действия. Так условно называют обычные сушильные барабаны при использовании их для варки гипса. Принцип действия и конструктивные особенности барабанной сушилки показаны на рис. 9.8.

В таких печах (барабанную сушилку для этих целей будем называть вращающейся печью) гипсовый камень обжигают в виде кусков размером 10—40 мм. Тепловой агент готовится в тепловом генераторе, где и разбавляется в смесительной камере до температуры 1070—1200 К и по прямооту подается во вращающуюся печь так, как показано на рис. 9.8. Как и в печи для сушки кусковых материалов, внутри печи установлены лопастные мешалки.

Загрузка печи гипсовым камнем производится на 12—15 % площади поперечного сечения печи. Сырье, передвигаясь по уклону печи, а также в результате ее вращения, постепенно дегидратируется до полуводного гипса. Часто центральные слои кусков не успевают дегидратироваться и поэтому качество обожженного гипса, полученного во вращающихся печах, значительно хуже получаемого в варочных котлах.

Тепло- и массообмен во вращающихся печах происходит через поверхность гипсового камня, соприкасающуюся с теплоносителем, а в варочных котлах тепло- и массообмен порошка происходит за счет кондуктивного нагрева через стенку. Расход условного топлива на обжиг (варку) гипса близок к расходу топлива варочных котлов и составляет также 5—6 % массы готовой продукции. Однако производительность этих печей значительно выше производительности варочных котлов.

Разработана технология обжига гипса в кипящем слое или в пневматической установке. Рассмотрим пневматическую установку для совместного помола и обжига гипса (рис. 11.2). Принцип ее работы заключается в следующем. Гипсовый камень, предварительно раздробленный до фракций 30—50 мм, загружается через герметизированную течку 4 и попадает в шахту мельницы

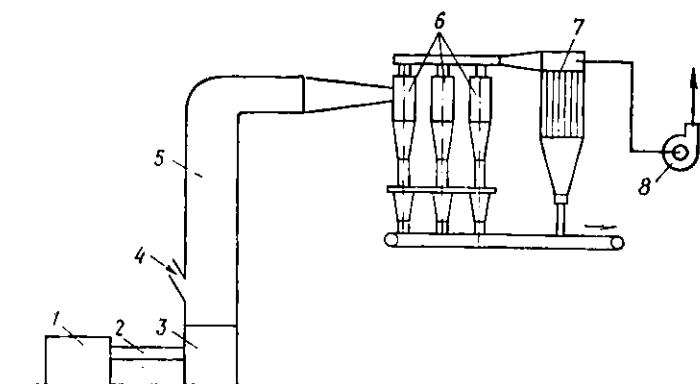


Рис. 11.2. Схема пневматической установки для совместного помола и обжига гипсового порошка

3, где подвергается помолу. В эту же шахту из теплового генератора 1 подается предварительно подготовленный теплоноситель (газ) 2.

Теплоноситель готовится следующим образом: топливо сжигается в топке теплового генератора, затем продукты горения разбавляются паружным воздухом до 1000—1100 К. Поток теплоносителя захватывает размолотые частицы гипсового камня и транспортирует их через трубу 5 к вентилятору 8. На пути движения газы проходят двойную или тройную очистку в циклонах 6, далее вторичную очистку в батарее циклонов 7, затем вентилятором выбрасываются в атмосферу.

Согласно исследованиям, для создания движения материала через трубу 5 необходима скорость несколько большая, чем скорость витания частиц. Тогда скорость движения частиц материала можно определить из формулы

$$v_{\text{ч}} = v_{\text{т}} - v_{\text{в}}, \quad (11.1)$$

где $v_{\text{ч}}$ — скорость движения частиц материала по трубе 5; $v_{\text{т}}$ — необходимая скорость движения теплоносителя; $v_{\text{в}}$ — скорость витания частиц данного диаметра.

Скорость витания частиц $d=1$ мм составляет около 1,5 м/с; частиц $d=2$ мм 3 м/с. Скорость обжига частиц гипса диаметром 3 мм по экспериментальным данным 6—7 с. Если длина трубы 5 установки (см. рис. 11.2) от шахтной мельницы до циклона 6 составляет, напри-

мер, 7 м, то для движения частицы диаметром 3 мм (чтобы полностью прошла реакция обжига) требуется пролететь 7 м за 7 с, т. е. ее скорость должна быть 1 м/с. Скорость вращения такой частицы составляет 3 м/с. Следовательно, по формуле (11.1), можно определить необходимую скорость теплоносителя в трубе 5: $v_t = v_{\text{ч}} + v_{\text{п}}$, или $v_t = 1 + 3 = 4$ м/с.

Если знать диаметр трубы 5, то легко подсчитать количество теплоносителя, расходующегося в установке за 1 ч. Соотношение между массой материала, находящегося в газовом потоке, и массой теплоносителя определяют по практическим данным. Это соотношение характеризует условия, при которых двуводный гипс можно превратить (обжечь) в полуводный за очень короткое время (6—7 с). Такое соотношение называют концентрацией материала в газовой среде и обозначают буквой M , кг/кг. Для гипсового порошка $M = 0,5—0,7$ кг/кг.

Для заданной часовой производительности $G_{\text{ч}}$ расход массы теплоносителя $G_{\text{чт}}$ составит, кг/ч,

$$G_{\text{чт}} = G_{\text{ч}} / M. \quad (11.2)$$

Так как такие установки в промышленности не применяются, то удельный расход условного топлива пока определяют по расчету, и он составляет 4—5 % массы готовой продукции.

Печи для обжига гипса в кипящем слое ничем кроме температуры теплоносителя, не превышающей 1000—1100 К, не отличаются от печей для обжига извести в кипящем слое (последние рассматриваются далее).

11.2. Известеобжигательные печи

Из печей непрерывного действия для обжига извести наибольшее применение нашли шахтные и вращающиеся печи.

11.2.1. Шахтные печи, работающие на твердом топливе

Простейшей шахтной печью является пересыпная известеобжигательная печь. Конструкция этой печи (рис. 11.3, а) выполнена из кирпича. Шахта печи устанавливается на опоре—железобетонной плите, размещенной на железобетонных колоннах. Кладка шахты — многослой-

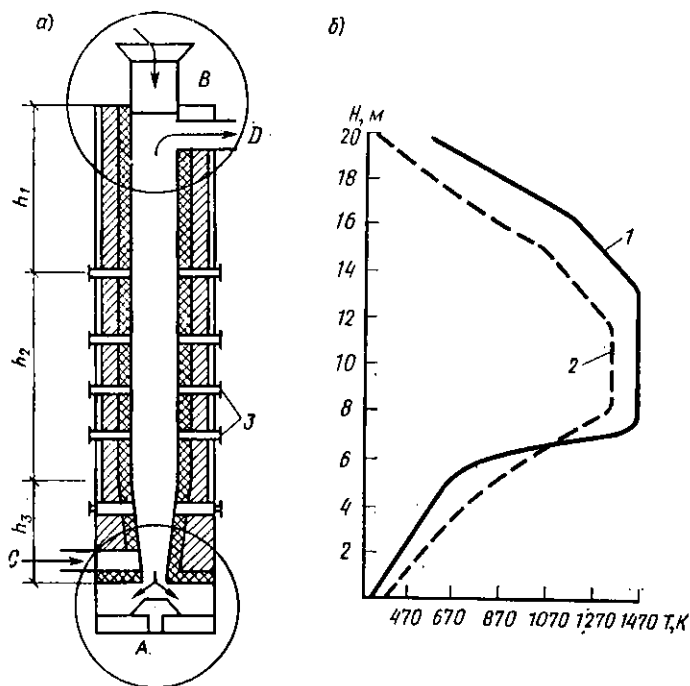


Рис. 11.3. Схема шахтной известьобжигательной печи

a — схема конструкции; *б* — распределение температур в печи; 1 — температура печных газов; 2 — температура материала; 3 — смотровые отверстия; h_1, h_2, h_3 — соответственно зоны: нагрева, обжига, охлаждения; А — выгрузочное устройство; В — загрузочное устройство; С — подача воздуха; D — отбор дымовых газов

ная. Внутренний слой выложен из огнеупора, в качестве облицовочного слоя применен шамотный легковес или красный кирпич.

Между кирпичной кладкой и сварным металлическим кожухом, в который одета конструкция шахты печи, предусмотрена шамотная или трепельная засыпка, компенсирующая температурное расширение. По высоте печи в несколько рядов устроены смотровые отверстия, закрываемые заглушками; они предназначены для размещения контрольно-измерительных приборов и для наблюдения за работой печи.

Печь оборудована герметичными загрузочным и разгрузочным устройствами (рис. 11.4, а, б). После розжига

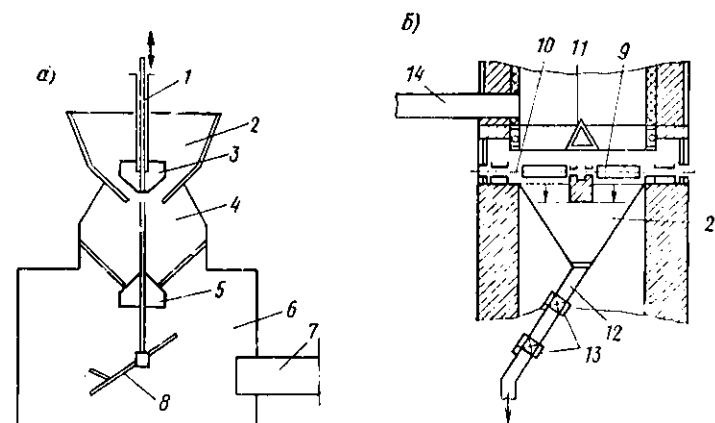


Рис. 11.4. Схемы герметичных загрузочного (а) и выгрузочного (б) устройств шахтной известеобжигательной печи

га (пуска) печи через загрузочное устройство загружается шихта, состоящая из известкового камня и кусков короткопламенного топлива; загрузка шихты осуществляется скиповым подъемником в бункер 2 (см. рис. 11.4, а). Верхний затвор 3 открыт. Нижний затвор 5 поднят вверх, т. е. закрыт. Порция шихты пересыпается в промежуточную емкость 4, после чего верхний затвор 3 закрывается. Открывается (опускается) нижний затвор 5, и шихта из емкости 4 попадает на отбойную плиту 8 и распределяется по печи 6. После подачи порции шихты нижний затвор 5 закрывается штангой 1, и процесс загрузки повторяется.

Для интенсификации работы печи повышают газопроницаемость столба (слоя) шихты. С этой целью в печь загружают фракционированный материал (одинаковые или близкие по размеру куски камня или топлива). В печи отдельно можно обжигать фракции 20—40; 40—60 и 60—80 мм и даже до 200 мм. Фракции меньше 20 мм в шахтной печи обжигать нецелесообразно, ибо сопротивление такого слоя шихты движению теплоносителя резко возрастает, и процесс обжига значительно затрудняется или становится невозможным. Шихта загружается почти на всю высоту шахты, оставляется около 1000 мм свободного пространства перед отбором отработанных газов 7 (в показанной на рис.

11.3, б конструкции печи высотой $H=20$ м рабочая высота слоя шихты около 18 м).

Выгрузка готовой продукции производится через выгрузочное устройство. Конструкций выгрузочных устройств, как и загрузочных, много. На рис. 11.4, б показано выгрузочное устройство валкового типа. Рабочий орган выгрузки — валки 9, перекрывающие с установленным зазором все поперечное сечение шахты. Валки приводятся в движение системой редукторов с помощью вала 10. Несколько выше валков установлена балка-рассекатель 11 для разделения потока обожженного материала на две части. Материал, пройдя через зазоры валков, попадает в бункер 2 и через трубу — течку 12, оборудованную двумя затворами 13, поступает на транспортное устройство и подается на склад извести. Герметичное выгрузочное устройство не дает возможности наружному воздуху, подающемуся в трубу 14, выбиваться в атмосферу.

Подаваемый вентилятором наружный воздух идет по шахте печи вверх, проходит по зоне охлаждения высотой h_3 , отбирает теплоту от обожженной извести и нагревается (см. кривую 1 на рис. 11.3, б). Нагретый воздух попадает в зону обжига и на высоте h_2 вступает в реакцию с предварительно нагретыми в зоне подогрева кусками топлива. В результате горения топлива и воздействия продуктов горения на известковый камень (известняк) он подвергается декарбонизации по реакции $\text{CaCO}_3 \rightleftharpoons \text{CaO} + \text{CO}_2$.

Продукты горения, двигаясь навстречу материалу, попадают в зону нагревания, где готовят материал к обжигу. Движение продуктов горения вверх осуществляется за счет отрицательного давления, создаваемого вентилятором на участке трубопровода, показанного стрелкой D. Такие вентиляторы в инженерной практике принято называть «дымососами».

Общее отрицательное давление в шахтных печах на отборе продуктов горения достигает 10 000 Па, несколько меньше — на подаче воздуха в печь. При таких условиях через 1 м² кирпичной кладки печи просачивается громадное количество фильтрующегося воздуха. По теплотехническим данным при таком отрицательном давлении газопроницаемость 1 м² печной кладки составляет 120 м³ и более воздуха за 1 ч, что полностью исключает возможность работы печи. В связи с этим всю шах-

ту таких печей заключают в цельносварной металлический кожух.

Следует особо остановиться на пересыпном способе применения топлива в печах. Слово «пересыпной» означает, что топливо пересыпают слоями с известковым камнем, и они вместе последовательно опускаются вниз; при этом топливо нагревается. Если в топливе содержатся летучие горючие газы, они выделяются при 870—900 К в зоне нагревания, где еще не идет процесс горения. В этом случае летучие горючие вещества захватываются продуктами горения и вместе с отработанными газами выбрасываются дымососом в атмосферу. Например, при содержании в буром угле 30 % летучих горючих веществ расход топлива на обжиг известняка увеличится на 30 %. Поэтому для обжига извести по пересыпному способу в качестве топлива применяют антрацит, почти не содержащий летучих горючих веществ.

В промышленности работает много пересыпных шахтных печей рабочей высотой 18—24 м и диаметром 2,5—5 м. Отбор дымовых газов из них производится через циклоны. На современных заводах отходящие газы печей используют в различных установках, утилизирующих тепловую энергию. Производительность таких печей, в зависимости от типоразмера, колеблется от 50 до 200 т и выше извести в сутки. Расход условного топлива составляет 150—170 кг/т извести.

Шахтные печи кроме расхода топлива характеризуются плоскостным и объемным напряжением. Под плоскостным напряжением понимают сьем извести с 1 м² площади поперечного сечения шахты в сутки (10—12 т/м²·сут). Под объемным напряжением понимают сьем извести с 1 м³ рабочего объема шахты в сутки (0,6—0,8 т/м³·сут). Готовый продукт — обожженная известь в пересыпных шахтных печах содержит небольшой процент золы топлива.

В настоящее время строят шахтные печи, для которых топливом является природный газ, иногда мазут.

11.2.2. Шахтные печи, работающие на природном газе

Природный газ — самый дешевый и доступный вид топлива, а потому шахтные печи, работающие на газовом топливе, получили широкое распространение. Так

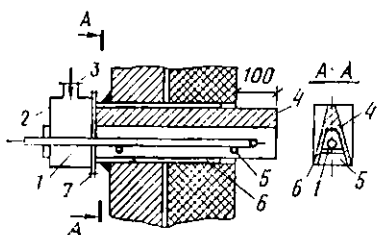


Рис. 11.5. Схема фурменной горелки для сжигания природного газа в шахтной печи

как для сжигания газа начали приспособливать существующие пересыпные шахтные печи, то их конструкции, естественно, ничем не отличаются от конструкции печей, работающих на природном газе. Дополнительно к этим печам разрабатывались только газосжигающие устройства.

Одной из первых попыток была подача газа посредством перфорированной трубы, расположенной по диаметру поперечного сечения на двух-трех уровнях по длине зоны обжига. Чтобы исключить возможность взрыва, перфорированную трубу с подаваемым газом размещали под водоохлаждающей балкой. По балке циркулировала холодная вода, а газ поступал в печное пространство, смешивался с подогретым воздухом и за счет контакта с раскаленной поверхностью материала сгорал.

Недостаток такого способа сжигания газа состоял в перерасходе топлива на 8—10 %, расходуемого на нагрев циркулирующей воды по водоохлаждающим балкам.

Из многочисленных устройств газовых горелок шахтных печей наибольшее применение получила консольная фурменная горелка (рис. 11.5). Горелка состоит из монтажного короба (монтажной фурмы) 6, выполненного из жаростойкой стали, в котором размещена предохранительная фурма 4 из жаростойкой стали с опорными креплениями 5. Короб печи снабжен в местах установки горелок окантовкой из швеллерной стали, к которой крепится горелка.

Предохранительная фурма сварена с камерой 2 для подачи воздуха, которая опорными уголками 7 крепится к швеллерной окантовке. Для подачи газа в предохранительной фурме на опорах 5 проложен трубопровод (горелка) для подачи газа 1. Подача воздуха осуществляется в камеру через штуцер 3. Воздух, проходя через

свободное пространство предохранительной фурмы, охлаждает горелку и смешивается с газом в качестве первичного только в печном пространстве. В качестве вторичного на горение газа поступает нагретый воздух из зоны охлаждения. При установке такую горелку для снижения пережога у стенок печи выносят на 10 см внутрь печного пространства.

В зоне обжига консольные фурменные горелки устанавливаются в один, два ряда по высоте, а по периметру печи — по шесть, восемь. Основной недостаток таких горелок — недожог извести в осевой части печи. Воздействие пламени не превышает 1,2—1,5 м, поэтому отапливать газом круглые шахтные печи диаметром более 3 м не рекомендуется. В этом случае предпочтительнее использовать эллипсообразное сечение обжигового канала.

Удельная производительность шахтных печей, работающих на природном газе, составляет 12—15 т/(м²·сут), т. е. несколько выше пересыпных. Расход условного топлива 140—180 кг/т извести, т. е. практически одинаков.

Отопление мазутом применяется исключительно редко и только при отсутствии природного газа и антрацита. Мазут обычно сжигают в выносной топке, реже в шахте печи. При сжигании в шахте печи не обеспечивается перемешивание капель мазута с воздухом, отсюда химический недожог, достигающий 20 %, и выделение сажи, загрязняющей известь.

11.2.3. Печи кипящего слоя

Для обжига извести и приготовления дегидратированной глины начинают применять печи кипящего слоя. В отличие от обычных шахтных печей, в которых мелкие фракции материала обжигать невозможно, эти печи рассчитаны на обжиг мелких фракций (не более 10 мм).

При создании кипящего слоя скорость теплоносителя достигает скорости витания частиц. Обжиг в кипящем слое происходит при непрерывном движении материала, обтекаемого со всех сторон теплоносителем, обуславливающим интенсивный теплообмен. С увеличением размера обжигаемой фракции материала возрастает скорость витания частиц и количество работающих газов в печи увеличивается, что позволяет увеличивать и производительность печи. В настоящее время в стране для

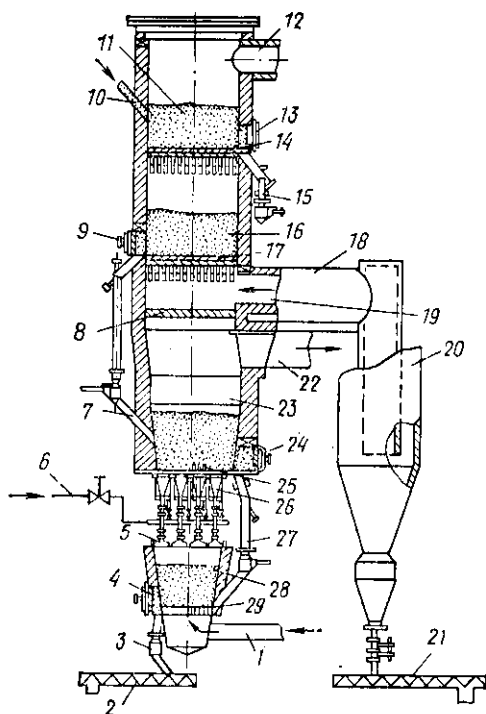


Рис. 11.6. Схема печи кипящего слоя для обжига извести

обжига извести используется несколько печей кипящего слоя; схема одной из них показана на рис. 11.6.

Известняк фракции 1—20 мм винтовым питателем загружается в зону нагрева 11 через течку 10 и нагревается в ней в кипящем слое до 720 К. Из этой зоны материал по внешнему переточному устройству 15 направляется во вторую зону подогрева 16, где также в кипящем слое нагревается до 1020 К и по второму переточному устройству 7 направляется в зону обжига 23. Температура за счет сжигания газа в кипящем слое материала достигает 1170—1220 К; известняк обжигается и по наружному перетoku 27 направляется в зону охлаждения 28, где он охлаждается до температуры порядка 370 К, и через течку 3 винтовым конвейером 2 направляется на склад готовой продукции.

Высота кипящих слоев поддерживается в первой зоне подогрева 0,7—0,75 м, во второй 0,6—0,65 м. Высота слоя за счет некоторого уменьшения диаметра третьей зоны больше.

Воздух в печь подается противотоком по трубопроводу 1. Сначала турбовоздушной машиной воздух нагнетается под колосниковую решетку зоны охлаждения 29, нагревается в этой зоне и через воздухохборники 5 поступает к газогорелочным устройствам 26, расположенным в газораспределительной керамической решетке 25. Газ к газогорелочным устройствам подают по газопроводу 6. Продукты горения, поступающие в обжигаемый материал, не создают перемешивания в радиальном направлении, поэтому равномерный ввод газа в горелки имеет решающее значение для нормальной работы печи.

Зона обжига отделена от зон нагревания сплошной керамической плитой 8, поэтому продукты горения из зоны обжига по каналу 22 направляются в горячий футерованный циклон 20, где очищаются от уносов и, обгибая сплошную плиту 8 через трубопровод 18, поступают под колосниковую решетку 17, выполненную из керамики, затем в камеру 19. Распределяясь по всему поперечному сечению решетки, продукты горения из циклона 20 с температурой порядка 1220 К создают кипящий слой во второй зоне нагревания 16 и, поднимаясь вверх, проходят опять через керамическую решетку 14 в первую зону нагревания.

В первой зоне нагревания 11 также создается кипящий слой, а отработанные продукты горения через трубопровод 12 с температурой порядка 750—800 К, после очистки в циклоне дымососом, выбрасываются из печи. Высокая температура отходящих газов позволяет их использовать в котлах-утилизаторах. Пылевидная фракция извести, осажденная в футерованном горячем циклоне 20, через винтовой питатель 21 направляется на склад готовой продукции. Печь в каждой зоне имеет люки с заглушками (см. поз. 4, 9, 13, 24).

В печах кипящего слоя можно обжигать известняк различных фракций от пылевидной до мелкокусковой (12—20 мм). Скорость газовой среды поддерживается в пределах 180—200 м/с, считая по живому сечению решеток, которое составляет до 6 % площади поперечного сечения печи. Печи кипящего слоя проектируются пока на производительность (съем с 1 м² ре-

шетки) 20—80 т/(м²·сут) в зависимости от обжигаемых фракций материала. Удельный расход условного топлива 170—185 кг/т обожженной извести.

Рассмотренный принцип работы печи кипящего слоя для обжига извести может быть применен и к печи для обжига молотого гипсового камня. В этом случае устанавливается выносной тепловой генератор, в котором готовится теплоноситель с более низкими температурами для создания кипящего слоя.

11.3. Печи для обжига искусственных заполнителей бетона

В технологии сборного железобетона широко применяются искусственные заполнители, такие, как керамзит и аглопорит, изготавливаемые из глины, перлит, получаемый вспучиванием перлитовых пород, вспученный вермикулит и др. Основная потребность промышленности в искусственных заполнителях удовлетворяется за счет керамзита и аглопорита, поэтому ниже рассматриваются обжиговые установки для производства этих материалов.

11.3.1. Вращающиеся печи для обжига керамзитового гравия

Из вращающихся печей для обжига керамзитового гравия широко применяется типовая печь размером 40×2,5 м (40 м — длина; 2,5 м — диаметр печи). Иногда используются печи других размеров (22×2,3 м и 12×1,6 м).

Схема вращающейся печи для обжига керамзита дана на рис. 11.7. Материал (подсушенные гранулы) загружается в печь через точку 1, расположенную в торцевой камере 2, в которую с помощью уплотнительных колец 3 входит холодный конец печи. Печь представляет собой стальной барабан 4, футерованный внутри огнеупорным кирпичом. На печь насажена венцовая шестерня 5, с помощью которой через редуктор 12 от электродвигателя печь приводится во вращение со скоростью 4—6 мин⁻¹. На печи наварены обечайки 6, которые вместе с печью вращаются по опорным роликам 11 и удерживают печь от перемещения. Горячий конец печи снабжен откатной головкой 7, в которой размещена га-

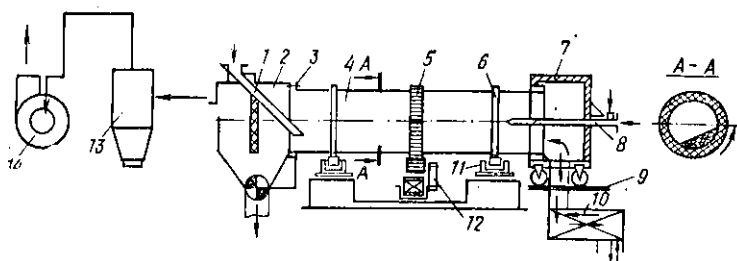


Рис. 11.7. Схема вращающейся печи для обжига керамзита

зовая горелка 8. Откатная головка вместе с газовой горелкой может откатываться от печи по рельсам 9, освобождая горячий конец печного барабана для ремонта футеровки.

Материал, попав во вращающуюся печь (угол ее наклона к горизонту $4-5^\circ$), передвигается к горячему концу. Коэффициент загрузки печи составляет 15—20 %. Загрузка и выгрузка материала совершается непрерывно. Материал на протяжении первых 25—30 м медленно подогревается до 1020—1070 К, а на последних семи-восьми метрах в результате соприкосновения с факелом горения газа резко подогревается до температуры порядка 1270 К и вспучивается. На последних двух-трех метрах печи (за вылетом газа из горелки) материал начинает охлаждаться и через откатную головку попадает в холодильник 10.

Холодильник (обособленный агрегат) — вынесенная зона охлаждения печи. В холодильник на охлаждение готового керамзита подается паружный воздух, который нагревается, охлаждая материал, и через откатную головку попадает в печь, где используется в качестве вторичного на горение газа. Первичный воздух на горение подается в горелку. В зоне факела горения действительная температура сжигания топлива достигает 1370—1420 К. После взаимодействия с материалом в зоне вспучивания продукты горения передвигаются к холодному концу печи, подогревая материал. На выходе из печи продукты горения имеют температуру 870—920 К; они поступают в циклон 13 и после очистки дымососом 14 выбрасываются из печи. Отходящие газы вследствие такой высокой температуры используются

для сушкиготавливаемых к обжигу гранул в отдельной сушилке.

Процесс теплообмена во вращающихся печах осуществляется путем теплопроводности, конвекции и излучения. Продукты горения отдают теплоту поверхности слоя материала в низкотемпературной зоне конвекцией, в высокотемпературной — излучением и конвекцией. Кроме того, продукты горения нагревают посредством излучения и конвекции футеровку печи. Футеровка при вращении печи контактирует с находящимся на ней слоем материала и, в свою очередь, отдает теплоту материалу. Таким образом, циклы получения теплоты футеровкой чередуются с циклами отдачи ею теплоты материалу. Часть теплоты теряется в окружающую среду.

Зона охлаждения готового керамзита играет особую роль в получении качественной готовой продукции. Темп охлаждения, связанный с напряженным состоянием, возникающим от разности температур на поверхности и в центре гранул, определяет целостность поровых перегородок. Чем меньше перегородок подвергнется разрушению, тем выше прочностные характеристики материала. Поэтому охлаждение гранул необходимо вести медленно, чтобы уменьшить перепады температур между поверхностью и центром гранул. На таком принципе основано получение высокопрочного керамзита.

Для охлаждения керамзита применяются разные по конструктивным особенностям холодильные установки (барабанные, шахтные, колосниковые и др.). На рис. 11.8 показана схема работы холодильника кипящего слоя конструкции ВНИИСтрома. Корпус холодильника в виде короба 1 имеет наклонное решетчатое днище 2, под которое вентилятором высокого давления 10 через трубопровод 11 нагнетают наружный воздух. Обожженный керамзит через откатную головку печи поступает в питательную трубу 4 и сыпается через струнное сито 5 в рабочий короб холодильника. Давлением воздуха керамзит приводится в псевдооживленное состояние, охлаждается и перемещается вниз по решетчатому днищу.

Удаление охлажденного керамзита производится через выгрузочное отверстие 12 и регулируется шибером 3. Керамзит, попавший в бункер готовой продукции 13, снабженный питателем, конвейером 14 выгружается на склад готовой продукции. Большая часть отработанного в холодильнике воздуха проходит через струнное сито

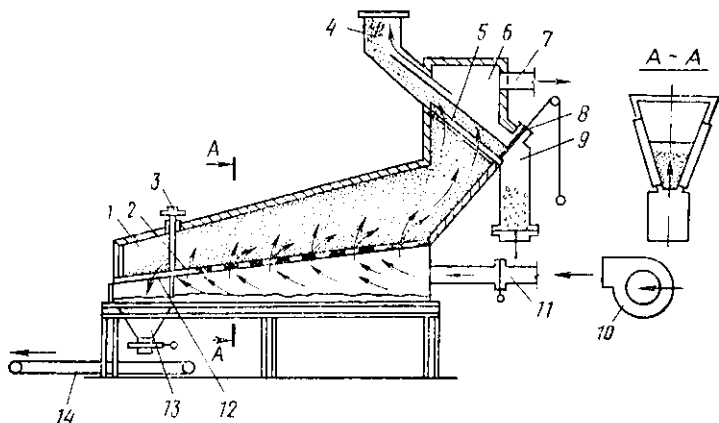


Рис. 11.8. Схема холодильника кипящего слоя

и поступает в сепарационную камеру 6. Остальной отработанный воздух частично используется в качестве вторичного для горения топлива и проходит через питательную трубу 4 в откатную головку печи, частично через патрубок 7 удаляется из сепарационной камеры.

Соотношение поступающего в откатную головку вторичного воздуха и отбираемого через патрубок 7 регулируется. Слишком крупные гранулы керамзита через струнное сито не проходят, а скапливаются у шибера 8. По мере их накопления шибер открывается, и через течку 9 слишком крупные гранулы удаляются из сепарационной камеры.

Объемную производительность вращающейся печи, $\text{м}^3/\text{ч}$, как транспортирующего устройства, определяют по формуле

$$P_v = 0,00785 \psi d^2 v, \quad (11.3)$$

где d — диаметр печи, м; ψ — коэффициент заполнения печи, %; v — скорость продвижения материала в печи, $\text{м}/\text{ч}$.

Скорость продвижения материала в печи определяют по формуле

$$v = L \frac{60}{t},$$

где L — длина печи, м; t — продолжительность прохождения гранул через вращающуюся печь, мин; отсюда t равно

$$t = [0,308L(\varphi + 24)] n i, \quad (11.4)$$

где φ — угол естественного откоса материала, град ($\varphi = 35^\circ$); n — частота вращения печи, мин^{-1} ; i — наклон печи, %.

Производительность вращающейся печи, кг/ч, по массе обжигаемого керамзита определяется по эмпирической формуле

$$G = 8,25AL - 825, \quad (11.5)$$

где A — эмпирический коэффициент; L — длина печи, м. Для печей $L=12$ м A принимают 13; для печей $L=40$ м A принимают 25.

Производительность вращающихся печей при обжиге керамзита зависит от марки обжигаемого керамзита. Поэтому условную производительность, м³/год, пересчитывают на марку выпускаемого керамзита из расчета выпуска 100 000 м³/год

$$P_y = K_M \cdot 100\,000, \quad (11.6)$$

где P_y — условная производительность печи в год; K_M — коэффициент пересчета на марку керамзита. Так, для марки 250 $K_M=1,6$; для марки 400 $K_M=1,1$; для марки 600 $K_M=0,8$.

Расход условного топлива на 1 т керамзита для различных печей составляет 100—130 кг.

11.3.2. Спекательные установки для обжига аглопорита

Для спекания (омоноличивания) глиняных частиц или гранул применяют установки периодического и непрерывного действия. Установки периодического действия (спекательные чаши) мало распространены. Непрерывно действующие установки бывают карусельного и ленточного типов, однако первые из-за сложности их конструкций в настоящее время не используются. Схема ленточной спекательной (или называемой ленточной агломерационной) машины представлена на рис. 11.9.

Агломерационная машина состоит из станины, по которой движутся непрерывной лентой чаши — палеты. Днище палет представляет собой колосниковую, газопроницаемую решетку с живым сечением отверстий порядка 25—30 %. Палеты вместе с решеткой отливаются из жаростойкого чугуна. Под палетами расположены вакуум-камеры.

Работа агломерационной машины заключается в следующем. В свободную палету из бункера 1 через дозатор 2 на всю ширину палеты, которая на современных машинах достигает 1,5 м, загружается шихта, состоящая из глины и необходимого для спекания коли-

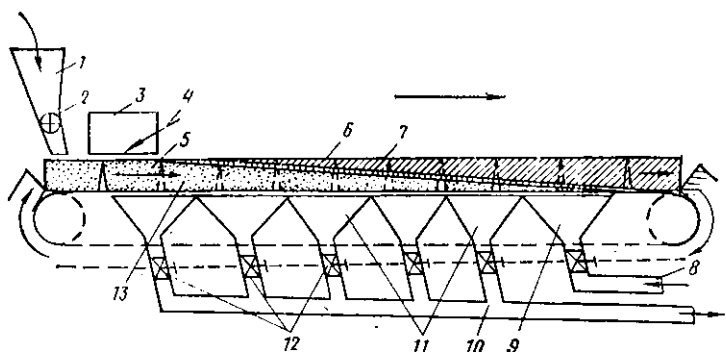


Рис. 11.9. Схема ленточной алгомерационной машины

чества топлива. Палета 5 с загруженной шихтой продвигается по стрелке, показанной на рисунке, над вакуум-камерами и попадает под зажигательное устройство 3 — горн. Горн снабжен газовыми горелками 4, которые зажигают в верхнем слое шихты топливо. Перемещаясь вперед, палета все время находится под вакуум-камерами 11. В результате отрицательного давления создаваемого в них дымососом, присоединенным к сборному каналу 10, через шихту просасывается воздух. Воздух, проходя через слой шихты, окисляет топливо. Происходит процесс горения, за счет которого частицы или гранулы спекаются.

По мере продвижения палет передвигается и зона горения топлива. Раскаленная зона (видна на палете красная полоса толщиной 1,5—2,5 см) передвигается вниз. Скорость продвижения зоны горения составляет 8—12 мм/мин. По мере продвижения зоны горения топлива в шихте в верхней части палеты над зоной горения находится конгломерат 6, ниже зоны горения — шихта 13 с несгоревшим топливом. Просасываемый воздух через слой отбирает теплоту от конгломерата 6 и нагревается. Нагретый воздух окисляет топливо в зоне горения 7 и в виде продуктов горения нагревает слой шихты 13, расположенный под зоной горения. Отработанные продукты горения через вакуум-камеры 11 и сборный канал 10 выбрасываются дымососом после очистки в атмосферу.

Регулирование в каждой вакуум-камере производится индивидуально заслонками 12. Процесс спекания

шихты на всю толщину слоя (250—300 мм) заканчивается до поступления ее в последнюю вакуум-камеру. Последняя вакуум-камера 9 работает уже в ином режиме. В нее через трубопровод 8 нагнетается воздух, и она из вакуум-камеры как бы превращается в обычную камеру, в которой устанавливается избыточное давление холодного воздуха. Воздух, просасываясь через слой конгломерата, осуществляет его предварительное охлаждение.

Таким образом, палета, проходя над камерой 9, подвергается предварительному охлаждению вместе с находящимся в ней материалом. Далее при движении палеты через приводное колесо из нее выгружается готовая продукция, которая направляется на окончательное охлаждение в холодильник. Освободившаяся от материала палета проходит по нижней ветви и поступает снова на загрузку.

Производительность агломерационных машин, выпускаемых промышленностью, составляет 50, 100 и 200 тыс. м³ аглопорита в год. Расход условного топлива составляет 100—110 кг на 1 т продукции.

11.4. Печи для обжига сформованных изделий

В промышленности строительных материалов обжигают кирпич, керамические камни, плитки, грубы, диатомовый кирпич, легковесные огнеупоры, перлитокерамические и другие изделия.

Обжиг этих изделий — заключительная стадия технологического процесса, в большинстве случаев определяющая качество готовой продукции. Для обжига изделий применяют непрерывно действующие кольцевые, туннельные и щелевые печи, являющиеся разновидностью туннельных. Периодически действующие печи в настоящее время промышленностью не используются. Не строятся и кольцевые печи в их традиционном исполнении из-за очень тяжелых условий труда при их обслуживании. Однако в строительной отрасли до сих пор работают устаревшие конструкции кольцевых печей, поэтому они будут кратко рассмотрены.

11.4.1. Кольцевые печи

Распространенность кольцевых печей (появились в 1856—1860 гг.) объясняется простотой их конструктивных решений, экономичностью и возможностью исполь-

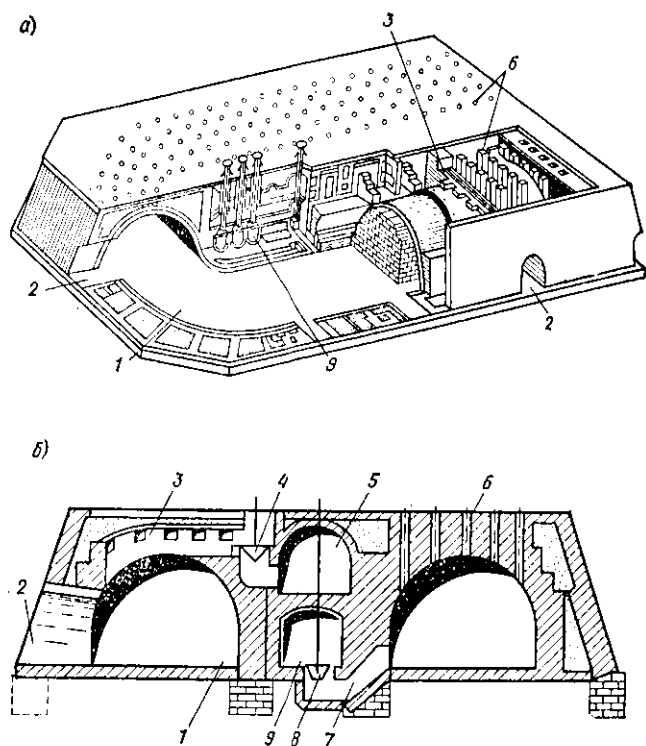


Рис. 11.10. Схема кольцевой печи

а — аксонометрия; б — разрез

зовать любой вид топлива. Однако трудности при внедрении механизации загрузки и выгрузки материала не дают возможности относить эти печи к перспективным.

Кольцевая печь (рис. 11.10) представляет собой замкнутый обжигательный канал 1 эллипсообразной формы, перекрытый полуциркульным сводом. В наружных стенах обжигательного канала имеются отверстия 2 — ходки, через которые загружают и выгружают изделия (кирпич, керамический камень). Расстояние между осями соседних ходков условно называют камерами, хотя эти камеры разделительных стенок не имеют.

В середине печи оборудованы два канала: нижний 9 — дымовой, верхний 5 — жаровой. Каждая ус-

ловная камера соединена с дымовым каналом посредством маленького капала, называемого очелком 7. Перед соединением каждого очелка с дымовым каналом установлен чугунный дымовой конус 8, который можно открывать и закрывать.

В своде по всему протяжению обжигового канала печи через 1 м устроены сквозные трубки 6 для засыпки топлива. Топливные трубки по ширине обжигового канала устраивают в четыре-пять рядов и сверху печи закрывают вьюшками. Ряды топливных трубок соединены между собой и с жаровым каналом 5 каналами рассыпного строя 3. Каждый канал соединяет два ряда таких трубок с жаровым каналом через жаровой конус. 4. Каждый раз после загрузки камеры сырцом ходок закладывают насухо двойной кирпичной стенкой. Поверхность заложенного ходка обмазывают глиняным раствором. Кладка печи выполнена из красного кирпича, внутренние стены футеруют огнеупором. В середине дымового канала устроен канал, который соединяется с дымососом печи.

Работа кольцевой печи заключается в следующем. Весь печной канал кроме двух или трех условных камер загружают материалом (на рис. 11.11 показаны две незагруженные камеры). Ходки в эти свободные камеры открыты. Все остальные ходки закрыты кирпичной кладкой. Через левый открытый ходок непрерывно поступает сырец. По мере загрузки каждой камеры поперек печи устанавливают бумажную перегородку — ширму. Через правый непрерывно выгружается готовая продукция. По мере заполнения условной камеры сырцом ее закрывают. Одновременно высвобождается камера для загрузки и справа открывают ходок. В этом случае загрузка и выгрузка перемещаются соответственно вправо на один ходок. Так происходит перемещение непрерывно по всему кольцу обжигового канала.

Из-за непрерывной работы вентилятора — дымососа в печи создается отрицательное давление (разрежение), воздух через открытые ходки засасывается в печной канал и движется против часовой стрелки, охлаждая материал. Количество воздуха, необходимое для охлаждения обожженной продукции, велико, поэтому только часть его пропускают в зону обжига на горение топлива. Для этого перед зоной обжига (в зоне охлаждения) открывают четыре-пять дымовых конусов, куда устремляется

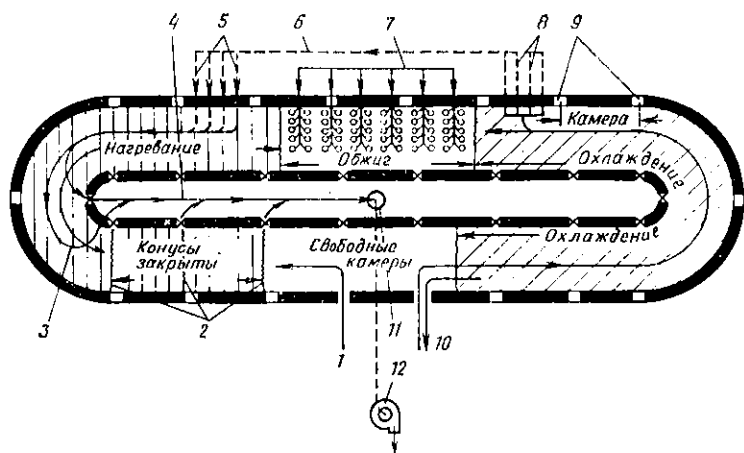


Рис. 11.11. Рабочая схема кольцевой печи

1 — камеры для загрузки (садки) материала; 2 — три бумажных шпирмы двух камер с закрытыми дымовыми конусами; 3 — отбор продуктов горения в два открытых отсёлка дымового канала; 4 — движение отработанных газов по дымовому каналу к дымососу; 5 — подача воздуха в канал печи из зоны охлаждения через рассыпной строй; 6 — движение нагретого воздуха по жаровому каналу (показано условно вне печи); 7 — подача топлива в топливные трубки; 8 — отбор нагретого воздуха через рассыпной строй в жаровой канал; 9 — заложение кладкой ходки; 10 — выгрузка продукции; 11 — отбор отработанного теплоносителя из дымового канала к дымососу; 12 — вентилятор — дымосос

часть нагретого воздуха через каналы рассыпного строя. Этот воздух попадает в жаровой канал. Остальной нагретый воздух проходит в зону обжига, куда через топливные трубки, снимая выюшки, засыпают топливо.

В последнее время некоторые кольцевые печи переведены на газовое отопление. В этом случае через топливные трубки опускают систему труб подачи газа. Топливо, сгорая в зоне обжига, обжигает изделия. Продукты горения, продолжая движение в сторону увеличения отрицательного давления, попадают в зону нагревания и постепенно охлаждаются, отдавая тепло материалу. Объем продуктов горения за счет охлаждения уменьшается. Для увеличения объема продуктов горения в зону нагревания подают нагретый воздух, ранее отобранный в жаровом канале. Для его передачи в необходимом участке этой зоны открывают четыре-пять жаровых конусов (показано на рис. 11.11 верхней пунктирной линией).

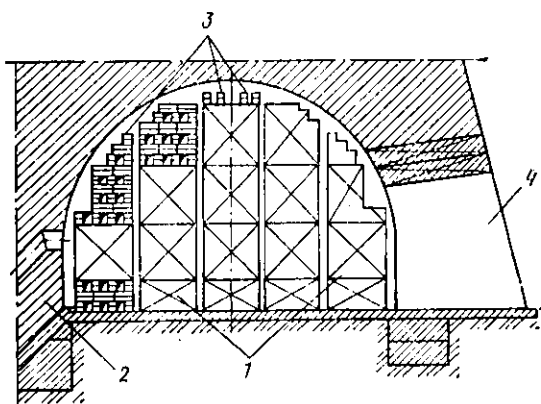


Рис. 11.12. Схема пакетной садки кирпича-сырца в кольцевой печи
1 — пакет сырца; 2 — очелок; 3 — садка вручную; 4 — ходок

Нагретый воздух попадает в обжиговой канал вместе с продуктами горения продвигается по зоне нагревания, улучшая теплосбмен. Как только заканчивается загрузка изделий в свободной камере, и камера закрывается бумажной ширмой, предыдущую ширму открывают (прорывают). Для отбора отработанных газов перед действующей ширмой открывается следующая пара дымовых конусов, а предыдущая закрывается. Отработанные газы через дымовые очелки с открытыми конусами попадают в дымовой канал, продвигаются к каналу и через соединительный канал дымососом выбрасываются из печи.

Рассматривая работу кольцевой печи в целом, отметим: изделия в печи стоят на месте, передвигаются работающие в печи газы и соответственно зоны, находясь все время на одинаковом расстоянии друг от друга. Самыми тяжелыми операциями в работе кольцевой печи являются загрузка и выгрузка изделий, хотя в какой-то мере эти операции и механизированы.

В настоящее время пакет садки выкладывается вне печи, затем автопогрузчиком через ходок загружается в печной канал и устанавливается на под (пол печи). Обычно для загрузки поперечного сечения канала требуется 15—20 пакетов, устанавливаемых в три-четыре яруса. Верхняя часть садки под сводом выкладывается вручную. Температура в обжиговом канале в местах

загрузки и выгрузки пакета достигает порядка 330—350 К, что делает труд очень тяжелым. Кроме того в садке следует устраивать каналы для прохождения газов и воздуха вокруг каждого изделия. Причем, вверх каналы должны быть меньше, чем вниз, чтобы равномернее распределять работающие газы по печному каналу. Пакетная садка сырца в кольцевой печи схематично представлена на рис. 11.12.

Управление процессом обжига осуществляется регулированием подачи топлива, изменением положения дымовых и жаровых конусов и поддержанием стабильного режима работы зон.

Важнейшие показатели работы кольцевых печей: удельная производительность составляет 1500—2500 шт. кирпича с 1 м³ обжигательного канала в месяц; удельный расход условного топлива 130—140 кг/1000 шт. кирпича.

11.4.2. Туннельные печи

Основным сдерживающим фактором применения туннельных печей была трудность отделения высокой температуры в обжиговом канале от температуры, не превышающей 370 К в подвагонеточном пространстве. Эта проблема была решена с изобретением *песочного затвора*. Конструктивная схема такого затвора показана на рис. 11.13.

В стене печи 4 по всей длине выполнена ниша, куда через каждые 10 м через точки 1 засыпается песок. Для того, чтобы песок не высыпался в полость печи, край ниши имеет ограждение в виде стального профиля 6. На нижнюю часть вагонетки наварен вертикально сплошной стальной лист 2, снабженный защитной обмазкой 3. Верх вагонетки футерован огнеупорным кирпичом 4. На верхнюю поверхность футеровки вагонетки 5 загружаются изделия, находящиеся в полости обжигового канала. Таким образом, обжиговый канал печи отделен от подвагонеточного пространства футеровкой вагонетки и песочным затвором, устраиваемым с обеих сторон печного канала. Вагонетка движется по рельсам. Температура в подвагонеточном пространстве печей, оснащенных песочным затвором, не превышает 370 К.

На рис. 11.14 приведена схема туннельной печи кон-

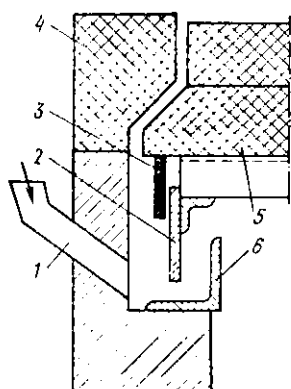


Рис. 11.13. Схема песочного затвора туннельной печи

струкции Союзгипрострома. Обжиговый канал печи — туннель 1, полностью заполненный вагонетками 2. Печь условно разделена на зону нагревания L_1 , зону обжига L_2 и зону охлаждения L_3 . Движение вагонеток осуществляется с интервалами 30—40 мин. Подавая загруженную вагонетку в зону нагревания, одновременно с помощью гидравлического толкателя проталкивают весь поезд, и из зоны охлаждения выходит вагонетка с готовой продукцией. Пакетная загрузка изделий выполняется механическим укладчиком. Общая длина печи 105 м, ширина обжигового канала 1,74 м, его высота 1,5 м.

Производительность печи при сроке обжига 36 ч составляет 30 млн шт. кирпича в год.

Аэродинамическая схема работы печи выполнена следующим образом (рис. 11.14,а). В зону охлаждения вентилятором 8 сосредоточенно через трубопровод 7 подается наружный воздух, который охлаждает изделия и частично в качестве вторичного идет на горение в зону обжига. Остальной воздух из зоны охлаждения отбирается вентилятором 6.

В зону обжига подается природный газ и первичный воздух по разным трубопроводам. На схеме подача газа и воздуха показаны условно пунктирной линией 9. Газ сжигается в камерах, утопленных в стену печи, с помощью горелок полного смешивания. Поэтому факел не образуется, и кирпич, находящийся вблизи мест сжигания топлива, не оплавляется. Температура горения в зоне обжига составляет около 1470 К, максимальная тем-

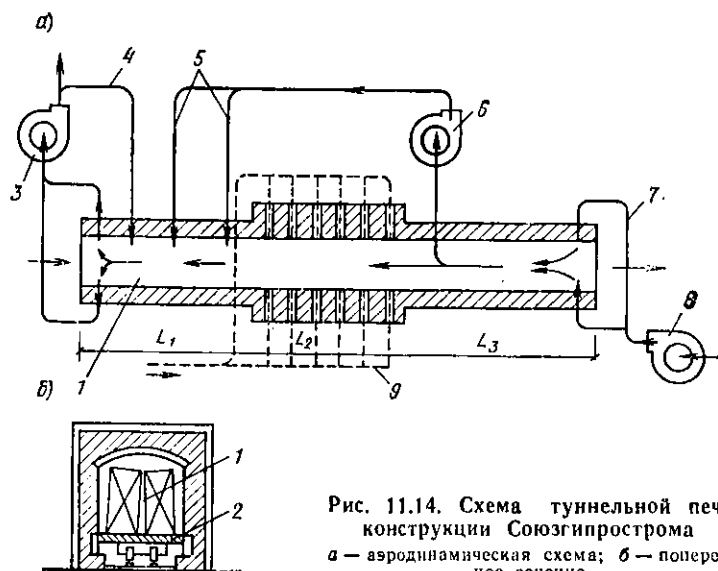


Рис. 11.14. Схема туннельной печи конструкции Союзгипрострома
а — аэродинамическая схема; б — поперечное сечение

температура обжига 1320—1370 К. Обожженный кирпич передвигается в зону охлаждения, а продукты горения перемещаются в зону нагревания.

Для того чтобы уменьшить расслоение температур по поперечному сечению печи (см. рис. 11.14,б), в зону нагревания вентилятором 6 из зоны охлаждения передается нагретый воздух. Так как температура движущихся продуктов горения в результате отдачи теплоты кирпичу снижается, то и их объем уменьшается. Потому и предусмотрена двойная подача нагретого воздуха 5. В этом случае объем работающих печных газов в зоне нагревания возрастает, а поток турбулизируется. На загрузке печи, вблизи отбора отработанного теплоносителя, с этой же целью устраивается частичная рециркуляция отработанных газов 4. Они сосредоточенно отбираются и вентилятором 3 выбрасываются в атмосферу.

Расход условного топлива такой печью составляет 140—150 кг на 1000 шт. кирпича.

11.4.3. Щелевые печи

Ранее были рассмотрены печи, которые можно называть печами штабельного обжига. Щелевые печи — печи однорядного обжига изделий. Обычно в таких печах ширина обжигового канала значительно больше его высоты. Щелевые печи по принципу действия ничем не отличаются от изложенных выше, однако с учетом однорядного обжига они komponуются в конвейерные линии по производству изделий и потому широко распространены.

Щелевая печь для обжига керамических плиток разработана и внедрена в производство ПКБ НИИСтрой-керамики. Такая печь собирается из отдельных типовых секций каждая длиной 2—3 м. Количество секций для одной печи выбирается из условий времени, необходимого на обжиг.

Керамическая плитка поступает на обжиг с влажностью не выше 0,2 %, поэтому начальная температура обжига составляет порядка 670 К. На отдельных участках скорость нагревания и охлаждения плитки изменяется от 40 до 90 К/мин.

В зависимости от состава сырьевой смеси и толщины керамических плиток продолжительность их обжига в щелевых печах составляет 42—100 мин, тогда как в туннельной печи соответственно 36 ч. Типовая секция одного из типоразмеров щелевой печи в разрезе показана на рис. 11.15.

Секция, образующая отрезок туннеля, выложена из кирпича и перекрыта полуциркульным сводом 8. Вся кладка секции заключена в стальной кожух 2 и скреплена каркасом. Приблизительно в середине по высоте секции, на отдельных опорах смонтирован роликовый конвейер 6. На каждом ролике закреплена приводная звездочка. Привод роликов одно- или двухсторонний. Ролики установлены в железографитовых втулках, расположенных в корпусах подшипников. Корпуса подшипников крепятся на опорах, установленных с шагом 1,5 м по длине печи. Секции имеют зазор, равный 20 мм (температурный шов), который заделан асбестовым шнуром.

В зонах нагревания и обжига предусмотрены верхнее и нижнее расположения газовых горелок 5. Возможность регулирования перепадов температур между

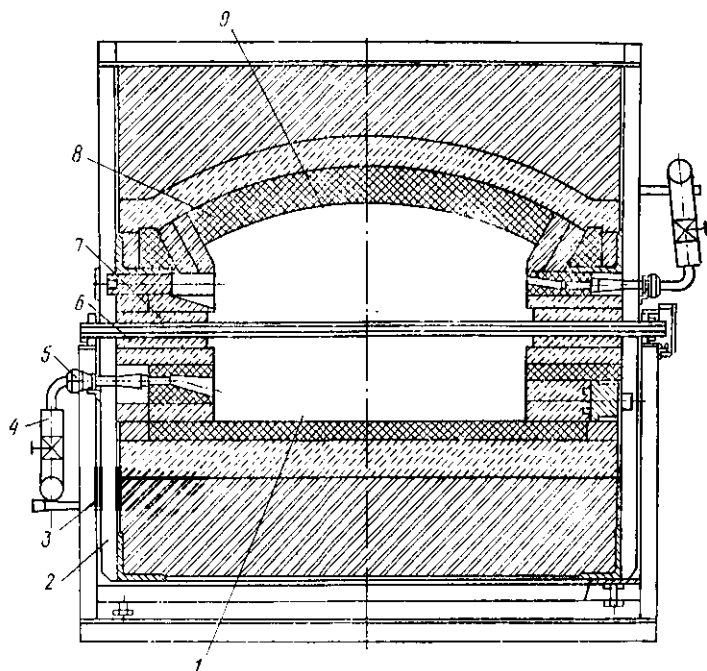


Рис. 11.15. Схема разреза типовой секции щелевой печи
 1 — нижний горизонт; 2 — кожух; 3 — опора роликов; 4 — подвод газа; 5 —
 инжекционная горелка; 6 — конвейер; 7 — ограждение печи; 8 — свод;
 9 — верхний горизонт

верхним 9 и нижним 1 горизонтами печи позволяет исключить деформацию плиток.

Зоны нагревания, обжига и охлаждения разделены шамотными перегородками, причем в них оставлен проход для плиток размером 150 мм. Разделение зон улучшает аэродинамический режим печи и, следовательно, поддерживает заданный температурный режим.

Секции зоны охлаждения снабжены отверстиями для обдува плиток холодным воздухом, выполненными по касательной к поверхности свода. Продукты горения от печи отбираются в начале первой секции зоны охлаждения через отверстие в своде. Горячий воздух отбирается в конце зоны охлаждения также через отверстие в своде.

Работа печи заключается в следующем. Поступающие высушенные керамические плитки через вход 1

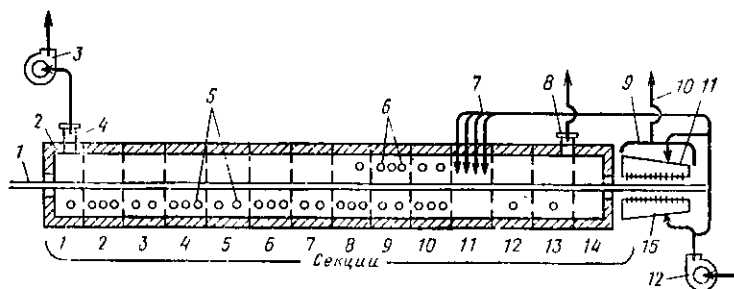


Рис. 11.16. Схема работы щелевой печи для обжига керамической плитки

(рис. 11.16) попадают в печной канал 2 с температурой 670—700 К и двигаются по нему в течение 40 мин, при этом проходят 14 секций (см. поз. 1—14 внизу печи.)

В секциях 1—6 происходит дополнительный нагрев плиток до температуры обжига. В секции 7 температура плиток благодаря работе нижних горелок 5 достигает 1220 К. В секциях 8—10 за счет работы нижних и дополнительного включений верхних горелок 6 температура плиток достигает 1370 К. В секции 11 в результате подачи холодного воздуха 7 температура плиток снижается до 870—920 К, и с такой температурой (благодаря работе двух нижних горелок) плитки выдерживаются в секциях 12, 13. В секции 14 за счет отбора нагретого воздуха через патрубок 8 плитки опять охлаждаются до температуры порядка 470 К.

Секцией 15 считают открытый участок, на котором установлена двухсторонняя струйная обдувка 11 движущихся плиток холодным воздухом. Струйная обдувка закрыта сверху зонтом 9, через который воздух осевым вентилятором выбрасывается в трубопровод 10. Холодный воздух в зону охлаждения и на струйную обдувку подают вентилятором 12.

Отбор отходящих газов из секции 1 производится через патрубок 4 вентилятором 3, и они направляются в котел-утилизатор. В зонах обжига и нагревания создается незначительное отрицательное давление (1—3 Па). Такое же положительное давление создается в зоне охлаждения печи. При таком давлении выбивание воздуха из зоны охлаждения и подсосы в зоны нагревания минимальны, поэтому аэродинамический режим пе-

чи практически не нарушается. Удельный расход условного топлива такой печи на обжиг плиток для полов составляет 2,8 кг/м².

11.5. Принципы теплотехнического расчета промышленных печей

Теплотехнический расчет любой промышленной печи состоит из трех частей: первая часть — технологический расчет, вторая — расчет теплового баланса, третья — расчет аэродинамического баланса.

В технологический расчет входит материальный баланс тепловой обработки материалов (изделий), или, другими словами, материальный баланс печи. Его можно составлять сразу на всю печь или на отдельные ее участки — зоны.

Как уже указывалось, в основу материального баланса положен закон сохранения массы. Поэтому *материальный баланс* можно сформулировать так: сумма масс поступающих в печь материалов и веществ, необходимых для ведения технологического процесса, равна сумме масс выдаваемой продукции и отходов производства. Математическая запись этой формулировки выражается в следующем виде:

$$\Sigma G_{\text{мат}} = \Sigma G_{\text{пр}} + \Sigma G_{\text{от}} + \Sigma G_{\text{ог}}, \quad (11.6)$$

где $\Sigma G_{\text{мат}}$ — масса материалов — твердых, жидких и газообразных, поступающих в печь или в зону; $\Sigma G_{\text{пр}}$ — сумма масс продукции, получающейся в результате проведения технологического процесса; $\Sigma G_{\text{от}}$ — масса твердых и жидких отходов технологического процесса; $\Sigma G_{\text{ог}}$ — масса отходящих газов.

Материальные балансы составляются на определенную базу. Базой балансов является отрезок времени или количество массы продукции, на которое составляется материальный баланс. Базой материальных балансов для непрерывно действующих печей выбирают 1 ч работы печи либо единицу массы перерабатывающей продукции. Установив расход сырья на единицу готовой продукции, определяют часовую, суточную и годовую производительность печи при трехсменном режиме ее работы.

Тепловой баланс — вторая часть теплотехнического расчета (составление теплового баланса иногда называют тепловым расчетом промышленной печи). Основная задача расчета теплового баланса — определение

удельных расходов теплоты и топлива на ведение технологического процесса. Тепловой баланс можно характеризовать как равновесие введенной теплоты в процесс и ее расхода в этом процессе.

В основу теплового баланса положен закон сохранения энергии. Как и материальный, он составляется на всю установку или ее часть — зону. Базой тепловых балансов, как и материальных, непрерывно действующих печей является 1 ч работы печи или единица массы.

Уравнение теплового баланса в общем виде

$$Q_{\text{хт}} + Q_{\text{фл}} + Q_{\text{тм}} + Q_{\text{фв}} + Q_{\text{экс}} + Q_{\text{прис}} + Q_{\text{тт}} = \\ = Q_{\text{тп}} + Q_{\text{то}} + Q_{\text{энд}} + Q_{\text{ог}} + Q_{\text{выб}} + Q_{\text{хп}} + Q_{\text{фп}} + Q_{\text{ос}} + Q_{\text{пт}}, \quad (11.7)$$

где $Q_{\text{хт}}$ — теплота сгорания топлива; $Q_{\text{фл}}$ — физическая теплота топлива; $Q_{\text{тм}}$ — теплота, поступающая в печь с материалом; $Q_{\text{фв}}$ — теплота воздуха, используемого для горения топлива и окисления материалов; $Q_{\text{экс}}$ — тепловой эффект экзотермических химических реакций; $Q_{\text{прис}}$ — теплота воздуха, поступающего в печь за счет присосов из окружающей среды; $Q_{\text{тт}}$ — теплота, поступающая с транспортом; $Q_{\text{тп}}$ — теплота материала, выгружаемого из печи; $Q_{\text{то}}$ — теплота технологических отходов; $Q_{\text{энд}}$ — тепловой эффект эндотермических химических реакций; $Q_{\text{ог}}$ — теплота отходящих газов; $Q_{\text{выб}}$ — теплота, удаляющаяся с выбивающимися газами через неплотности и кладку печи; $Q_{\text{хп}}$ и $Q_{\text{фп}}$ — потери теплоты от химического и физического недогорания топлива; $Q_{\text{ос}}$ — теплота, рассеиваемая (теряемая) в окружающую среду за счет теплопроводности ограждающих конструкций, $Q_{\text{пт}}$ — потери теплоты с выгружаемым из печи транспортом.

Естественно, что в каждом конкретном случае уравнение теплового баланса приобретает соответствующую ему форму. По тепловому балансу определяют коэффициент полезного действия установки.

Аэродинамический баланс составляется на ту же базу, на которую составляются материальный и тепловой балансы. В основу аэродинамического баланса, как и материального, положен закон сохранения массы, и формулируется он так: сумма масс, поступающих в печь газообразных продуктов и выделяющихся в химических реакциях при тепловой обработке материала, равна сумме масс удаляемых газообразных продуктов из печи.

Можно представить уравнение аэродинамического баланса в общем виде

$$\Sigma G_{\text{л}} + \Sigma G_{\text{пр}} + \Sigma G_{\text{прис}} + \Sigma G_{\text{хп}} = \Sigma G_{\text{ог}} + \Sigma G_{\text{вл}} + \\ + \Sigma G_{\text{выб}} + \Sigma G_{\text{отб}}, \quad (11.8)$$

где $\Sigma G_{\text{л}}$ — масса воздуха, поступающая в печь, на охлаждение продукции; $\Sigma G_{\text{пр}}$ — масса продуктов горения, образующаяся при

сжигании топлива в подаваемом на горение воздухе; $\Sigma G_{\text{прис}}$ — масса воздуха, поступающая за счет присосов через неплотности и кладку печи; $\Sigma G_{\text{хр}}$ — масса газообразных продуктов, выделяющаяся за счет химических реакций, проходящих в материале; $\Sigma G_{\text{ог}}$ — масса отходящих газов; $\Sigma G_{\text{вл}}$ — масса выделяемых водяных паров за счет физико-химической и химически связанной влаги при обжиге; $\Sigma G_{\text{выб}}$ — масса газообразных продуктов, выбивающаяся через неплотности и фильтрующаяся через кладку печи; $\Sigma G_{\text{отб}}$ — масса отбираемого горячего воздуха из зоны охлаждения.

Аэродинамический баланс предназначен для определения сопротивлений на пути движения работающих в печи газов и для выбора вентиляторов, с помощью которых транспортируются эти газы.

Основные показатели работы промышленных печей: удельная производительность рабочей камеры, удельная производительность площади пода, тепловая нагрузка — напряженность объема рабочей камеры по теплоте (q_v , Вт/м³), а также удельные расходы теплоты и топлива. Тепловая экономичность печи определяется ее коэффициентом полезного действия и удельным расходом топлива.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

1. Опишите материалы, подвергаемые обжигу, и дайте краткую характеристику процессам, проходящим в них при обжиге.
2. Что подразумевается под понятием «режим обжига»?
3. В чем состоит значение режима обжига для качества продукции?
4. Опишите принципиальные схемы работы промышленных печей.
5. Каково значение выбранной аэродинамической схемы работы печи и как оно отражается на качестве готовой продукции?
6. Дайте краткую характеристику внешнему тепло- и массообмену в промышленных печах.
7. В чем заключается процесс массообмена при обжиге?
8. Опишите принцип возникновения градиента давлений в обжигаемом изделии.
9. Расскажите об усадочных явлениях и деформации изделий в процессе обжига.
10. Дайте понятие о напряженном состоянии изделий.
11. В чем суть напряженного состояния в процессе спекания?
12. Опишите возникновение напряженного состояния в результате перепада давлений.
13. Что такое напряженное состояние изделий в процессе охлаждения и что оно влияет на качество готовой продукции?
14. Расскажите о принципе составления структурной схемы, описывающей взаимодействие системы: материал — тепловая установка.
15. Дайте классификацию промышленных печей.

16. Опишите устройство и принцип работы гипсоварочного котла.

17. Охарактеризуйте принцип работы шахтных печей и проанализируйте технико-экономические показатели их работы.

18. В чем различие работы печей кипящего слоя для обжига извести от пересыпных?

19. Расскажите о принципе работы вращающейся печи для обжига керамзита.

20. Что такое процесс спекания и для какого материала он используется?

21. Перечислите печи для обжига изделий и сравните их по условиям обслуживания и технико-экономическим показателям?

22. В чем состоит принцип работы кольцевой печи?

23. Расскажите о принципе работы туннельной печи.

24. Чем отличаются щелевые печи от туннельных и в чем преимущество первых перед вторыми?

РАЗДЕЛ 8. ТЕПЛОВЛАЖНОСТНАЯ ОБРАБОТКА БЕТОНА И ЖЕЛЕЗОБЕТОНА

С целью ускорения твердения бетонных и железобетонных изделий их подвергают тепловлажностной обработке.

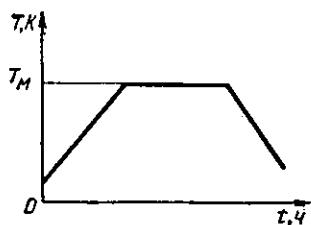
Тепловлажностная обработка таких изделий представляет собой их нагрев, при котором испарение влаги отсутствует или (в период твердения) происходит весьма незначительно. Такой процесс может происходить в условиях, когда парциальное давление водяных паров в теплоносителе $p'_т$ равно или больше парциального давления водяных паров вблизи поверхности материала $p'_м$, т. е. $p'_т \geq p'_м$.

ГЛАВА 12. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕПЛОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ БЕТОНА

Бетон — искусственный каменный материал, получаемый в результате затвердевания тщательно перемешанной и уплотненной смеси из вяжущего вещества, воды и заполнителей, взятых в определенных соотношениях. Свежесформованный или предварительно выдержанный после формирования бетон состоит из твердой, жидкой и газообразной фаз.

Твердая фаза состоит из капиллярно-пористой струк-

Рис. 12.1. Кривая тепловой обработки бетона в осях координат
 t — время; T — температура



туры, заполнителя (щебня, гравия, песка) и формирующейся структуры цементного камня. Цементный камень после затвердевания также представляет собой капиллярно-пористое тело с различными порами и капиллярами.

Жидкая фаза представлена химически, физико-химически и физико-механически связанной влагой. Влага заполняет все формирующиеся поры и капилляры, а также участвует в процессе гидратации. Поэтому количество влаги, связанной с материалом различными способами, все время меняется.

Газообразная фаза состоит из вовлеченного воздуха при перемешивании массы и формировании изделий. По данным НИИЖБ количество газообразной фазы в бетоне составляет 30—40 л/м³.

Рост структурной прочности сформованного бетона в естественных условиях и при тепловой обработке принято делить на три периода. Первый продолжительностью 2—4 ч характеризуется очень медленным нарастанием структурной прочности. Во втором периоде структурная прочность растет быстрее и может быть ускорена за счет тепловой обработки, третий — период стабилизации структуры.

Тепловую обработку бетона начинают обычно после 2—4-часовой выдержки сформованного изделия в цехе. В результате нагревания скорость реакций гидратации, а также возникновения новообразований возрастает, поэтому при тепловой обработке отпускную прочность бетона получают за 12—15 ч вместо 28 сут естественного твердения.

Тепловая, или, как ее чаще называют, тепловлажностная обработка бетона производится в тепловых установках и состоит в нагревании материала, его выдержке при заданной максимальной температуре и ох-

лаждении. Характерная кривая изменения температуры бетона, подвергаемого обработке, показана на рис. 12.1.

Загруженный в установку материал сначала нагревается до максимальной температуры T_m , равной температуре теплоносителя, выдерживается при этой температуре определенное время (необходимое для завершения химических реакций), затем охлаждается. Традиционным теплоносителем при тепловлажностной обработке является пар. Однако применяют и другие теплоносители (они рассматриваются далее).

12.1. Тепловлажностная обработка бетона паром

Внешний и внутренний тепло- и массообмен при тепловлажностной обработке бетона паром. Для его выяснения рассмотрим схему установки (рис. 12.2). В рабочее пространство 1 загружается изделие 2. В установку подается пар 3, а из нее выводится конденсат 4. Пар конденсируется на поверхности холодного изделия, образуя пленку, увлажняющую эту поверхность. Теплота парообразования при конденсации пара выделяется на поверхности изделия и нагревает его. Кроме того, пленка конденсата получает теплоту и от паровоздушной смеси (установка негерметична, и в ней находится воздух). Этот процесс рассмотрен в п. 4.6.2, его зависимость выражена формулами (4.36—4.40). Процесс взаимодействия пара с изделием, как уже указывалось, называют внешним тепло- и массообменом по отношению к изделию.

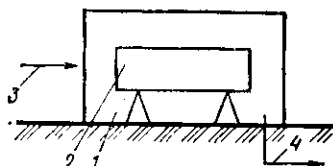
Удельный поток теплоты, передаваемый внутрь материала, описан формулой $q_T^v = -\lambda \nabla T + i q_m^v$ [см. (4.53)]. При твердении бетона выделяется теплота экзотермии цемента. Обозначим эту теплоту q_v (внутренний источник теплоты), тогда внутри материала на удельный поток теплоты (4.53) как бы накладывается и теплота экзотермии цемента. Отсюда распространение теплоты внутри изделия определяется уравнением

$$q_T^v = -\lambda \nabla T + q_v + i q_m, \quad (12.1)$$

Поток массы внутри материала определяется формулой $q_m^v = -a_m \rho_0 \nabla U - a_m \rho_0 \delta \nabla T - a_m \rho_0 \delta_p \nabla p$ [см. (4.54)].

Возникающие перепады влагосодержания, температуры и давления при тепловой обработке создают в материале напряженное состояние. Если формирующаяся

Рис. 12.2. Схема установки для тепловлажностной обработки бетона паром



структура материала, находящегося в напряженном состоянии, не может противостоять силе, с которой передвигается масса по порам и капиллярам, то эта структура (формирующаяся в бетоне) может разрушаться. Поскольку напряженное состояние и скорость передвижения массы увеличиваются при возрастании скорости нагревания, то необходимо выбирать такую скорость нагревания, при которой нарушения структуры будут минимальными.

Напряженное состояние в материале (изделии) при обработке его паром. Возникновение напряженного состояния в материале изложено в параграфе 4.8; здесь рассмотрим его несколько подробнее. Сформованное изделие 4 (рис. 12.3,а), находящееся в металлической форме 3, загружено в камеру 1. Форма установлена на подкладках 2. В камеру подается пар Π , и из камеры удаляется конденсат K . Выберем систему координат XU .

Представим модель изделия 4, находящегося в форме, в виде неограниченной пластины XU (рис. 12.3,б), которую вырежем в плоскости и обозначим днище формы поз. 5, а собственно изделие — поз. 4.

Изделие 4 в момент загрузки имеет влагосодержание U_0 (показано пунктиром). Пар конденсируется на открытой поверхности по оси Y и образует пленку конденсата b толщиной t , которая увлажняет открытую поверхность изделия. Влага начинает перемещаться за счет разности влагосодержания к центральным слоям по оси X . С нижней стороны, со стороны днища формы, влага тоже конденсируется, но через днище формы проникнуть не может, поэтому стекает в камеру.

Влага в изделии, как показано стрелкой на неограниченной пластине, движется от поверхности конденсации в сторону днища. Поэтому через какой-то промежуток времени произойдет перераспределение влагосодержания по пластине с учетом его увеличения за счет конденсации.

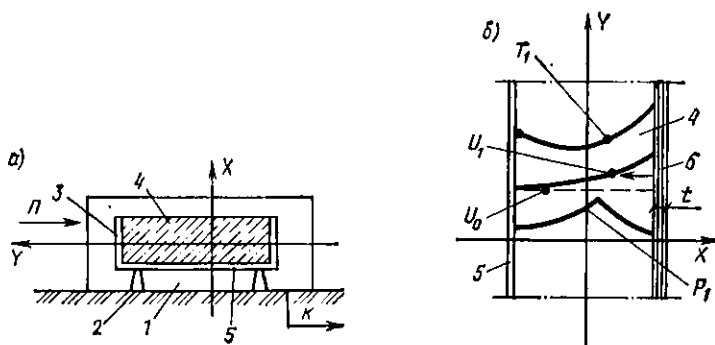


Рис. 12.3 Выбор направлений осей координат в установке для тепловлажностной обработки (а); схема условий тепло- и массообмена при нагревании на неограниченной пластине (б)

Выберем момент времени и будем рассматривать напряженное состояние, при котором влага еще не достигла нижнего слоя, и его влагосодержание осталось начальным, т. е. U_0 . Обозначим новое распределение влагосодержания U_1 и покажем эту кривую на рис. 12.3,б. Влага не может проникнуть в изделие со стороны дна, однако нагревание осуществляется с двух сторон.

Предположим, что на выбранный момент времени температурное поле в изделии распределилось по кривой T_1 . В материале возникнет избыточное давление (см. п. 4.7.2). Это давление характеризуется кривой P_1 (см. рис. 12.3,б). Температура материала со стороны пленки конденсата выше, чем со стороны дна формы. Давление, наоборот, со стороны пленки равно атмосферному, а со стороны дна несколько больше атмосферного (сопротивление возникает при соприкосновении изделия с дном).

Вырежем из неограниченной пластины (см. рис. 12.3,б) пластинку конечной длины l_0 и представим ее в тех же осях координат (рис. 12.4,а). Перенесем с неограниченной пластины на эту пластинку кривую, характеризующую распределение влагосодержаний U_1 , представим эту пластинку как состоящую из несвязанных полосок.

Сравнивая рис. 12.3,б и 12.4,а, отметим, что на поверхности пластинки, обращенной к дну, влагосодержание не изменилось. А при обработке изделия паром его влагосодержание увеличивается, и пластинка удли-

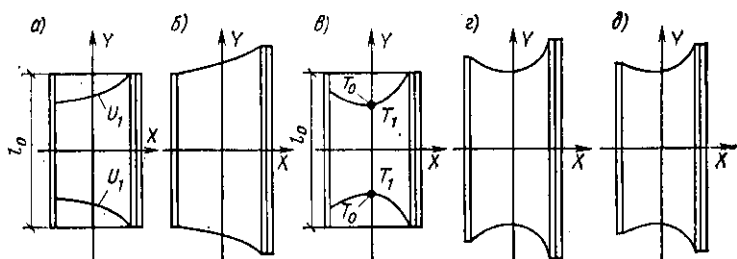


Рис. 12.4. Схема напряженного состояния в материале при нагревании его паром на примере пластины конечной длины

няется. Так как влагосодержание крайней к днищу пластинки в данный момент не изменилось, то и длина ее осталась прежней, равной l_0 . Длина всех остальных полосок увеличивается пропорционально показанному распределению влагосодержания, поэтому пластинка в рассматриваемый момент времени принимает конфигурацию, показанную на рис. 12.4,б. Такую же конфигурацию должно было принять изделие, если бы оно находилось в форме, и слои легко могли бы смещаться один относительно другого за счет разности их влагосодержаний.

Возьмем такую же пластинку (рис. 12.4,в) и на ней покажем распределение температуры T_1 в тот же момент времени. Поскольку пластинка состоит из не связанных между собой полосок, то каждая полоска в результате температурного перепада удлиняется.

Предположим, что в данный момент времени температура в центре — начальная, равная T_0 . Тогда длина центральной полоски останется прежней, а длина других полосок в зависимости от температуры будет больше (рис. 12.4,г). Аналогичную конфигурацию должно было бы приобрести и изделие, если бы оно не находилось в форме, и слои могли бы смещаться один относительно другого за счет разности температур. Так как при тепловлажностной обработке в результате разности влагосодержания и перепада температур происходит удлинение полосок, то общее удлинение пластинок можно представить их суммой (рис. 12.4,д).

В действительности изделие находится в форме, которая тоже расширяется при нагревании, и часть удлинения изделия будет компенсирована удлинением фор-

мы, однако остальная часть будет создавать напряженное состояние. Если вычислить сжимающие усилия на поверхностях и растягивающие в центре, затем по их значениям найти тангенциальные усилия, то можно определить напряженное состояние материала. Кроме того, в материале существует и перепад давлений, способствующий смещению слоев относительно друг друга.

Показанное возникновение напряженного состояния характерно для изделий при их обработке паром в открытых формах.

Из изложенного можно сделать вывод, что напряженное состояние в материале является функцией скорости его нагревания. Быстрое нагревание может привести к растрескиванию изделий с поверхности (что часто наблюдается в практике).

Здесь рассмотрено возникновение напряженного состояния в процессе нагревания изделий паром. Аналогичны причины возникновения напряженного состояния в изделиях при их охлаждении.

12.2. Обработка бетона газообразным теплоносителем

В качестве теплоносителя при тепловлажностной обработке бетона можно применять смесь продуктов сгорания топлива с воздухом и рециркулятом. Схема установки, состоящей из обычной ямной пропарочной камеры и индивидуального теплового генератора, показана на рис. 12.5.

Принцип работы такой установки заключается в следующем. Ямная пропарочная камера 5 загружается материалом и закрывается. После загрузки камеры включают тепловой генератор, состоящий из топочного устройства 1 и смесительной камеры 3. В топку 1 подают газ и воздух 2; смесь поджигается запальником. Продукты сгорания из-за отрицательного давления в системе, создаваемого вентилятором 7, поступают в смесительную камеру 3, где разбавляются наружным воздухом 10 и рециркулятом 9 до температуры порядка 390—400 К. Необходимая относительная влажность ϕ регулируется количеством подаваемого рециркулята 9.

Далее смесь 4 поступает в ямную камеру и путем естественной циркуляции и тяги вентилятора 7 проходит по камере, нагревая изделие 6, находящееся в форме. Отработанная смесь частично выбрасывается вентилято-

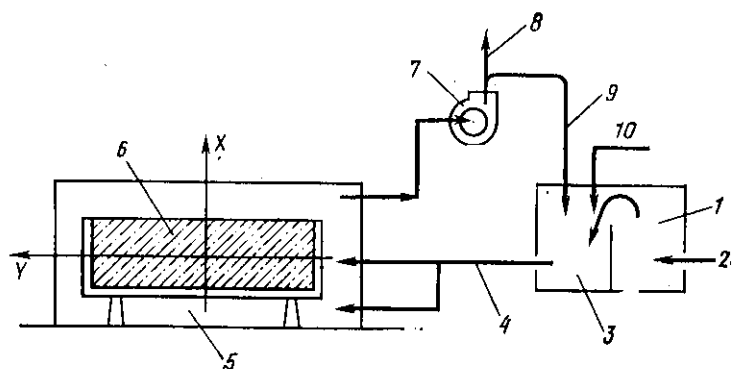


Рис. 12.5. Схема установки, состоящей из ямной пропарочной камеры и теплового генератора

ром 7 в атмосферу 8 (показано стрелкой), а частично, в зависимости от потребной относительной влажности ϕ , поступает на рециркуляцию 9 (показано стрелкой) в смесительную камеру 3.

Рассмотренный способ основан на принципе смешивания и подачи теплоносителя с индивидуальным регулированием согласно заданным режимам тепловой обработки изделий. После нагревания и изотермической выдержки изделия, как и в обычных ямных камерах, проходят стадию охлаждения наружным воздухом.

Тепло- и массообмен в установках, использующих газообразный теплоноситель, отличается от тепло- и массообмена, проводимого с помощью пара. Практически процесс тепловой обработки газообразным теплоносителем можно уподобить процессу сушки с регулируемым медленным испарением влаги с поверхности. Этот процесс — управляемый, он регулируется начальной относительной влажностью теплоносителя, который готовится в тепловом генераторе.

Внешний тепло- и массообмен для условий использования газообразного теплоносителя можно определять по формулам, применяемым для тепло- и массообмена при сушке: для передачи теплоты $q = \alpha_k (T_r - T_{пм})$, [см. (4.34)]; для массообмена $q_m = \beta_m (p'_{пм} - p'_r) (p/p')$ [см. (4.33)]. Все значения, указанные для этих формул, справедливы.

Балансовое уравнение теплоты для такого процес-

са можно описать формулой (4.35): $\alpha_k(T_r - T_{им}) = r\rho_0 R_v dU/dt - c\rho_0 R_v dT/dt$, где первый член: $r\rho_0 R_v dU/dt$ — часть удельного потока получаемой материалом теплоты, расходуемой на испарение влаги с поверхности изделия (регулируется начальной относительной влажностью ϕ и скоростью подачи теплоносителя). Второй член: $c\rho_0 R_v dT/dt$ — часть удельного потока теплоты расходуемой на нагревание материала (регулируется скоростью подачи теплоносителя).

Идея такого способа организации внешнего тепло- и массообмена сводится к тому, чтобы из материала удалить избыточную влагу, оставив необходимую на гидратацию вяжущего. Для уяснения сказанного рассмотрим и сравним единицу массы G_m теплоносителя, например, с начальной относительной влажностью $\phi = 60\%$ и с начальной относительной влажностью $\phi = 90\%$.

Если рассмотреть этот процесс в Id -диаграмме, то можно увидеть, что единица массы G_m с $\phi = 60\%$ ассимилирует влагу с поверхности в 4—5 раз больше, чем та же единица массы теплоносителя G_m с $\phi = 90\%$. Отсюда ясно, что регулирование относительной влажности теплоносителя ϕ в тепловом генераторе действительно позволяет изменять часть удельного потока теплоты ($r\rho_0 R_v dU/dt$), расходуемого на испарение влаги с поверхности изделия.

Внутренний тепло- и массообмен при тепловлажностной обработке газообразным теплоносителем также аналогичен внутреннему тепло- и массообмену при процессе сушки (см. п. 4.7.1). Однако в формулу (4.44), описывающую этот процесс, необходимо добавить внутренний источник теплоты q_v (экзотермия цемента); тогда указанную формулу можно записать в следующем виде:

$$q_T^B = -\lambda \nabla T + l q_m + q_v.$$

Такая зависимость рассмотрена в параграфе 12.1. Поток массы q_m внутри материала при тепловлажностной обработке аналогичен потоку массы внутри материала при сушке и записывается в виде

$$q_m^B = -a_m \rho_0 \nabla U - a_m \rho_0 \delta \nabla T - a_m \rho_0 \delta \rho \nabla p.$$

Все обозначения даны в п. 4.7.1. Следовательно, механизм внутреннего тепло- и массообмена для данного случая аналогичен рассмотренному в п. 4.7.2. Отличие будет за-

Рис. 12.6. Схема условий тепло- и массообмена при нагревании материала газообразным теплоносителем на неограниченной пластине

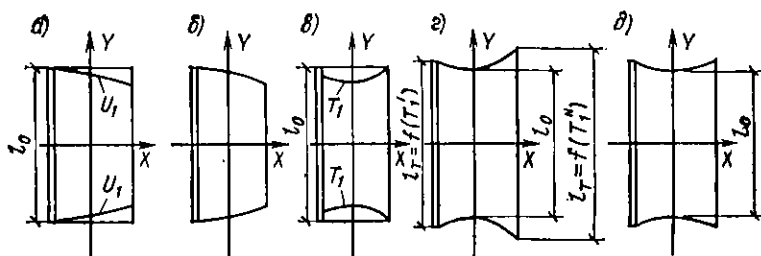
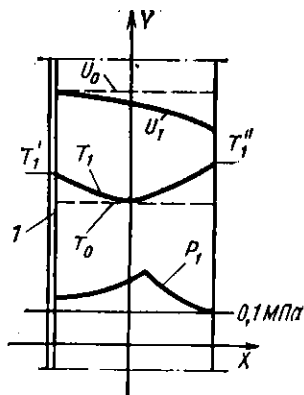


Рис. 12.7. Схемы напряженного состояния в материале при нагревании его газообразным теплоносителем на примере пластины конечной длины

ключаться в значительно меньшем перепаде влагосодержания между центром и поверхностью материала.

Напряженное состояние в материале при обработке его газообразным теплоносителем значительно отличается от напряженного состояния в материале при обработке его паром. Чтобы выяснить это отличие, нанесем на рис. 12.5 оси координат X Y и представим модель изделия в виде неограниченной пластины (рис. 12.6). Покажем на ней пунктирными линиями начальное распределение влагосодержания U_0 и начальную температуру T_0 (принимая одинаковую влажность и одинаковое распределение температуры по всему изделию). Днище формы изделия на модельной пластине показано цифрой 1.

В какой-то момент времени после начала нагревания распределение влагосодержания и температуры по поперечному сечению пластины вдоль оси X изменится. В материале появится избыточное давление. Так как удаление влаги идет только с открытой стороны изделия, а вторая закрыта днищем, то распределение влагосодержания может быть представлено кривой U_1 . Изделие нагревается сверху и снизу через днище (см. рис. 12.3,а). Учитывая, что коэффициент теплоотдачи сверху больше, чем на стороне, обращенной вниз, и снизу идет теплопередача через днище l , то кривая распределения температур T_1 будет несколько несимметрична (см. рис. 12.6).

Распределение избыточного давления в пластине (см. п. 4.7.2) может быть показано кривой p_1 , где на поверхности, обращенной внутрь установки, давление равно атмосферному (0,1 МПа). Далее (как и ранее) из неограниченной пластины (см. рис. 12.6) вырежем пластинку конечной длины l_0 и представим ее в тех же осях координат (рис. 12.7,а). Перенесем с неограниченной пластины на эту пластинку кривую, характеризующую распределение влагосодержаний U_1 . Также предположим, что пластинка состоит из несвязных полосок.

Аналогично рассуждая, можно установить, что вырезанная пластинка при удалении из нее влаги будет усаживаться. За граничное время берем такое, при котором влагосодержание слоя, соприкасающееся с днищем формы, измениться не успело. Поэтому пластинка на выбранный момент времени принимает конфигурацию, показанную на рис. 12.7,б. Такую же конфигурацию должно было принять и изделие, если бы оно не находилось в форме, и его слои могли бы смещаться один относительно другого.

Возьмем вторую такую же пластинку (рис. 12.7,в), и на ней покажем распределение температуры T_1 в тот же момент времени. Если опять вообразить, что пластинка состоит из несвязанных полосок, то длина каждой полоски в результате температурного перепада увеличится, т. е. $l_T = f(T'_1)$ (рис. 12.7,г). В данный момент температура в центре пока начальная, т. е. T_0 . В этом случае длина центральной полоски не изменится, а длина остальных увеличится, т. е. $l_T = f(T''_1)$.

Теперь представим результирующее состояние пластинки путем сложения усадочных сокращений и температурных удлинений. Как видно из рис. 12.7,д, они поч-

ти компенсируются, и конфигурация пластинки в окончательном виде приближается к ее конфигурации, взятой до начала тепловой обработки. Если учесть, что в результате перепадов давлений в материале создается такое же напряженное состояние, какое наблюдалось при обработке изделий паром (см. рис. 12.4), то сравнение говорит в пользу обработки изделий газообразным теплоносителем.

В действительности, изделие, как и в случае обработки его паром, также находится в форме, однако связь этого изделия с формой другая. Напряженное состояние (в случае использования газообразного теплоносителя) меньше, а стало быть меньше возможность растрескивания и нарушения структуры материала. Однако необходимо знать, что такое положение может достигаться хорошей регулировкой процесса испарения влаги путем поддержания необходимой относительной влажности ϕ теплоносителя.

Таким образом, наиболее эффективный способ тепловлажностной обработки бетона с точки зрения получения качественной продукции — обработка газообразным теплоносителем.

12.3. Тепловлажностная обработка бетона с помощью электронагрева

Для тепловлажностной обработки керамзитобетона широко применяется электронагрев ТЭНами (трубчатыми электронагревателями) в щелевых камерах.

Щелевая камера представляет собой установку 1, по которой движутся с определенным интервалом изделия в формах, снабженных скатами.

Остановимся на принципе тепловлажностной обработки, для чего в установку 1 поместим изделие 2 в форме (рис. 12.8). В установке монтируют трубчатые электронагреватели 3, которые подключаются в электрическую сеть. В результате инфракрасного излучения и конвективного теплообмена нагреваются изделие, форма, воздух, находящийся в камере, и собственно камера. Относительная влажность воздуха при нагревании снижается, и с поверхности изделия начинает испаряться влага.

В отличие от нагревания газообразным теплоносителем, который постоянно циркулирует по камере, здесь

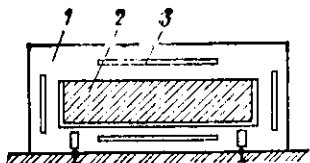


Рис. 12.8. Схема обработки изделия трубчатым электронагревателем

воздух не удаляется. Путем испарения влаги с поверхности изделий воздух насыщается влагой. Процесс испарения, постепенно сокращаясь, создает в камере при данной температуре среду насыщенного пара.

Ассимиляция влаги средой описывается формулой (4.33) ($q_m = \beta_m (p'_{\text{пм}} - p'_r) (p/p')$). Если процесс несколько упростить, рассматривая только процесс нагревания материала без участия в нем установки, то удельный расход теплоты на испарение влаги, нагревание изделия и окружающего воздуха может быть записан

$$q_r = r \rho_0 R_V dU/dt + c_p \rho_V dT/dt + c_1 \rho_B R'_V dT'/dt, \quad (12.2)$$

где r — теплота испарения; ρ_0 и ρ_B — соответственно плотность абсолютно сухого материала и абсолютно сухого воздуха; R_V и R'_V — соответственно отношение объема материала к его поверхности, с которой происходит испарение и отношение объема воздуха установки к поверхности материала, с которой происходит испарение; c и c_1 — соответственно теплоемкость материала и влажного воздуха; dU/dt — изменение влагосодержания материала во времени; dT/dt — изменение температуры изделия во времени; dT'/dt — изменение температуры паровоздушной смеси во времени.

Рассматривая уравнение (12.2), отмечаем, что если во всех камерах, где в качестве теплоносителя применяется пар, температура не достигает 373 К, то в камере с ТЭНами путем перегрева пара можно получить несколько большую температуру.

По натурным данным ВНИИжелезобетона известно, что общее количество испаряемой влаги для непрерывно работающей щелевой камеры составляет 50—60 кг на 1 м³ керамзитобетона.

Процесс внутреннего тепло- и массообмена при обработке бетона с помощью ТЭНов мало отличается от указанного обмена при тепловлажностной обработке бетона газообразным теплоносителем.

12.4. Электрофизические методы тепловлажностной обработки бетона

Развитие физики позволяет перейти к более рациональным, электрическим, методам нагревания бетона при его тепловлажностной обработке.

Омический — простейший метод такого нагревания (применяется только для неармированного бетона). Суть его состоит в том, что бетон включается в электрическую цепь тока промышленной частоты. Электроды применяют пластинчатые, полосовые, стержневые и струнные.

Пластинчатые электроды применяют при производстве сборного бетона. Они представляют собой пластины, целиком закрывающие противоположные (меньшие) стороны изделия. Полосовые применяют на строительных площадках или полигонах. Такие электроды закрепляют на определенных расстояниях один от другого на элементах опалубки или на накладных щитах. Стержневые электроды устанавливают в бетон или закрепляют на опалубке. Струнные применяют для обогрева длинномерных изделий, причем электроды закрепляют вдоль оси.

При омическом методе нагревания бетона из него выделяется теплота, определяемая по закону Джоуля — Ленца.

$$Q = 4,18 \cdot 0,864 I^2 R t, \quad (12.3)$$

где I — сила тока, А; R — электрическое сопротивление, Ом; t — время, ч.

При широко применяемом сквозном методе нагревания бетона пластинчатыми электродами выделяемая удельная электрическая мощность может быть определена по формуле

$$P = U^2 \cdot 10^{-3} / b^2 \rho_b, \quad (12.4)$$

где U — напряжение, В; b — расстояние между электродами, м; ρ_b — удельное электрическое сопротивление бетона, Ом·м.

Удельное электрическое сопротивление бетона — величина переменная, зависящая от расхода и состава цемента, пористости заполнителя, режима и условий твердения. Кроме того, удельное электрическое сопротивление бетона сильно изменяется от продолжительности его твердения в связи с изменением плотности, влагосодер-

жания и др. Ввиду сложности аналитического определения ρ_6 для предварительных расчетов, НИИЖБ рекомендует применять для бетонов на плотных заполнителях $\rho_6 = 5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, на пористых заполнителях $\rho_6 = 8 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Индукционный — один из наиболее эффективных методов нагревания бетона. Смысл его заключается в следующем: материал в металлической форме помещают в индуктор. В данном случае индуктором является камера, по которой проходит электрический ток. В металлической форме под действием магнитного поля наводится ЭДС индукции, которая вызывает возникновение вихревых токов, распространяющихся по сечению стенок формы и нагревающих их. Наибольшая температура развивается на поверхности формы. Появляется наиболее нагретый поверхностный слой, от которого путем теплопроводности теплота передается внутренним слоям формы и далее материалу.

Теоретически глубину проникновения вихревых токов d , см, определяют по формуле

$$d = 5030 \sqrt{\rho_{\Phi} / f \mu}, \quad (12.5)$$

где ρ_{Φ} — удельное электрическое сопротивление металлической формы, $\text{Ом} \cdot \text{м}$; f — частота тока, Гц; μ — коэффициент магнитной проницаемости.

Активная мощность P , выделяемая индуктором, определяется из формулы

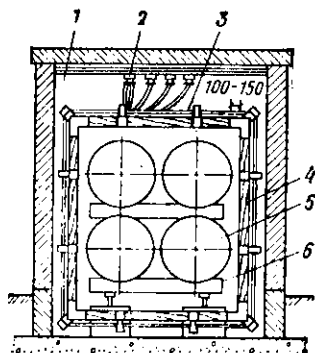
$$P = UI \cos \varphi, \quad (12.6)$$

где U — напряжение, В; I — сила тока, А; φ — коэффициент мощности системы.

По указанному методу Белорусским политехническим институтом совместно с Минским ДСК-1 была разработана полупромышленная индукционная камера для тепловлажностной обработки керамзитобетонных панелей, железобетонных труб и др. На рис. 12.9 представлена такая камера для тепловлажностной обработки железобетонных труб.

В камеру 1 на вагонетке 6 загружаются изделия в форме 5. Камера снабжена опорными изоляторами 2, на которых крепятся токоподводящие питающие индуктор шины. Вагонетка с формами, содержащими железобетонные трубы, попадает внутрь электромагнитной обмотки индуктора 3, состоящего из секций 4. За счет прохождения тока промышленной частоты напряжением

Рис. 12.9. Схема тепловлажностной обработки железобетонных труб индукционным методом



380/220 В в индукторе наводится переменное электромагнитное поле. Магнитный поток индуцирует в стальной форме ЭДС, вызывающую вихревые токи, от которых металлическая форма разогревается до 450—500 К в течение 2,5—3 ч. Теплообмен между разогретыми стенками и материалом происходит кондукцией.

Теплотехнический принцип работы такой камеры близок к принципу работы кассетных установок.

С точки зрения теплотехники индукционный метод можно применять и для индивидуального нагрева закрытых форм. В этом случае в поверхностях форм делаются пазы, куда укладывают обмотку индуктора с разъемными контактами для снятия крышки. При индивидуальном нагревании индукционным методом процесс гидратации и новообразования может проходить быстрее и с большим эффектом.

Рассмотренные электрофизические методы тепловлажностной обработки бетонных изделий, кроме омического, основаны на принципе нагрева поверхности изделия, от которой теплота за счет теплопроводности распространяется к его центральным слоям.

При омическом методе материал включается в электрическую цепь, и теплота неравномерно проходит по всей массе изделия. Эта неравномерность определяется различным удельным электрическим сопротивлением компонентов изделия. Поэтому омический метод в строительном производстве применения пока не нашел.

Диэлектрический отличается от всех рассмотренных методов. Суть этого метода состоит в том, что диэлектрик (изделие в форме) помещают в поле токов высокой

частоты. При этом молекулы диэлектрика, имеющие положительные и отрицательные заряды, пытаются ориентироваться в поле переменного тока, приходят в колебательное движение, размах которого зависит от структуры материала. Движение связанных зарядов молекул образует ток поляризации. Значения токов поляризации и проводимости определяют количество поглощенной энергии переменного тока, и, тем самым, количество теплоты в материале.

Диэлектрический метод позволяет передавать значительное количество теплоты внутрь изделия и тем самым прогревать его по всей массе с одинаковой скоростью без перепадов температур по поперечному сечению. Такое положение справедливо для однородного материала с одинаковым фактором потерь тока поляризации в любой точке материала. Однако бетон — неоднородный материал и, следовательно, его нагревание происходит неравномерно.

Диэлектрический метод иногда уподобляется нагреванию с внутренним источником теплоты. Так как поверхность изделия отдает часть теплоты в окружающую среду, то центральная часть изделия нагревается несколько больше, чем его поверхность, даже без учета теплоты экзотермии цемента. На практике при этом методе нагревания изделие помещают в обкладки конденсатора, к которым подводят ток высокой частоты (ТВЧ) от генераторов. Нагревание ТВЧ в промышленности экономически невыгодно и пока не применяется; затраты на диэлектрический метод в 2—3 раза превышают затраты на другие методы тепловлажностной обработки.

12.5. Система: материал — установка тепловлажностной обработки

Для анализа взаимодействия установки, в которой происходит тепловлажностная обработка материала, составляют структурную блок-схему по ранее рассмотренному принципу (см. рис. 4.19).

Поступающее на обработку изделие характеризуется физико-химическими параметрами, которые для этого процесса являются входными нерегулируемыми. К таким параметрам относятся: плотность ρ_0 , теплопроводность λ_0 , теплоемкость c_0 , влагосодержание U_0 , температура T_0 , марка цемента M_0 , содержание цемента

$G_{\text{ц}}$, определяющий размер (высота) h_0 , масса формы $G_{\text{ф}}$, водоцементное отношение В/Ц, прочностная характеристика R_0 и др.

Для определения режима тепловой обработки необходимо знать изменение прочностных характеристик, кинетику химических реакций новообразований, допустимые перепады температур при нагревании и охлаждении изделий, массопроводность материала и ее изменение в процессе тепловой обработки, а также характер пористости. Для характеристики возможных условий нагревания изделий в установке надо знать ее конструктивные особенности и их влияние на создаваемые режимы тепловой обработки.

Для организации процесса требуется знать используемый теплоноситель или источник нагревания, возможности регулирования параметров воздействия на материал теплоносителя и источников нагревания. Все приведенные регулируемые параметры должны быть отражены в составляемой блок-схеме.

В выходные параметры закладываются требования к изделию, выходящему из тепловой установки. В качестве таких требований могут быть оптимизация режимов тепловлажностной обработки по прочности получаемого материала, поиски наиболее экономичного расхода энергии, вопросы улучшения качества изделий, разработки новой конструкции тепловой установки и др.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

1. Какой процесс называют тепловлажностной обработкой и для каких целей он используется?

2. Назовите фазовый состав бетона и дайте его краткую характеристику.

3. Перечислите стадии тепловлажностной обработки бетона.

4. Дайте краткие характеристики внешнего и внутреннего тепло- и массообмена при тепловлажностной обработке.

5. Расскажите о напряженном состоянии бетона и назовите причины его возникновения.

6. В чем суть принципа применения газообразного теплоносителя для тепловлажностной обработки бетона?

7. Чем отличаются внешний и внутренний тепло- и массообмен при использовании газообразного теплоносителя от тех же процессов при использовании пара?

8. В чем суть напряженного состояния бетона при тепловлажностной обработке газообразным теплоносителем?

9. Сравните напряженное состояние, возникающее при тепловлажностной обработке изделий газообразным теплоносителем, с одноименным процессом при обработке изделий паром.

10. Чем отличается тепловлажностная обработка при использовании в качестве источников нагрева ТЭНов от аналогичной обработки с использованием пара?

11. Какие из электрофизических методов нагрева, применяемых при тепловлажностной обработке, известны вам?

12. В чем состоит омический метод нагрева?

13. В чем заключается индукционный метод нагрева?

14. Расскажите о диэлектрическом методе нагрева, его достоинствах и недостатках.

ГЛАВА 13. УСТАНОВКИ ТЕПЛОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ БЕТОНА

Тепловлажностная обработка бетона, железобетона и силикатных изделий является заключительной стадией технологического процесса, исключая отделку. Это — наиболее длительный и ответственный процесс технологии. Поэтому правильная организация такого процесса и выбор конструкции установок, в которых он протекает, во многом определяют качество готовой продукции.

Конструкции тепловых установок в зависимости от технологического назначения разнообразны. При изучении конструкций тепловых установок необходимо основное внимание обращать на создаваемые в них условия тепло- и массообмена, сравнивать их достоинства и недостатки.

13.1. Классификация установок для тепловлажностной обработки бетона

Установки для тепловлажностной обработки разделяют по следующим признакам:

1. *По режиму работы* — установки периодического и непрерывного действия. Первые, в свою очередь, делятся на установки, работающие при атмосферном давлении, и на установки, работающие при избыточном давлении. Установки непрерывного действия могут работать только при атмосферном давлении. Из установок периодического действия, работающих при атмосферном давлении, применяют камеры ямного типа, кассетные и пакетные установки, термоформы. В качестве установок периодического действия, работающих при избыточном давлении, используют автоклавы.

Установки непрерывного действия изготовляют в виде горизонтальных и вертикальных камер, в которых происходит непрерывное, а чаще импульсное передви-

жение изделий, подвергаемых тепловлажностной обработке.

2. По виду используемого теплоносителя или применяемых источников теплоты — установки, использующие водяной пар при атмосферном и избыточном давлениях, паровоздушную смесь, горячую воду, продукты горения топлива и электрофизические источники теплоты.

Кроме установок для тепловлажностной обработки бетонных изделий в технологии бетона применяют установки и устройства для подогрева и размораживания заполнителей бетона, разогрева бетонной смеси.

13.2. Установки периодического действия

Первыми установками периодического действия, предназначенными для тепловлажностной обработки бетона, были камеры ямного типа и туннельные. С развитием промышленности туннельные камеры периодического действия перестали применять, а ямные, претерпев некоторые изменения, продолжают использоваться в качестве основного типа установок (около 80% всех работающих) тепловлажностной обработки бетона.

Главный конструктивный недостаток ямной камеры заключается в системе загрузки изделий в камеру. Частое снятие крышек нарушает герметичность верхней части камеры, которая приводит к постепенному увеличению выбивания пара через неплотности. Решение поставленных перед строительной отраслью задач потребовало создания установок непрерывного действия. Наряду с ними используются периодически действующие установки: кассетные, пакетные, термоформы и др.

13.2.1. Камеры ямного типа

Простой и самой распространенной на предприятиях сборного бетона является пропарочная камера ямного типа. Эти камеры применяют на заводах и полигонах.

Изготавливаемая из железобетона пропарочная ямная камера имеет прямоугольную форму (рис. 13.1). Стены камеры 3 для уменьшения тепловых потерь делают комбинированными (конструкции стен, днища и крышки рассматриваются далее). По боковым стенам камеры установлены стойки с кронштейнами 4. В одной из боковых стен делается отверстие для забора воздуха 5

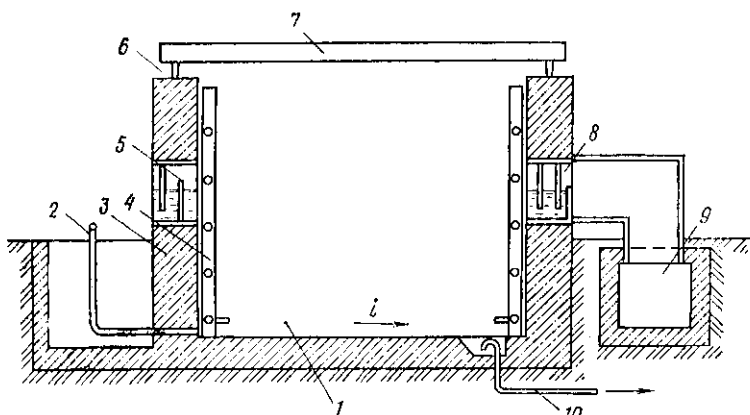


Рис. 13.1. Схема пропарочной ямной камеры

из атмосферы при охлаждении, снабженное водяным затвором. Сопряжение крышки 7 со стенками камер снабжено также водяным затвором 6. Для отбора паровоздушной смеси устроен канал 9, сообщаемый через водяной затвор 8 с системой вентиляции. В днище предусмотрена система отбора конденсата 10, пропускающая его и не пропускающая пар.

Для нагрева изделий через паропровод 2 в камеру подается пар. Камеры размещаются в технологических линиях и соединяются в блоки. Габариты камеры в плане соответствуют габаритам обрабатываемых изделий. Изделия размещаются в зависимости от размеров в один-два штабеля. Высота камеры 2,5—3 м. Для удобства обслуживания основная часть (до 3/4 высоты) камеры заглубляется в землю.

Принцип работы камеры заключается в следующем. С камеры 1 снимается крышка. Изделие в форме опускается краном в камеру и устанавливается на нижние кронштейны стоек 4 (см. рис. 13.1). Нагруженные кронштейны заставляют раскрыться следующий ряд и так далее. После загрузки камеры закрывается крышка, заполняются водяные затворы и начинают подавать пар. Изделия нагреваются (период прогрева) и выдерживаются (изотермическая выдержка) при достигнутой температуре.

В процессе прогрева и изотермической выдержки

пар конденсируется, отдает теплоту и в виде конденсата удаляется через систему 10. По окончании выдержки подача пара прекращается, и через канал 9 из камеры удаляется паровоздушная смесь. При этом вода в затворах вскипает и в виде паровоздушной смеси также удаляется. Через освободившийся от воды затвор 5, а также через затвор 6, соединяющий крышку со стенками, в камеру поступает воздух, который охлаждает изделия, сам нагревается и также удаляется в канал 9. После охлаждения изделий камера раскрывается, а изделия, набравшие 70—80 % марочной прочности, выгружаются из камеры краном.

Так как камера не является герметичной установкой, ибо и стены и затворы выдерживают очень небольшое избыточное или отрицательное давление, то в камере практически поддерживается атмосферное давление (0,1 МПа). При подаче пара в камеру в ней находился воздух, поэтому можно записать, что давление в камере p_k , равное атмосферному, складывается из парциального давления пара p'_n и парциального давления воздуха $p'_в$:

$$p_k = p'_n + p'_в = 0,1 \text{ МПа.} \quad (13.1)$$

Отсюда $p'_n = 0,1 \text{ МПа}$ — $p'_в$, т. е. парциальное давление пара менее атмосферного. Поэтому температура в ямной камере должна быть менее 373 К (100°C). В действительности максимальная температура в такой камере не превышает 358—365 К.

Необходимость экономии топливно-энергетических ресурсов заставила искать возможности снижения расходов пара на тепловлажностную обработку. В связи с этим ВНИИжелезобетона, КТБ Стройиндустрии и ПКТБ Главлестройматериалов предложены усовершенствования стенок, днища и крышек пропарочных камер, а также принципов подачи пара в камеры. Рассмотрим эти усовершенствования.

По данным ВНИИжелезобетона фактический коэффициент полезного использования тепловой энергии (КПИ) в пропарочных ямных камерах не превышает 20%. Вводя усовершенствования в конструкции, а также устранив утечки и выбросы пара, можно обеспечить увеличение КПИ до 85%. Для этого вместо днища из тяжелого бетона рекомендуется днище с воздушными прослойками (рис. 13.2).

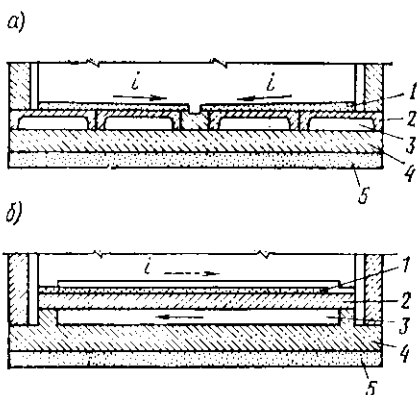
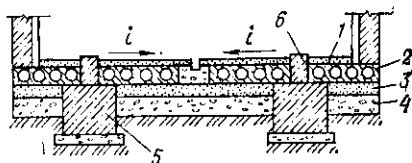


Рис. 13.2. Схемы конструкций дна ямной камеры с воздушными прослойками

а — днище с ребристыми плитами; б — днище с плоской плитой; 1 — цементная стяжка; 2 — ребристая (для а), плоская (для б) плита; 3 — воздушная прослойка; 4 — днище из керамзитобетона; 5 — песчаная подготовка

Рис. 13.3. Схема конструкции дна ямной камеры без воздушных прослоек

1 — цементная стяжка; 2 — керамзитобетонные плиты; 3 — песчаная подготовка; 4 — керамзитовый гравий; 5 — фундаментная опора; 6 — опорная балка



Основное днище 4 выполняется из керамзитобетона и кладется на песчаную подготовку 5. Над основным днищем, которое выполнено с уклоном к месту отбора конденсата, находится воздушная прослойка 3, перекрытая фальш-днищем. Уклон фальш-днища делается в обратном направлении для создания гидравлической петли из стекаемого конденсата в целях лучшего разделения находящегося в камере пара и удаляемого конденсата. При этом возможность «пролетного» пара в конденсатоотводящую систему резко снижается.

Предлагается и днище без воздушных прослоек (рис. 13.3). В конструкции такого дна роль теплоизолятора отведена керамзитобетонной пустотной плите в совокупности с подсыпкой из керамзитового гравия. Указанная конструкция является меньшим теплоизолятором, так как имеет опорные и фундаментные блоки.

Основным источником потерь теплоты в ямных камерах были массивные стены из тяжелого бетона. Значительное количество теплоты они отдавали в окружающую среду; много теплоты расходовалось на их разогрев; кроме того, теплота терялась при охлаждении и

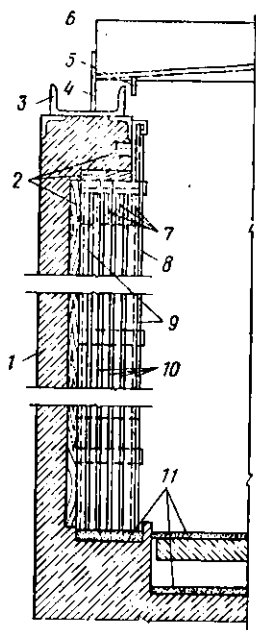


Рис. 13.4. Схема наружной стены ямной камеры с водяным затвором

1 — железобетонный каркас; 2 — закладные бруски; 3 — швеллер водяного затвора; 4 — опорное ребро водяного затвора (гидрозатвора); 5 — уплотняющее ребро; 6 — крышка камеры; 7 — деревянные прокладки; 8 — асбестоцементный лист; 9 — фольгоизол; 10 — экраны из стеклопластика; 11 — цементная стяжка

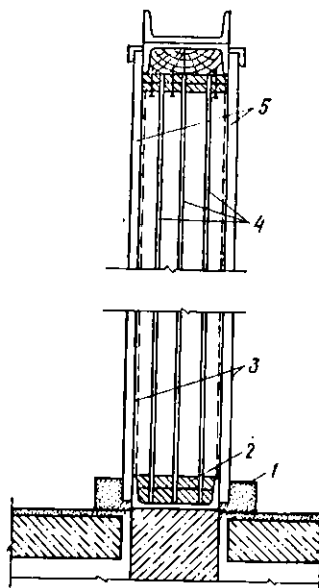


Рис. 13.5. Схема конструкции перегородочной стенки ямной камеры

1 — цементная стяжка; 2 — прокладки; 3 — фольгоизол; 4 — экраны; 5 — металлический каркас

разгрузке камер. Поэтому для стен ямной камеры предложены легкие теплоизолирующие конструкции (рис. 13.4). Наружная стена камеры состоит из железобетонного каркаса 1, на котором монтируются экраны 10 с воздушными прослойками. Шаг прослоек регулируется деревянными прокладками. Вся конструкция экранов с обеих сторон гидроизолируется фольгоизолом, по которому прокладывается асбестоцементный лист 8. Претерпел изменения и гидрозатвор, для уплотнения кото-

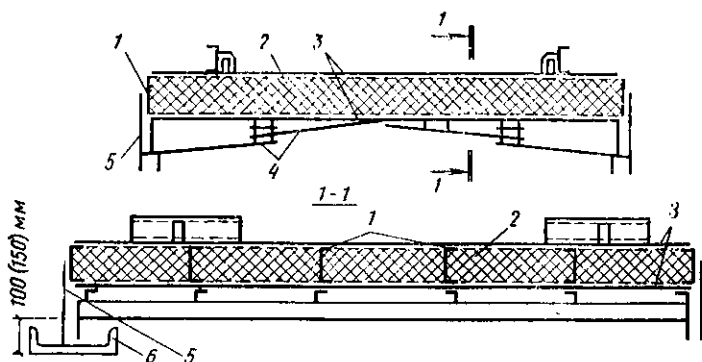


Рис. 13.6. Схема конструкции плоской крышки ямной камеры
 1 — металлический каркас; 2 — минераловатная плита; 3 — нижняя и верхняя стальные обшивки; 4 — стальные экраны; 5 — опорное ребро; 6 — швеллер гидравлического затвора

рого кроме опорного ребра 4 введено дополнительное уплотняющее ребро 5.

На рис. 13.5 показана схема конструкции перегородочной стенки, применяемая при блокировке камер. Стенка имеет металлический каркас 5 с обязательным антикоррозионным покрытием. Внутри каркаса устроена изоляция, состоящая из трех стеклопластиковых экранов. Экраны изолируются от среды с двух сторон фольгоизолом 3.

Кроме того, разработаны разделительные стенки с бетонным каркасом и экранной изоляцией. Для внутренних и наружных стен с экранной изоляцией разработаны конструкции с металлической изоляцией. Рассмотренные стеновые конструкции обладают малой массой, хорошей теплоизоляционной способностью и почти не аккумулируют теплоту.

Претерпели изменение и конструкции крышек ямных камер. Значительно увеличилась толщина теплоизоляционного слоя. Плоские крышки (рис. 13.6) снабжаются стальным экраном для стока конденсата в гидравлический затвор и для предохранения поверхности изделия от попадания конденсата. Глубина швеллера 6, используемого в качестве гидравлического затвора, не менее 100 мм (а в большинстве случаев доводится до 150 мм).

Все рассмотренные конструктивные изменения в зна-

чительной мере увеличивают количество полезно используемой теплоты на тепловлажностную обработку изделий. Однако основной недостаток, заложенный в конструкции ямной камеры, продолжает оставаться. При загрузке изделий в камеры краном они ударяются о борта камеры, о гидравлический затвор, постепенно нарушая герметизацию. Пар начинает выбивать через неплотности, и его расход через определенное время начинает возрастать.

Одним из условий рационального расходования пара на тепловлажностную обработку изделий в ямных камерах, а также на создание равномерного нагревания этих изделий является организация подачи пара. Как правило, в качестве паропровода используют кольцевую перфорированную (с отверстиями через 100—150 мм) трубу, проложенную по основанию периметра камеры. В этом случае по высоте камеры наблюдается неравномерное температурное поле, которое приводит к неодинаковому нагреванию изделия, а значит и к разной прочности. В одном месте изделие получило 80% прочности марочной, в другом 60%, в третьем 40%. Все это заставляет удлинять сроки тепловой обработки и увеличивать удельные расходы пара. Поэтому организации подачи пара в ямные камеры уделяется большое внимание.

Существуют различные схемы снабжения паром ямных камер. На рис. 13.7 показана схема паропровода с вертикальными стояками конструкции Гипростроммаша. Пар от магистрали через подводящий паропровод 1 подается в камеру. Регулировка подачи пара осуществляется вентилем 3. Пар поступает в горизонтальный разводящий паропровод 5, расположенный по нижнему периметру камеры, откуда попадает в стояки 6, где через перфорации (отверстия) под небольшим избыточным давлением поступает в камеру. Такая подача пара создает циркуляцию, позволяющую уменьшить неравномерность прогрева изделий.

Более рациональная система снабжения паром ямных камер разработана Киевским инженерно-строительным институтом (КИСИ). Идея этой системы заключается в интенсификации циркуляции пара (рис. 13.8), для чего предусмотрена основная ветвь подачи пара из магистрали, снабженная регулятором 3; обводная ветвь включается в случае отказа регулятора 3. Обе

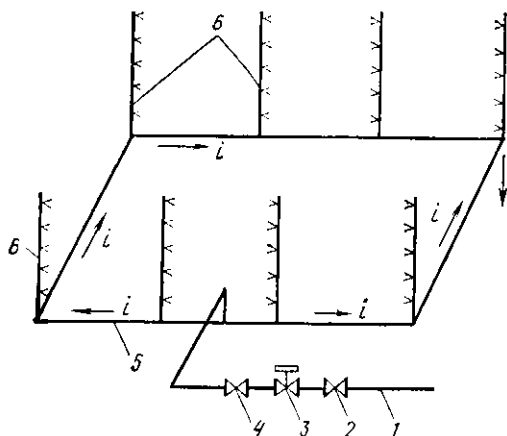


Рис. 13.7. Схема паропровода с вертикальными стояками конструкции Гипростроммаша

1 — паропровод; 2, 4 — вентили; 3 — регулирующий вентиль; 5 — горизонтальная разводка; 6 — перфорированные стояки

магистралей снабжены запорными вентилями 2, для включения их в работу отдельно.

По магистрали пар разводится в нижний и верхний паропроводы — коллекторы, расположенные по противоположным стенам камеры и снабженные соплами 7. В нижнем коллекторе, находящемся на уровне $0,2—0,3h$ (высоты камеры) сопла направлены вверх и создают циркуляцию по ходу выброса пара. Верхний коллектор расположен на высоте $0,7—0,8h$. В нем сопла направлены вниз. Такое расположение сопел создает достаточную циркуляцию для равномерного нагрева изделий. Паропровод 4 снабжен съемной дроссельной шайбой для стока конденсата, образующегося при транспортировке пара.

Схема рационального парораспределения с внешним эжектором разработана для ямных камер ЦНИИС Минтрансстроя СССР (рис. 13.9). Принцип ее работы заключается в следующем. Пар из паровой магистрали 5 подается через регулирующий клапан 6 в эжектор 7, а затем в верхние раздаточные коллекторы 1 с соплами 2, направленными вниз. В нижней части камеры создается эжектором отрицательное давление, которое заставляет паровоздушную смесь засасываться в пер-

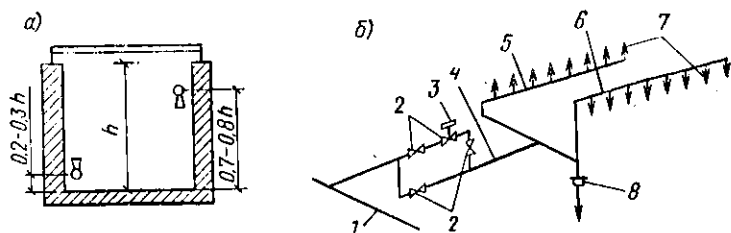


Рис. 13.8. Схема парораспределения в камере системы КИСИ

а — камера в разрезе; *б* — парораспределение; 1 — подача пара; 2 — вентили; 3 — регулятор; 4 — подводящий паропровод; 5, 6 — нижний и верхний паропроводы с соплами; 7 — сопла; 8 — съемная дроссельная шайба

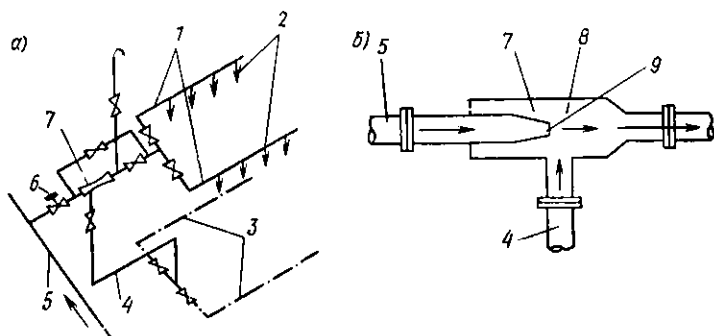


Рис. 13.9. Схема парораспределения с внешним эжектором

а — схема паропроводов; *б* — схема эжектора

форированные трубопроводы 3. Тем самым в камере создается необходимая циркуляция паровоздушной смеси.

Отобранная паровоздушная смесь поступает в перфорированные трубопроводы 3 внизу камеры через трубопровод 4, а затем в эжектор 7 и за счет давления, созданного паром, выбрасываемым через сопло 9, эжектируется в смесительную камеру эжектора 8. В смесительной камере свежий пар смешивается с паровоздушной смесью и поступает в коллекторы 1 для подачи в камеру через сопла 2.

Рассмотренная схема, как и предыдущие, позволяет создать необходимую циркуляцию в камере и повысить равномерность обработки бетона.

Для тепловлажностной обработки шлакобетонных

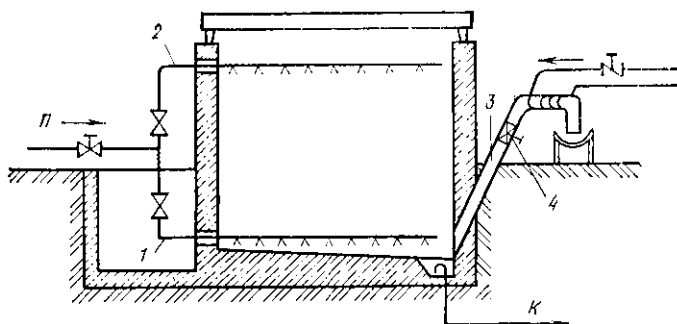


Рис. 13.10. Схема пропарочной камеры, работающей в среде чистого пара (вентиляционное устройство и траверсы не показаны)

изделий необходима температура порядка 373 К. В ямных камерах она может быть достигнута при следующем принципе организации снабжения пара (рис. 13.10). Камера оборудуется нижней 1 и верхней 2 раздачей пара, кроме этого, устраивается труба 3 с запорным вентиляем 4, снабженная змеевиком с проточной холодной водой. В камеру подается пар P , а из нее удаляется конденсат K . После загрузки камеры включается нижняя перфорированная труба 1, закрывается вентиль подачи пара в верхнюю трубу и вентиль 4 на трубе 3. Камера и изделия одновременно нагреваются до температуры порядка 355—360 К.

Общее давление в камере атмосферное ($\approx 0,1$ МПа); оно складывается из парциального давления пара $p'_п$ и парциального давления воздуха $p'_в$. При достижении температуры 355—360 К отключают нижнюю подачу пара и включают верхнюю. Пар начинает поступать в верхнюю часть камеры.

Открывают вентиль, и паровоздушная смесь начинает через трубу 3 вытесняться из камеры. Воздух выходит в цех, а пар вследствие охлаждения трубы 3 холодной водой конденсируется и стекает по желобу. Как только вся паровоздушная смесь будет вытеснена из камеры, термометр у устья трубы 3 покажет 373 К. Тогда вентиль 4 закрывают. Следовательно, весь воздух из камеры вытеснен; в ней находится чистый пар ($p_п \approx \approx 0,1$ МПа). Дальнейший процесс аналогичен процессу обработки изделий в ямной камере.

Пропарочные ямные камеры работают по циклу

12—15 ч. Цикл включает время на загрузку, разогрев изделий, изотермическую выдержку при максимальной температуре, охлаждение и выгрузку изделий. Удельный расход пара в ямных камерах колеблется в зависимости от их состояния. Средний удельный расход пара составляет 250—300 кг/м³ бетона. В хорошо оборудованных и правильно эксплуатируемых камерах удельный расход пара может быть снижен до 130—150 кг/м³ бетона.

13.2.2. Кассетные установки

Кассетные установки предназначены для формирования и тепловлажностной обработки панелей, ребристых плит, лестничных маршей и других изделий. Изделия формируются в вертикальном положении. Форма-кассета (рис. 13.11) состоит из отсеков, образованных стальными вертикальными стенками 3. Отсеки 4, используемые для формирования изделий, чередуются с нагревательными отсеками 2, куда подается пар. После загрузки и виброформования изделия подвергают тепловой обработке, для чего пар подают в отсеки 2 и с двух сторон прогревают сразу два изделия, разделенные стальной перегородкой.

Теплообмен между паром и изделиями осуществляется через стальную стенку 3. Пар нагревает ее, а от нее контактным способом нагревается изделие. К центральным слоям изделия теплота проникает за счет теплопроводности. Режим работы кассет составляет 6—8 ч. За это время изделия нагреваются и выдерживаются при максимальной температуре 360—365 К, после чего кассету разбирают, а изделия с прочностью 50—60% проектной отправляют в яму-камеру. В яме-камере изделия ставятся вплотную одно к другому, поэтому они медленно охлаждаются (15—20 ч), набирая прочность.

Равномерный прогрев изделий через стенку из-за расслоения температур пара по высоте затруднен, поэтому прибегают к эжекторному снабжению пара. Пар с помощью внешнего эжектора забирает часть паровоздушной смеси из трубопровода, соединенного с верхней частью парового отсека, и, смешиваясь с ней, поступает в нижнюю часть парового отсека. Такая циркуляция

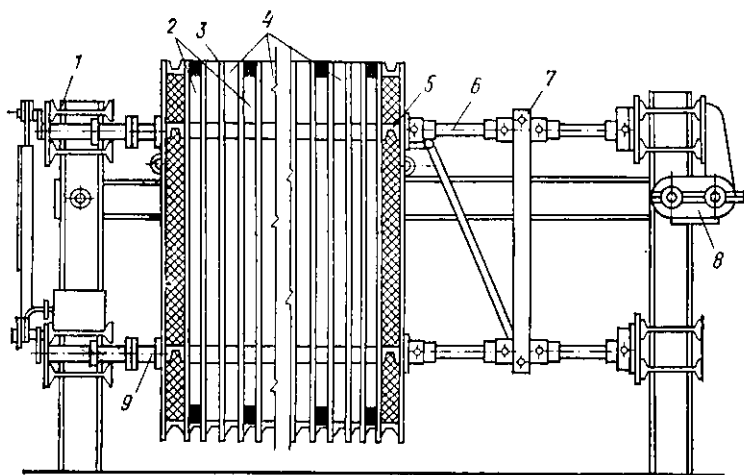


Рис. 13.11. Схема кассетной установки

1 — станина; 2 — отсеки для подачи пара; 3 — разделительная стенка; 4 — отсеки для формования изделий; 5 — теплоизолирующие стенки; 6 — фиксирующие упоры; 7 — механизм сжатия; 8 — приводной механизм; 9 — упорный дожимной винт

смеси позволяет нагревать изделия в кассетах сравнительно равномерно.

Удельный расход пара в кассетах составляет 150—250 кг/м³.

13.2.3. Пакетные установки

Для бескамерной тепловлажностной обработки бетонных изделий применяют пакеты термоформ. Термоформы переоборудуют из обычных стальных форм, приваривая к каркасу поддона стальной лист. Образующийся под формой отсек используют как нагревательный. В него вваривают два штуцера (патрубка), к которым с помощью гибких шлангов подсоединяют подачу пара и отбор конденсата. Для двухстороннего нагрева изделия в формах необходимо поставить в штабель одно на другое. Установку в штабель осуществляют с помощью специального устройства — пакетирующего (рис. 13.12).

Пакетирующий состоит из стола-траверсы 1, четырех гидродомкратов 2, направляющих колонн 3 и четырех

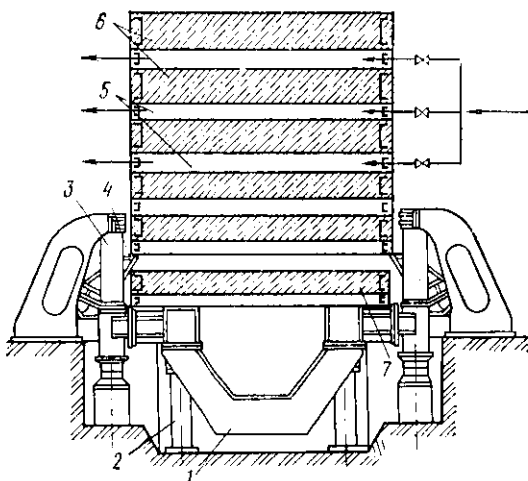


Рис. 13.12. Схема пакетирующего пресса

упоров-отсекателей 4. На стол-траверсу ставят термоформу с изделием 7, подготовленную к тепловой обработке. Включают гидродомкраты, которые поднимают стол-траверсу несколько выше упоров-отсекателей. При этом упоры-отсекатели утапливаются. После прохождения формы вверх упоры-отсекатели под действием эксцентрично приложенной силы собственной массы возвращаются в раскрытое положение. Далее стол опускают, а термоформа остается на упорах-отсекателях. Следующая форма поднимается аналогично и поднятая ранее оказывается на ней.

Пакетирующий пресс рассчитан на одновременную обработку шести форм. Пар подключается к каждому отсеку поддона формы 5 с помощью гибких шлангов. Также отводится конденсат. Изделия 6 в формах проходят постепенно снизу доверху и загружаются с интервалами. Поднимают температуру до 360—365 К за 2 ч; регулируют подачу пара по заданной программе автоматическим регулятором. Расход пара в таких установках составляет 250—300 кг/м³ бетона.

13.2.4. Автоклавы

Автоклав — герметически закрывающийся сосуд цилиндрического типа, предназначенный для тепловлажностной обработки изделий паром под давлением 0,8—1,3 МПа. Внутренний диаметр автоклава 3,6 м, длина его корпуса 21 м. На рис. 13.13 показана схема автоклава, состоящего из корпуса 1 и его оборудования. Он оборудуется двумя быстро закрывающимися крышками 2, механизмом для закрывания и открывания крышки 3, двумя предохранительными клапанами 4 и патрубком для перепуска пара 5. Через патрубок ввода пара 12 пар поступает в смонтированную перфорированную трубу 6 и через перфорации попадает в автоклав. Патрубок 7 предназначен для вывода конденсата, а патрубок 10 — для подсоединения к вакуум-системе. Автоклав устанавливают на подвижные опоры 11 и на одну неподвижную опору 8. По автоклаву проложены рельсы 9, по которым закатывается поезд вагонеток с изделиями.

Производительность автоклава характеризуется продолжительностью цикла работы и количеством загружаемой продукции. Поэтому стремятся максимально увеличить число изделий на вагонетках. Отношение объема загруженного материала в автоклав к объему автоклава называют коэффициентом заполнения K . Цикл работы автоклава складывается из времени на загрузку и выгрузку изделий, а также на их тепловую обработку.

Тепловая обработка делится на периоды: период подъема температуры, период изотермической выдержки (в эти периоды в автоклав подается пар) и период охлаждения, когда пар из автоклава постепенно удаляется. После охлаждения открывают крышки, поезд с готовой продукцией из автоклава выкатывается, автоклав подвергается чистке, и цикл повторяется.

Цикл работы автоклава для различных материалов длится 12—18 ч. Учитывая, что в автоклаве поддерживается высокое давление (0,8—1,3 МПа), эти установки относят к агрегатам повышенной опасности. Удельный расход пара в автоклавах велик и составляет 300—400 кг/м³ плотных изделий.

Для снижения энергоемкости процесса автоклавирования применяют перепуск пара из автоклава, где за-

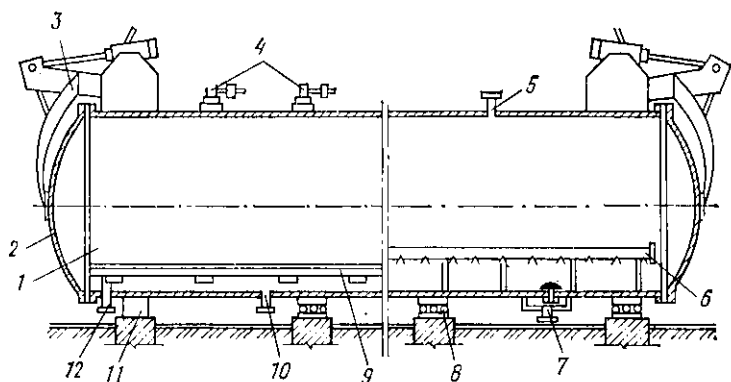


Рис. 13.13. Схема автоклавной установки

кончена изотермическая выдержка, в другой автоклав, где происходит подъем температуры. Иногда устанавливают в качестве дополнительной емкости старый автоклав, и пар, если его некуда перепускать, подают в эту емкость, а при необходимости пар отсюда подают в автоклав.

Например, чтобы из автоклава пар передать в дополнительную емкость, поступают следующим образом. В нее закачивают некоторое количество горячей воды, и трубу, по которой идет перепуск пара, опускают в горячую воду. Пар при этом конденсируется, а его объем уменьшается почти в 10 раз. Таким образом, в дополнительной емкости находится конденсат под определенным давлением. При передаче этого конденсата в загруженный автоклав он (попадая в среду с меньшим давлением) снова вскипает, превращаясь в пар. Такой перепуск пара дает возможность экономить до 10—15% свежего пара, удельный расход пара снижается до 270—350 кг/м³ бетона.

13.3. Установки непрерывного действия

Как указывалось, с развитием механизации и автоматизации строительного производства для тепловлажностной обработки бетонных изделий стали применять установки непрерывного действия. При их использовании значительно возрастает производительность труда и улучшаются условия труда.

Из пропарочных установок непрерывного действия в промышленности строительных материалов широко применяются горизонтальные щелевые различных типов и вертикальные камеры.

13.3.1. Горизонтальные щелевые пропарочные камеры

Горизонтальная щелевая пропарочная камера представляет собой туннель длиной 80—100 м. Ширина туннеля проектируется в расчете на движение через него одного-двух изделий, загружаемых в один ряд на каждой форме-вагонетке, и составляет 5—7 м, а высота туннеля 1—1,5 м. В зависимости от длины камеры в ней размещается 12—25 вагонеток с изделиями.

Горизонтальная щелевая пропарочная камера (рис. 13.14) работает по следующему принципу. Форма-вагонетка с отформованным изделием 1 поступает на снижатель 2, который опускает форму-вагонетку на уровень рельс, проложенных в камере. Камера в целях уменьшения площади цеха, занятой под технологический процесс, заглублена в землю. Снижатель 2 оборудован толкателем вагонетки в камеру. Вагонетка проходит под механической шторой 3 и проталкивает весь поезд вагонеток по камере 4 на одну позицию. Вагонетка, находящаяся на последней позиции, поднимает герметизирующую штору 5, выкатывается на подъемник 6, который поднимает вагонетку с готовой продукцией на уровень пола цеха и скатывает ее на рельсовый путь. Загрузка и выгрузка вагонеток происходит с интервалом.

Время нахождения вагонетки в щелевой пропарочной камере соответствует времени тепловой обработки. Изменяя интервал загрузки, можно менять время тепловой обработки изделий. По длине l камеру условно делят на три зоны. Первая, начиная от места загрузки, является зоной нагревания l_I , вторая зона, где материал выдерживается при достигнутой в зоне нагревания температуре, называется зоной изотермической выдержки l_{II} , в третьей зоне l_{III} проходит охлаждение материала. В зоне нагревания и зоне изотермической выдержки в качестве теплоносителя используется пар. Для нагревания этих зон могут применяться и такие источники, как ТЭНы и индукторы.

Изделия охлаждают наружным воздухом. Для дви-

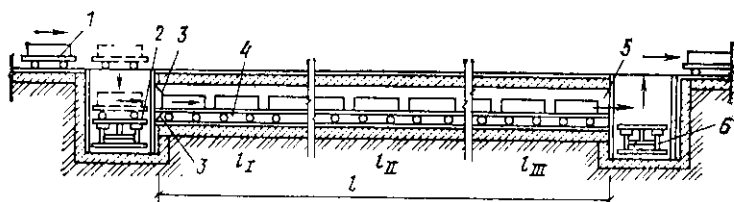


Рис. 13.14. Схема горизонтальной щелевой пропарочной камеры

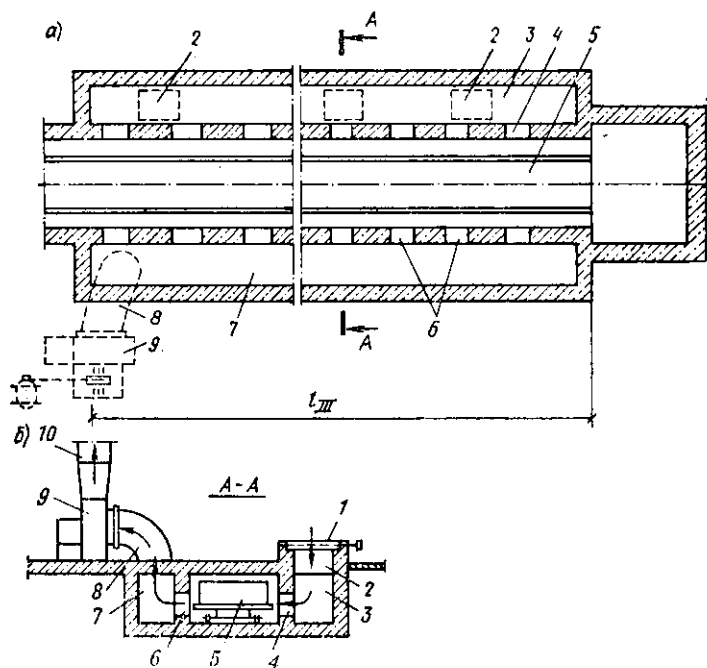


Рис. 13.15. Схема зоны охлаждения горизонтальной щелевой пропарочной камеры
а — план; б — разрез

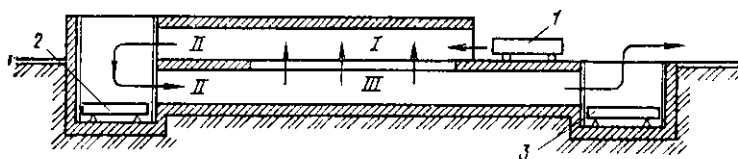


Рис. 13.16. Схема двухъярусной щелевой пропарочной камеры
1 — изделие в форме вагонетки; 2 — снижатель; 3 — подъемник; I—III — соответственно зоны нагревания, изотермической выдержки и охлаждения

жения наружного воздуха зона охлаждения с каждой стороны оборудуется дополнительными каналами. Схема зоны охлаждения, отличающаяся только паличем боковых каналов, показана на рис. 13.15.

В одном из боковых каналов 3 зоны охлаждения устраивают две-три заборные шахты 2, снабженные жалюзийными решетками 1 для регулирования количества забираемого наружного воздуха. Воздух через шахты 2 поступает в канал 3, откуда через окна 4 поступает в зону охлаждения, отбирает теплоту от изделий 5. Огретый (нагретый) воздух через окна 6 попадает в канал 7, из которого через патрубок 8 забирается вентилятором 9 и через трубу 10 выбрасывается в атмосферу.

При использовании пара для его подачи применяют двухсторонние стояки-коллекторы, причем их первая пара размещена на расстоянии 18—20 м от входа в камеру. Стояки располагают с шагом 3—6 м и заканчивают их установку на расстоянии 35—40 м от выгрузочного конца камеры. Чтобы исключить попадание пара в зону охлаждения, на границе зон выдержки и охлаждения устраивают воздушную завесу. Максимальная температура в камере при использовании пара достигает 353—358 К. Удельный расход пара составляет 150—200 кг/м³ бетона.

Применение ТЭНов поднимает максимальную температуру в камере до 390—400 К за счет перегрева пара. ТЭНы в виде блоков начинают размещать на расстоянии 8—10 м от загрузочного конца камеры и заканчивают в конце зоны изотермической выдержки. Удельный расход электрической энергии в пересчете на пар также составляет 150—200 кг/м³. Камеры с ТЭНами используются для тепловой обработки керамзитобетонных изделий.

Существует много разновидностей щелевых камер. Самая распространенная — двухъярусная щелевая пропарочная камера (рис. 13.16). Работа такой камеры почти не отличается от рассмотренной. Единственное ее преимущество — более простая компоновка технологического процесса по дозировке и формовке изделий, так как загрузка их в камеры и выгрузка из нее значительно сближены. Разновидностью щелевой пропарочной камеры является зона термообработки вибропркатного стана.

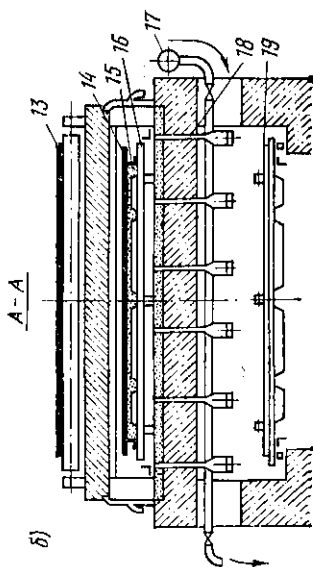
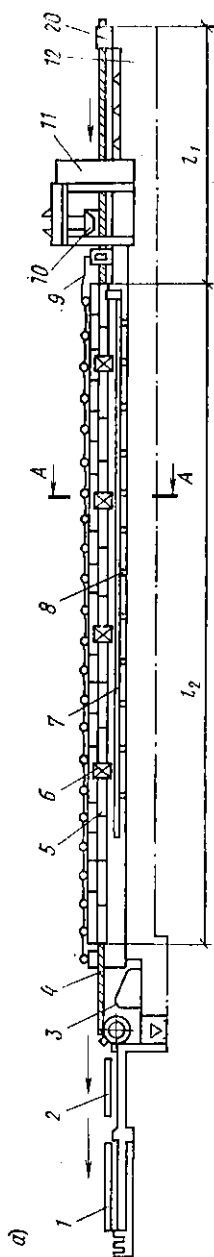


Рис. 13.17. Схема вибропрокатного стана

с — продольный разрез; 6 — поперечный разрез; 1 — опрокидыватель; 2 — обгонный ролик; 3 — приводная станция; 4, 16 — формующая лента; 5 — шестая камера; 6 — смотровые окна; 7 — трубопровод раздачи пара; 8 — отводящий паропровод; 9 — натяжная станция; 10 — фундамент; 11 — стан; 12 — бетоносмеситель; 13 — паропровод; 14 — соответствующая верхняя и нижняя ветви; 15 — паропровод для подвода пара; 16 — паропровод; 17 — нижняя ветвь, формирующая ленту; 18 — паропровод; 19 — верхняя ветвь, формирующая ленту; 20 — натяжная станция

Вибропрокатные станы применяются для непрерывного формирования и тепловлажностной обработки железобетонных изделий (рис. 13.17). Стан как бы делится на две части: формующую вместе с подготовительными операциями l_1 и щелевую пропарочную камеру l_2 ; длина этой камеры 50—60 м.

Пар поступает по паропроводу 17, и через трубопровод 7 пар раздается в патрубки 18, подводящие его в камеру и под верхнюю ветвь формующей ленты. Изделие сверху закрывают лентой 4. Подача пара регулируется, поэтому скорость нагревания можно изменять (на заводах камеры нагревают до 365 К за 1,5—2 ч).

Изделие из щелевой пропарочной камеры поступает на обгонный роликовый конвейер 2 и далее на опрокидыватель 1. Затем в вертикальном положении его устанавливают на складе готовой продукции. Удельный расход пара для щелевых пропарочных камер стана составляет 300—350 кг/м³ бетона.

При проектировании вибропрокатных станков предусматривалась общая продолжительность тепловлажностной обработки 2 ч, однако на работающих предприятиях она составляет 3—5 ч.

13.3.2. Вертикальные пропарочные камеры

С целью уменьшения площадей, занимаемых горизонтальными щелевыми камерами, а также чтобы поднять температуру нагревания до 373 К, разработана вертикальная камера, одна из модификаций которой показана на рис. 13.18.

Работа вертикальной камеры заключается в следующем. Изделие 1 движется в форме по приводному роликовому конвейеру 2, затем с помощью концевых выключателей останавливается на позиции 3 (см. пунктир) в камере 4, состоящей из бетонной коробки 5, покрытой слоем теплоизоляции 6. Коробка закрыта бетонной герметичной крышкой 7. Концевые выключатели включают в работу загрузочные гидродомкраты 14, которые поднимают форму с изделием, утапливая защелки 13. Поднимая форму несколько выше защелок, гидродомкраты поднимают и весь штабель изделий, находящийся на загрузочной стороне. При этом защелки возвращаются в рабочее положение, а гидродомкраты начинают двигаться вниз, опуская весь штабель на за-

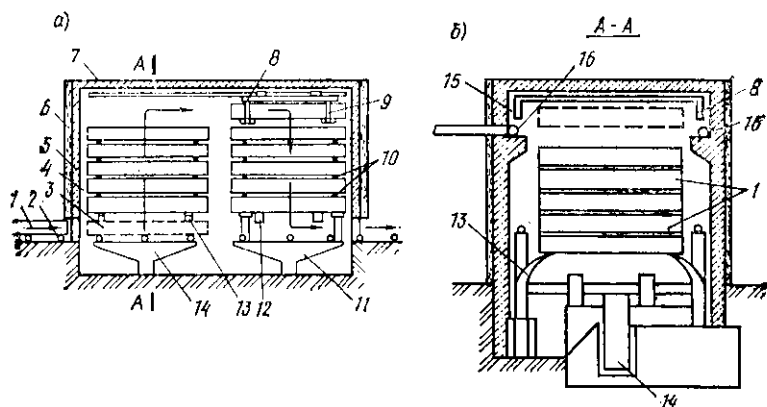


Рис. 13.18. Схема вертикальной пропарочной камеры
 а — продольный разрез; б — поперечный разрез

щелки, где нижним окажется загруженное изделие. Гидродомкраты занимают нижнее положение и выключаются.

При выключении гидродомкратов включается передаточная тележка 8, которая забирает верхнюю форму с изделием своими захватами 9 и ставит сверху другого штабеля на разгрузочной стороне. Выгрузив форму с изделием, передаточная тележка возвращается в исходное положение и выключается. Одновременно включаются гидродомкраты 11 на разгрузочной стороне, они занимают верхнее положение и приподнимают разгрузочный штабель над приводными защелками 12. Защелки освобождаются и гидроприводом убираются в пазы.

Гидродомкраты начинают опускаться ровно на высоту одной формы вагонетки и останавливаются. В это время защелки приводом выталкиваются в рабочее состояние и попадают в пазы 10 второй от низа формы, удерживая на себе штабель. Гидродомкраты с освободившимся нижним изделием совершают свой второй ход и опускают изделие на приводной роликовый конвейер выгрузки, который включается, как только гидродомкраты займут крайнее нижнее положение, и изделие выходит из камеры.

Тепловлажностная обработка в таких камерах ведется при 373 К, в качестве теплоносителя используется пар. Пар подводят к верхней части камеры 15, в кото-

рой по периметру расположен кольцевой перфорированный коллектор 16.

Пар легче паровоздушной смеси, поэтому он занимает верхнюю часть камеры, а смесь нижнюю. Зона изотермической выдержки занимает верхнюю часть обеих штабелей. Нижние ряды форм с изделиями на загрузочной стороне камеры подогреваются, а на разгрузочной охлаждаются. Причем, кроме теплоты зоны изотермической выдержки свежезагруженному материалу отдают теплоту остывающие изделия (те, что находятся в зоне охлаждения).

Таким образом, изделия, проходя путь, показанный на рис. 13.18, *а* стрелками, сначала нагреваются, потом вверху выдерживаются и далее охлаждаются. Путем рационально созданного в таких камерах режима работы пара в значительной мере повышается коэффициент полезного использования теплоносителя, а удельный расход пара снижается до 100—150 кг/м³ бетона.

13.4. Принципы теплотехнического расчета установок для тепловлажностной обработки

Теплотехнический расчет установки для тепловлажностной обработки включает:

технологический расчет, при котором определяется режим работы, габариты установки, принцип загрузки и разгрузки, источник тепловой энергии и составляется материальный баланс;

тепловой расчет, предусматривающий определение расходов теплоносителя на тепловую обработку и воздуха, потребного на охлаждение изделий после тепловой обработки;

аэро- и гидродинамический расчет (аэро- при работе с воздухом, гидро- при работе с жидкостью, паром). Цель данного расчета — высчитать количество подаваемого воздуха, пара или жидкости, способ их транспортировки и вид транспортных устройств.

Технологический расчет. (Дан на примере камеры ямного типа). Расчет начинают с эскиза размещения изделий. Загрузка и выгрузка осуществляются краном с применением механической строповки. В этом случае, чтобы уложить или снять изделие, оставляют зазор для обеспечения радиуса действия захвата автоматиче-

ской траверсы. Камера может быть устроена на два, четыре изделия или более в плане, однако необходимо проверить, чтобы масса крышки не превышала грузоподъемность применяемого крана.

Высота камеры принимается из условия, чтобы в ней разместилось требующееся количество форм с изделиями высотой $h_{\text{ф}}$. Если формы размещаются на стойках с кронштейнами, определяется необходимое число кронштейнов. Однако высота камеры из условий тепло- и массообмена не должна превышать 3 м при условии ее возвышения над полом цеха на 0,7 м (для удобства обслуживания). Затем вычисляются объем камеры, количество загружаемых в нее изделий и коэффициент заполнения (отношение объема изделий, размещенных в камере, к ее объему).

Длительность цикла работы камеры принимают по нормам технологического проектирования. Цикл работы складывается из времени: на загрузку t_z и разгрузку t_p , на выдержку изделий в не успевшей остыть камере t_n , на нагревание изделий $t_{\text{н}}$, изотермический нагрев $t_{\text{и}}$ и на охлаждение изделий t_0 ; тогда время, затрачиваемое на цикл $t_{\text{ц}}$, будет

$$t_{\text{ц}} = t_z + t_p + t_n + t_{\text{н}} + t_{\text{и}} + t_0. \quad (13.2)$$

Отсюда оборачиваемость камер K за 1 сут составит

$$K = 24/t_{\text{ц}}. \quad (13.3)$$

Общее количество камер, необходимых предприятию N , вычисляется из заданной производительности $P_{\text{и}}$ и вместимости камеры по изделиям I

$$N = P_{\text{и}}/IK. \quad (13.4)$$

Материальный баланс камеры составляется на цикл работы и определяется

$$G_{\text{п}} + G_{\text{ц}} + G_{\text{з}} + G_{\text{а}} + G_{\text{в}} + G_{\text{ф}} = G_{\text{б}} + G_{\text{ф}} + G_{\text{ив}} + G_{\text{к}} + G_{\text{пл}}. \quad (13.5)$$

В формуле (13.5) G — масса; индексы: п, ц, з, а, в, ф, б, ив, к, пл соответственно: пара, цемента, заполнителей, арматуры, воды, формы, бетона, испарения влаги, конденсата, выбиваемого пара через неплотности.

Тепловой расчет. Тепловой баланс камеры периодического действия, как и материальный, составляют на весь цикл работы, отдельно по периоду нагревания изотермической выдержки и охлаждения. Далее составляют уравнения тепловых балансов, определяют расхо-

ды пара по периодам и расход воздуха на охлаждение.

Период нагревания. За время t_n изделия нагреваются до максимальной температуры T_m , при которой в дальнейшем происходит их изотермическая выдержка. Теплота источника Q_n в камере расходуется на нагревание бетона Q_b , формы Q_f воздуха в камере Q_v , на восполнение потерь в окружающую среду Q_n и на нагревание конструкций собственно камеры Q_k . Кроме того, при нагревании бетона из-за реакций гидратации выделяется теплота экзотермии Q_s и присутствуют неучтенные потери Q_n .

Уравнение теплового баланса для периода нагревания принимает вид

$$Q_n + Q_s = Q_b + Q_f + Q_v + Q_n + Q_k + Q_n. \quad (13.6)$$

Из уравнения (13.6) определяют теплоту источника нагрева Q_n в период нагревания изделий. Если Q_n разделить на время подогрева t_n в часах, получим расход теплоты за 1 ч нагревания

$$Q_n = Q_n / t_n. \quad (13.7)$$

При изотермической выдержке изделий температура в камере остается постоянной. Изделия больше не нагреваются, однако из них испаряется влага, на что расходуется теплота Q_{nv} . Продолжает выделяться теплота экзотермии цемента Q_s . Кроме того, теплота расходуется на потери в окружающую среду Q_n , а также на неучтенные потери Q_n . Все затраты тепловой энергии должны восполняться за счет источника нагревания Q'_n и экзотермии цемента. Тогда уравнение теплового баланса для периода изотермической выдержки записывают

$$Q'_n + Q_s = Q_{nv} + Q_n + Q_n. \quad (13.8)$$

Отсюда можно определить количество теплоты, которое надо получить от источника нагревания Q'_n . Часовой расход теплоты определяется аналогично, т. е. по формуле (13.7), но с учетом длительности изотермического периода t_n .

$$Q_n = Q'_n / t_n. \quad (13.9)$$

Расход пара G_n на тепловую обработку определяют по формуле

$$G_n = (Q_n + Q'_n) / (t_n - i_k), \quad (13.10)$$

где i_n и i_k — соответственно энтальпия пара и конденсата.

Удельный расход пара $G_{пу}$, кг/м³, определяется исходя из объема бетона, находящегося в камере

$$G_{пу} = G_n / IV_6, \quad (13.11)$$

где I — количество изделий в камере; V_6 — объем бетона в одном изделии.

За период охлаждения необходимо охладить изделия в формах до 310—320 К, конструкции камеры и испарить часть влаги из изделий и с поверхностей конструкций. Следовательно, в приходной части баланса за период охлаждения должна быть учтена теплота, которую имеют на начало охлаждения изделия арматура, формы, конструкции, за вычетом теплоты, с которой они выгружаются из камеры (т. е. теплоты конструкции, с которой они остаются в момент выгрузки).

Поэтому в приходной части надо учитывать эту разницу: для изделий ΔQ_6 , для арматуры ΔQ_a , для форм ΔQ_f , для конструкций ΔQ_k . В расходных статьях учитывают потери теплоты в окружающую среду Q_n за время охлаждения t_o , теплоту, расходуемую на испарение влаги $Q_{ив}$, неучтенные потери Q_n . Остальная теплота должна отбираться воздухом, который нагревается от T_n и T_k и забирает количество теплоты Q_a . Тогда уравнение теплового баланса зоны охлаждения можно записать в виде

$$\Delta Q_6 + \Delta Q_a + \Delta Q_f + \Delta Q_k = Q_a + Q_{ив} + Q_n + Q_n. \quad (13.12)$$

Отсюда количество воздуха на охлаждение V_o , м³, определяется из формулы

$$V_o = Q_a / [c_v (T_n - T_n)]. \quad (13.13)$$

Зная длительность периода охлаждения t_o , определяют необходимый объем воздуха V_q на охлаждение за 1 ч

$$V_q = V_o / t_o. \quad (13.14)$$

Принципы составления аэро- и гидродинамического расчета камеры. Исходными данными для расчета являются часовые расходы пара по периодам и расход воздуха на охлаждение. Так как система снабжения пара камеры единая для периода нагревания и изотермической выдержки, а расход пара в период нагревания значительно выше, чем в период выдержки, то расчет системы снабжения пара ведут по периоду нагревания.

Часовой расход пара в период нагревания определя-

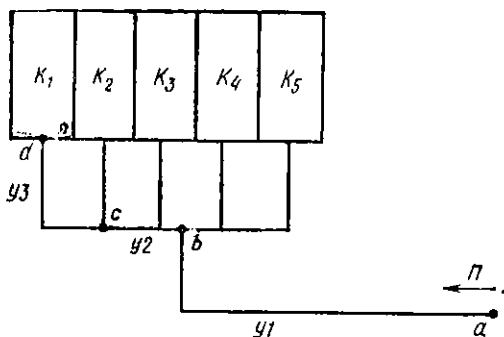


Рис. 13.19. Схема подводящего паропровода к блоку из пяти камер

ют по расходу теплоты $Q_{\text{ч}}$, вычисленному по формуле (13.7). Тогда расход пара за 1 ч $G_{\text{пч}}$ составит

$$G_{\text{пч}} = Q_{\text{ч}} / (i_{\text{п}} - i_{\text{к}}), \quad (13.15)$$

где $i_{\text{п}}$ и $i_{\text{к}}$ — соответственно энтальпии подаваемого пара в камеру и отбираемого конденсата.

Это количество $G_{\text{пч}}$ является исходным для составления материального баланса по расходу пара

$$G_{\text{пч}} = G_{\text{оп}} + G_{\text{к}} + G_{\text{н}}, \quad (13.16)$$

где $G_{\text{оп}}$ — масса пара, конденсирующаяся на открытой поверхности изделий; $G_{\text{к}}$ — масса пара, конденсирующаяся на поверхностях форм и конструкциях камеры, удаляемая в конденсатоотводящую систему; $G_{\text{н}}$ — масса пара, выбиваемая через неплотности (в тепловом балансе учитывается как неучтенные потери).

Аэро- и гидродинамический расчет.

Гидравлический расчет составляется по материальному балансу расхода пара для определения диаметров подводящих паропроводов и необходимого давления пара, поступающего в систему. Такой же расчет делается и для конденсатоотводящих систем.

Для подводящего пара составляют схему. Для примера выбран блок из пяти камер (рис. 13.19). Предположим, согласно режиму завода, в блоке нагреваются две камеры, изотермическая выдержка происходит также в двух камерах, а охлаждение — в одной. Тогда общее количество пара, которое необходимо подавать в паропровод для пяти камер начиная с точки a , составит

$$\Sigma G_1 = G_{\text{пч}} \cdot 2 + G'_{\text{пч}} \cdot 2, \quad (13.17)$$

где $G_{\text{пч}}$ — часовое количество пара на нагревание по (13.15); $G'_{\text{пч}}$ — часовое количество пара на изотермическую выдержку, определяемое для $Q'_{\text{ч}}$ по формуле (13.9).

По аналогии с формулой (13.10) получим $G'_n = Q'_n / (i_n - i_R)$.

Для удобства расчета подводящих паропроводов составляют таблицу по следующей форме (см. табл. 13.1). Здесь также дан пример заполнения для участка У1.

Расчет сопротивлений производят следующим образом. Например, на участке У1 транспортируется пара $\Sigma G_1 : G_{пч} \times 2$ (часовой расход пара на нагрев в камерах K_1 и K_2) и $G'_{пч} \times 2$ (часовой расход пара на изотермическую выдержку в камерах K_3 и K_4). Подставляют этот расход для участка У1 как ΣG_1 . Далее определяют количество теплоты Q_1 для У1, умножая ΣG_1 на энтальпию транспортируемого пара, $Q_1 = \Sigma i$. Это значение вписывают в табл. 13.1.

По Q_1 выбирают из указанных справочников (с учетом выбранной скорости $w_1 = 30-40$ м/с) необходимый диаметр паропровода d_1 и подставляют его значение в табл. 13.1. Длина участка l_1 выбирается по чертежу. На участке ab (см. рис. 13.19) есть поворот под углом 90° , сопротивление которого по указанному справочнику равно, например, 1,2; других сопротивлений нет. Указывают эту цифру в табл. 13.1.

Сопротивление трению на 1 м берется также из указанного справочника при данном диаметре и скорости; подставим R_1 . Помножив R_1 на длину участка l_1 , получают для табл. 13.1 значение $R_1 l_1$. Величину z определяют по формуле $z_1 = \Sigma \xi w^2 \rho / 2 = 1,2 w^2 \rho / 2$, где ρ — плотность пара, и также подставляют в табл. 13.1, $R_1 l_1 + z_1$.

Такие расчеты по табл. 13.1 проводят по всем участкам паропровода и определяют гидравлические потери

на трех участках, т. е. $\sum_1 Rl + z$. Эти потери и определяют падение напора в паропроводе от a до d (на входе в камеру).

Расчет разводки пара по камере можно не делать, а учесть его как небольшое избыточное давление пара (например, 0,05 МПа), тогда подаваемое давление пара в камеру составит 0,15 МПа. Прибавив к 0,15 МПа значение выражения $\sum_3 Rl + z$, получают давление пара,

которое необходимо подавать в систему.

ТАБЛИЦА

Участок (см. рис. 13.19)	ΣG	d	l	$\Sigma \xi$
$Y1=ab$ $Y2=bc$	ΣG_1 ΣG_2	d_1	l_1	1,2
$Y3=cd$	ΣG_3			

ΣG_1 — часовой расход пара на участке $Y1$, кг; d_1 — выбираемый по теплотехническому справочнику внутренний диаметр паропровода, мм; l_1 — длина паропровода на участке $Y1$, м; 1,2 — значение коэффициента местного сопротивления при повороте трубопровода на 90° (см. рис. 13.19); R_1 — потери на трение 1 м паропровода (по указанному справочнику); w_1 — скорость движения пара, м/с; $R_1 l_1$ — суммарные потери на трение на участке $Y1$; $z_1 = \Sigma \xi w_1^2 \rho / 2$ — потери на местные сопротивления на участке; $R_1 l_1 + z_1$ — полное сопротивление на участке $Y1$; $Q_1 = \Sigma G_1 t_1$ — количество теплоты, транспортируемое с паром на участке $Y1$.

Аэродинамический расчет. При составлении теплового баланса периода охлаждения определяют количество воздуха для охлаждения изделий $V_{\text{ч}}$ [см. (13.14)]. Дополнительно к этому учитывают, что при охлаждении испаряется и образует паровоздушную смесь вода гидрозатвора вентиляционного отверстия, гидрозатвора крышки, частично испаряется влага с поверхности изделий, а также конденсат, находящийся на формах и конструкциях камеры. Поэтому количество воздуха $V_{\text{ч}}$ увеличивают.

Определить это увеличение точно в конкретных случаях не представляется возможным. Тогда количество отбираемой паровоздушной смеси вентилятором принимают по практическим данным коэффициентом K , составляющим 0,2—0,3 $V_{\text{ч}}$. Отсюда объем транспортируемой смеси $V_{\text{в}}$ от камеры, на которую ведется расчет за период охлаждения, за 1 ч составляет

$$V_{\text{в}} = (1,2-1,3) V_{\text{ч}}. \quad (13.18)$$

По этому объему смеси и подбирают вентиляционное устройство.

При определении аэродинамических сопротивлений составляют расчетную схему. В 5.3.2 дан принцип про-

λ	α	Rl	z	$Rl + z$	Q
R_1	w_1	$R_1 l_1$	z_1	$R_1 l_1 + z_1$	Q_1
				$\sum_1^3 Rl + z$	

ведения аэродинамического расчета тепловой установки. В данном случае для расчета камеры (она отличается от сушильной установки) перечислим в порядке последовательности сопротивления движению паровоздушной смеси на пути к вентилятору, которые необходимо определить: 1) сопротивление вентиляционного отверстия 8 (см. рис. 13.1); 2) сопротивление садки изделий в камере; 3) сопротивление входа в систему отбора конденсата 10; 4) сопротивление поворота на угол 90° к отверстию, перекрываемому затвором 8; 5) сопротивление отверстия, перекрываемого затвором 8; 6) поворот на угол 90° и вход в канал 9 к вентилятору; 7) сопротивление канала 9 до вентилятора и др.

Сумма сопротивлений $\sum_i^n \Delta p$ составит полный напор, который должен развивать вентилятор. Количество отсасываемой паровоздушной смеси V_v определено ранее. По этим данным и выбирают вентилятор для охлаждения. При изложении показан отбор смеси от одной камеры. Если охлаждение производится в нескольких камерах блока, а вентилятор один, то расчет следует вести по паровоздушной смеси с учетом этих камер.

13.5. Установки для нагревания заполнителей бетона и бетонной смеси

В зимний период при разгрузке смерзшихся заполнителей бетона из железнодорожного подвижного состава, а также при их перегрузке из прирельсовых складов в цеха переработки заполнители приходится нагревать (размораживать).

Размораживание заполнителей бетона осуществляют паровой иглой (рис. 13.20) или конструкцией из нескольких паровых игл. Паровая игла 3 снабжена отверстиями для выхода пара, рукоят-

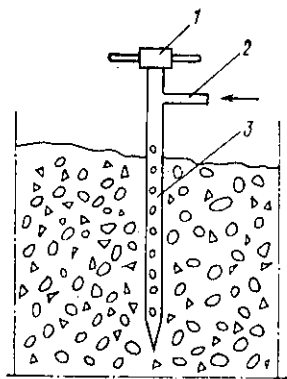


Рис. 13.20. Схема паровой иглы

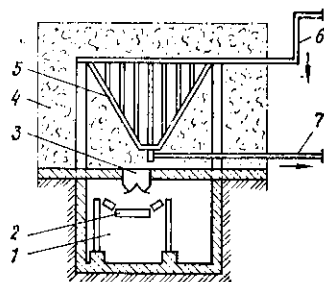


Рис. 13.21. Схема паровых регистров

кой 1 и штуцером 2 для укрепления гибкого шланга подачи пара. Пар подают в иглу под небольшим давлением (0,12—0,15 МПа) и ее постепенно утапливают в смерзшийся материал. Пар конденсируется на его поверхности и в виде конденсата распространяется вокруг иглы, передавая ей теплоту. Расход пара на разморозку 1 м³ заполнителя зависит от многих факторов; в среднем составляет 100—130 кг пара.

Применение игл с электрическим нагреванием для разморозки дает значительно меньший эффект, чем использование паровых игл. Ибо в этом случае теплота распространяется путем теплопроводности смерзшегося конгломерата, а при использовании паровых игл теплота распространяется путем передвигающейся массы конденсата, имеющей лучшую теплопроводность.

Для разморозки заполнителей кроме паровых игл применяют конструкции из паровых регистров с целью обогрева материала без прямого соприкосновения его с паром (рис. 13.21). Такой способ называют обогревом «глухим» паром в отличие от изложенного — обогрева «острым паром».

Схема работы паровых регистров заключается в следующем. Над конвейером 2 в проходной подскладочной галерее 1 находится разгрузочный челюстной затвор 3 для дозирования материала 4.

Чтобы подать материал 4 на конвейер 2 его размораживают с помощью стационарно устраиваемой конструкции из труб 5, по которым пропускают пар 6. Пар, проходя по трубам (регистрам), обогревает стенки регистров, а от них теплота путем теплопроводности распространяется по материалу. Материал, постепенно размораживаясь через челюстной затвор 3, поступает на конвейер, а затем в цех. Отработанный конденсат через конденсатопровод 7 направляется в котельную для использования его в качестве подпиточной воды.

Коэффициент теплопередачи стенки и труб значительно ниже коэффициента теплопередачи паровой иглы, поэтому удельный рас-

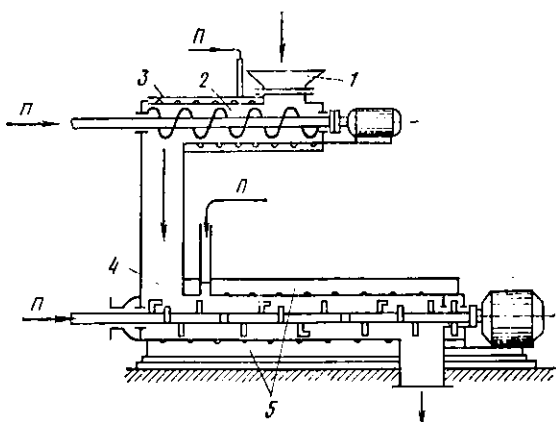


Рис. 13.22. Схема струйного непрерывного двухвального смесителя

ход пара на разморозку материала с помощью регистров составляет 150—200 кг/м³.

Сушку и разогрев заполнителей бетона в цехах осуществляют в сушильных барабанах.

В технологии сборного железобетона широко применяется нагревание бетонной смеси перед формированием изделий или во время этого процесса.

Нагревание бетонных смесей для горячего формирования ведут в обогреваемых паром бетоносмесительных установках, в смесительных шнековых установках, в бункерных установках периодического действия и др. На рис. 13.22 показана схема струйного непрерывного двухвального смесителя с шнековым питателем для смешивания сухих компонентов мелкозернистых бетонов с одновременным подогревом бетонной смеси.

Компоненты бетона поступают в бункер 1 шнекового питателя 2, оборудованного паровой рубашкой 3 с перфорациями, обращенными в полость питателя. Дозируемая смесь одновременно увлажняется, подогревается и подается в двухвальный смеситель 4, также снабженный перфорированной паровой рубашкой 5. Пар Π подается не только в паровую рубашку 5, но и в полые валы — приводные валы смесителя с перфорациями. За счет вращения валов выбрасываемые струи пара и струи пара из паровой рубашки создают эффективное турбулентное смешение с разогревом. Дозировкой подачи пара Π регулируют необходимое влагосодержание смеси.

Для разогрева бетонной смеси применяют и непрерывные шнековые установки с электрическим разогревом (рис. 13.23). Через загрузочный бункер 1 в установку 2 дозатором непрерывно загружают смесь. Несущий вал 3 с помощью электропривода начинает вращаться вместе с винтовыми лопастями — электродами 4. Смесь, передвигаясь к выгрузочному отверстию 5, подогревается и перемешивается; перемешивание смеси улучшает равномерность ее про-

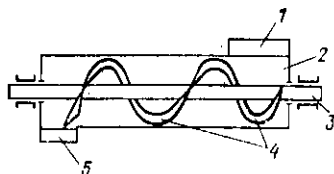


Рис. 13.23. Схема непрерывной шнековой установки с электрическим разогревом бетонной смеси

грева. Изменяя скорость вращения шнека, регулируют степень прогрева и производительность установки.

Указанные установки изготавливаются предприятиями по индивидуальным проектам.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

1. В чем заключаются конструктивные особенности ямных камер и каковы пути их совершенствования?
2. Объясните принципы работы камер непрерывного действия.
3. Назовите особенности конструкций вертикальных камер.
4. Расскажите о конструкции кассетных установок. Какой способ нагревания для них наиболее рационален?
5. Какие виды разогрева существуют для разморозки заполнителей при выгрузке из вагонов и на складах их хранения?
6. Какие установки применяются для нагревания бетонной смеси и какой удельный расход пара или электроэнергии для этого необходим?
7. В чем заключается принцип блокировки камер при теплоснабжении паром и для каких целей он производится?

РАЗДЕЛ 9. ПРИНЦИПЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕПЛОВЫХ УСТАНОВОК

Ранее (см. 4.9.1) рассмотрены три последовательных этапа автоматизации тепловых установок, причем, третьим назван этап автоматизированных систем управления технологическим процессом (АСУТП), к которому в настоящее время постепенно переходит промышленность строительных материалов. Этот этап характеризуется передачей автоматам более сложных функций — функций ведения технологических процессов.

Для данного этапа характерны и новые требования. Технологические установки, в том числе и тепловая, работают не отдельно, а в виде комплекса, состоящего из тепловой установки, системы автоматического регу-

лирования (САР) и ЭВМ, предназначенной для автоматического ведения процесса. Такой комплекс назван технологическим АСУТП.

ГЛАВА 14. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ АСУТП

Технологический комплекс АСУТП проектируется и эксплуатируется как единое целое. Однако для представления о комплексе как о целом необходимо рассмотреть сущность каждого из его составляющих, например, систему автоматического регулирования.

14.1. Основные понятия о системе автоматического регулирования

В системе автоматического регулирования тепловую установку называют объектом автоматизации, а регулирующие приборы — автоматическими регуляторами.

Объект автоматизации характеризуется нагрузкой — количеством материала, энергии или вещества, проходящим через него в единицу времени. Поэтому одной из главных задач автоматизации является выбор рациональных количеств материала, перерабатываемого в тепловой установке, и потребляемой энергии. Материал и энергия характеризуются параметрами, которые при рассмотрении автоматизации называют параметрами автоматизации. При тепловой обработке материала к таким параметрам автоматизации относят: температуру материала и теплоносителя, влагосодержание, скорость их движения и др.

Автоматический регулятор — совокупность устройств, осуществляющих автоматическое регулирование параметров технологического процесса. Автоматический регулятор (рис. 14.1) состоит из датчика 1 — чувствительного элемента, предназначенного для восприятия САР и изменений физической величины регулируемого параметра. Сигнал датчика передается на усилительно-преобразующее устройство 2, которое усиливает сигнал и преобразует его в однородный по физической сущности с сигналом, поступающим от задающего элемента 3. Задающий элемент передает в САР команду ЭВМ.

Усиленный и преобразованный сигнал от преобра-

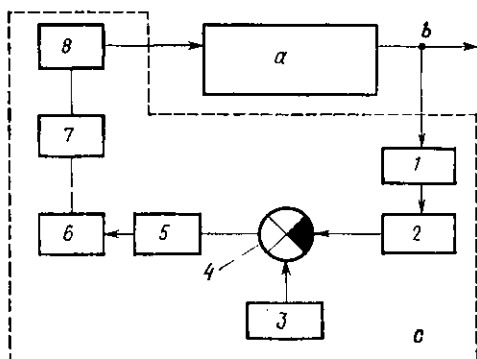


Рис. 14.1. Функциональная схема системы автоматического регулирования

a — объект регулирования; b — параметр регулирования; c — автоматический регулятор (показан пунктиром)

зующего устройства 2 и от задающего элемента 3 поступает в сумматор — измерительный элемент 4. Измерительный элемент сравнивает эти сигналы и в случае несоответствия передает сигнал рассогласования на усилитель 5. Усиленный сигнал рассогласования поступает в усилительно-преобразующее устройство 6, которое этот сигнал преобразует в энергию необходимой мощности для воздействия на исполнительный механизм 7, который, в свою очередь, воздействует на регулирующий орган 8. Регулирующий орган изменяет подачу материала, энергии, вещества, приводя их в соответствие с заданным режимом.

Таким образом, САР, состоящая из объекта автоматизации и автоматического регулятора, с помощью ЭВМ ведет технологический процесс. Здесь САР рассмотрена на примере работы одного автоматического регулятора. Таких регуляторов для управления работой тепловой установки применяется несколько.

Для разработки САР, диапазонов ее функционирования, согласования с объектом автоматизации составляют задание на автоматизацию (рассматривается далее).

Каждая система автоматического регулирования обладает определенными свойствами — временем, затрачиваемым на изменение характеристик параметров. Эти свойства называют *динамическими свойствами*, или *характеристиками*.

Если динамические свойства автоматических регуляторов можно изменять путем настройки или замены отдельных блоков, то динамические свойства объекта управления остаются неизменными. Особенно это отно-

сится к тепловым установкам, обладающим большой тепловой инерцией. Поэтому не каждую тепловую установку можно автоматизировать. Например, создание тепловой установки, рассчитанной только на ведение технологического процесса обработки материала без учета ее динамических свойств, без расчета на применение автоматических регуляторов, может привести к невозможности ее автоматизации и к неоправданным затратам средств и труда.

Подвергая анализу динамические свойства, можно целенаправленно изменять конструктивные особенности тепловых установок.

Специалист, проектирующий системы автоматизации, не может глубоко знать технологию тепловой обработки. Поэтому сначала разрабатывают задание на автоматизацию, а по нему осуществляют САР, которая только в этом случае может дать экономический эффект.

Ниже приведены некоторые основные понятия, необходимые для дальнейшего изложения:

регулируемый параметр — физическая величина, характеризующая режим работы объекта автоматизации; возмущающее воздействие (возмущение) — внешняя сила, вызывающая изменение состояния САР;

вход — параметр, характеризующий возмущение или регулирующее воздействие на объект автоматизации;

выход — параметр, показывающий необходимое (заданное) течение процесса.

Обычно входы в автоматический регулятор обозначают индексом X_1 , выходы — индексом X_2 .

14.2. Разработка задания на автоматизацию тепловых установок

Разработку задания на автоматическое регулирование тепловых установок осуществляют в такой последовательности: составляют технологическую схему и описывают работу тепловой установки; определяют главные параметры автоматизации; выделяют входные и выходные параметры автоматизации; указывают необходимые виды автоматизации, места контроля и регулирования параметров; определяют статические и динамические характеристики объекта автоматизации. Результаты разработки задания представляют в виде графической схемы и пояснительной записки к ней.

Далее дан пример разработки задания на автоматизацию камеры для тепловлажностной обработки бетонных изделий.

Допустим, процесс тепловлажностной обработки происходит в горизонтальной щелевой пропарочной камере путем подачи пара (см. рис. 13.14).

Первой задачей при составлении задания на автоматизацию такой камеры является разработка технологической схемы (рис. 14.2).

Масса материала (изделия) G_m с параметрами, требуемыми для условий формования, на снижатель 1 поступает в камеру 2, при этом поднимается уплотнение — резиновая штора 3. После прохода изделия штора возвращается на место. Входной конец камеры оборудован воздушной завесой 4, осуществляемой вентиляторами 5 и 5а. Изделия с определенным интервалом проталкивания Δt проходят постепенно через все зоны камеры: нагревания а, изотермической выдержки б и охлаждения с.

В зону нагревания а от магистрали через регулируемый вентиль 6 подается пар и разводится по стоякам 7 через вентили 8, регулирующие подачу пара по участкам. В начале зоны нагревания отбирается паровоздушная смесь и частично вентилятором 9 подается на рециркуляцию в конец этой зоны. Через регулируемый вентиль 10 пар из магистрали подается в стояки 11, затем в зону изотермической выдержки б. Подачу пара по участкам зоны регулируют с помощью вентилялей 12.

Зоны нагревания а и изотермической выдержки б отделяются от зоны охлаждения с воздушной завесой 14 с помощью вентиляторов 13 и 13а. В зону охлаждения с через заборные шахты 15 всасывается вентилятором 22 наружный воздух, который через сборный канал 16 и окна 17 попадает в зону камеры. Далее воздух пересекает зону, отбирает теплоту от материала и через окна 23 и сборный канал 24 попадает к вентилятору 22.

Для уменьшения подсосов воздуха в вентиляционную систему через выходной конец камеры устраивается воздушная завеса 18, закрывающая поперечное сечение за счет работы вентиляторов 19 и 19а, а также уплотняющая резиновая штора 20. Вышедшее из камеры изделие массой G_{m2} с новыми характеристиками подъемником 21 поднимается вверх и отправляется на отделку. Конденсат и конденсатоотводящую систему 27

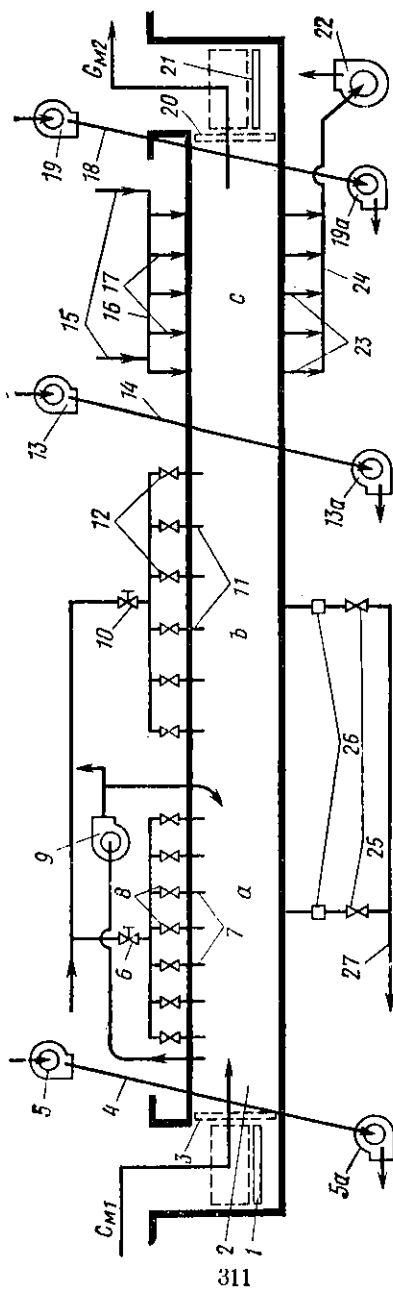


Рис. 14.2. Технологическая схема щелевой пропарочной камеры

а, б, с — соответственно зоны нагрева, изотермической выдержки, охлаждения

через конденсатоотводчики 26 и вентили 25 отводят непрерывно.

Второй задачей при составлении задания на автоматизацию камеры является определение входных и выходных параметров автоматизации, а также мест контроля и регулирования. Решение этой задачи лучше вести по зонам.

Зона нагревания. В эту зону поступает материал с массой $G_{м1}$ и определенным влагосодержанием U_0 через интервал времени Δt . Материал загружается с помощью дистанционного управления по команде ЭВМ. Для этого перед камерой предусматривают накопитель изделий. Система загрузки, проталкивания и выгрузки должна быть заблокирована так, чтобы (в случае отказа в работе подъемника, неисправностей механизма движения вагонеток по камере, отказа снижателя) она отключалась с подачей сигнала оператору и на ЭВМ. Следовательно, для системы загрузки необходимо применить автоматическое дистанционное управление с защитой от отказа работы механизмов. При этом выходом (X_2) будет постоянный интервал загрузки Δt , а входом (X_1) — количество изделий в наполнителе n .

В зону нагревания изделий по отработанной и заложенной в ЭВМ программе поступает пар. Если в камере находятся однотипные изделия, то масса форм, изделий, влагосодержание изделий и, следовательно, расход пара в зоне нагревания должны быть постоянными. Однако и формы, и изделия, и дозировка воды — в бетоне — все имеет свои допуски. Поэтому ЭВМ соответственно через задающие устройства 3 автоматических регуляторов (см. рис. 14.1) меняет программу подачи пара.

Очевидно, что при недостатке пара скорость нагревания изделий уменьшается, и температура в камере и на поверхности изделий падает. Поэтому выходом (X_2) будет температура T_1 , до которой необходимо нагреть материал в конце зоны нагревания, входом (X_1) — расход пара $G_{п1}$, подаваемый в эту зону.

Из начального участка зоны нагревания отбирается паровоздушная смесь и вентилятором 9 (см. рис. 14.2) подается в конец этой зоны. Система рециркуляции рассчитана на регулирование количества влаги, конденсирующейся на открытой поверхности и испаряющейся с нее (процесс обратимый и идет непрерывно). Суммарное количество конденсирующейся влаги на поверхности

(а именно оно доминирует на стадии подогрева) определяется экспериментально и закладывается в ЭВМ, которая с помощью задающего устройства регулятора ведет процесс.

Выходом (X_2) для данного процесса будет масса конденсата, приходящаяся на единицу открытой поверхности материала A_m , входом (X_1) — масса возвращенной в камеру паровоздушной смеси $G_{пв}$.

В зоне нагревания образуется конденсат, который должен удаляться. Входом (X_2) — будет масса удаляемого конденсата $G_{к1}$ в единицу времени, входом (X_1) — массовый расход пара $G_{п1}$, поступающий в зону нагревания.

Для уменьшения подачи наружного воздуха из цеха и выбивания пара из камеры зона нагревания на загрузочном конце изолируется шторой и воздушной завесой. Она регулирования не требует и должна включаться дистанционно. О выходе из строя воздушной завесы подается сигнализация.

Зона изотермической выдержки. В эту зону подается пар, компенсирующий стабильные потери в окружающую среду. Стабильность потерь может нарушаться только из-за выбивания паровоздушной смеси в зону охлаждения через воздушную завесу 14 (см. рис. 14.2) либо при выходе ее из строя. Выходом (X_2) будет постоянная температура в зоне T_2 , а входом (X_1) — массовый расход пара $G_{п2}$.

Из зоны изотермической выдержки конденсат должен удаляться, тогда выход (X_2) — масса конденсата $G_{к2}$, вход (X_1) — массовый расход пара $G_{п2}$.

Зона изотермической выдержки на границе с зоной охлаждения изолируется воздушной завесой. Она не требует регулирования, и ее включение должно осуществляться дистанционно. О выходе из строя воздушной завесы подается сигнализация.

Зона охлаждения. В эту зону поступает воздух, который отбирает теплоту от материала с начальной T_n — температурой, с которой материал начинает охлаждаться, до конечной T_k — температуры, с которой его выгружают из камеры. Отсюда выходом (X_2) будет T_k , а входом (X_1) — масса воздуха G_v , просасываемая через зону.

При составлении задания на автоматизацию тепло-

ТАБЛИЦА 14.1. ВХОДЫ И ВЫХОДЫ ПАРАМЕТРОВ
АВТОМАТИЗАЦИИ

Зона камеры	Регулировочный параметр	Место регулирова- ния	Вход X_1	Выход X_2
Нагревания	I. Интервал загрузки	Загрузочное устройство	n	Δt
	II. Работа воздушной завесы	Начало зоны	—	—
	III. Масса конденсата	Середина зоны	$G_{п1}$	$G_{к1}$
	IV. Температура	Конец зоны	$G_{п1}$	T_1
	V. Масса изделия	То же	$G_{пв}$	A_m
Изотермической вы- держки	VI. Температура	Середина зоны	$G_{п2}$	T_2
	VII. Масса конденсата	То же	$G_{п2}$	$G_{к2}$
	VIII. Работа воздушной завесы	Конец зоны	—	—
Охлаждения	IX. Температура изделия	То же	$G_{в}$	T_k
	X. Работа воздушной завесы	»	—	—

вой установки входные и выходные параметры обычно сводят в таблицу (см. табл. 14.1).

Третьей задачей при составлении задания на автоматизацию камеры является определение статических и динамических характеристик параметров регулирования.

Статической характеристикой называют математическое выражение зависимости $X_2=f(X_1)$ при установившемся равновесном состоянии. Эту формулировку обычно относят к понятию звена, ибо объект автоматизации делят на отдельные звенья, как и показано в табл. 14.1.

Динамической характеристикой звена называют зависимость выходного параметра от входного в переходном процессе. Математическое уравнение звена в переходном процессе определяет значение выходной величины от входной во времени, $X_2=f(X_1, t)$.

Учитывая сложность составления динамических характеристик звеньев объекта регулирования, эти харак-

теристики снимаются при проектировании исследований на моделях и в виде полученных графических зависимостей прикладываются к заданию. Поэтому здесь рассмотрим статические характеристики параметров регулирования в последовательности, указанной в табл. 14.1.

I. Интервал загрузки — накопление форм-вагонеток с изделиями перед загрузочным устройством — определяется ритмом работы формовочного конвейера;

II. Работа воздушной завесы зоны нагревания не регулируется; автоматически с помощью дистанционного управления включается в работу и выключается;

III. Масса конденсата в зоне нагревания регулируется. Для этого надо определить, сколько пара идет на увеличение влагосодержания изделий. Остальное количество должно в виде конденсата удаляться из зоны. Эти данные устанавливают лабораторными исследованиями. Количество удаляемого конденсата можно представить как $G_{к1} = KG_{п1}$ или $G_{к1} = Kf(G_{п1})$. Изменение количества поступающего пара в зону нагрева $G_{п1}$ находится в прямой зависимости от температуры в конце этой зоны T_1 и определяется при рассмотрении параметра регулирования IV.

IV. Температура. В зону нагревания поступает пар, теплота которого расходуется на подогрев материала Q_m , форм-вагонеток $Q_{ф}$, воздуха, находящегося в зоне Q_v , на потери в окружающую среду $Q_{пот}$. В материале проходят реакции гидратации с выделением теплоты экзотермии цемента Q_z . Все потери восполняются теплотой подаваемого пара $Q_{п1}$. Если нагревать материал от начальной температуры T_0 до конечной T_1 , то с достаточной точностью для автоматизации уравнение теплового баланса зоны нагревания можно записать в следующем виде:

$$Q_{п1} + Q_z = Q_m + Q_{ф} + Q_v + Q_{пот}. \quad (14.1)$$

Нагревание изделий ведется с заранее отработанной и запрограммированной скоростью. Количество материала и его начальное влагосодержание изменяется только в пределах технологических допусков. Экзотермия цемента при постоянном расходе на 1 м³ бетона и расход теплоты на потери в окружающую среду при квазистационарном режиме нагревания могут быть приняты постоянными. Тогда можно записать, что теплота, получаемая материалом Q_m и формами-вагонетками $Q_{ф}$,

пропорциональна теплоте пара Q_p . Выразив эти величины через их составляющие, получим

$$G_{п1}(i_{п} - i_{к}) = [G_{м1}c_m(T_1 - T_0) + G_{ф}c_{ф}(T'_1 - T_0)], \quad (11.2)$$

где $G_{п1}$ — масса расходуемого пара; $i_{п}$, $i_{к}$ — соответственно энтальпия пара и конденсата; $G_{м1}$, $G_{ф}$ — соответственно масса материала и форм-вагонеток; c_m , $c_{ф}$ — соответственно теплоемкость влажного железобетона и металла; T_0 , T_1 , T'_1 — соответственно температуры: начальная изделий в формах; конечная изделий и конечная вагонеток форм.

Расход теплоты на нагревание форм-вагонеток в случае применения одноименного парка форм, в тепловом балансе можно с достаточным приближением считать постоянным, поэтому для задания на автоматизацию уравнения (14.1) и (14.2) можно записать в упрощенном виде

$$G_{п1}(i_{п} - i_{к}) = G_{м1}c_m(T_1 - T_0) - Q_3 + c. \quad (14.3)$$

Из (14.3) можно видеть, что входом (X_1) для регулирования теплового режима зоны является $G_{п1}$, выходом (X_2) — T_1 (температура, до которой необходимо нагреть материал в конце зоны нагревания). Отсюда уравнение (14.3) показывает статическую зависимость между входом X_1 и выходом X_2 .

Из этого уравнения для массы конденсата можно вывести статическую зависимость. Она может быть представлена в виде $G_{к1} = Kf(G_{п1})$, где K — коэффициент; найдя $G_{п1}$ из уравнения (14.3), получим

$$G_{к1} = \frac{K}{i_{п} - i_{к}} [G_{м1}c_m(T_1 - T_0)] - Q_3 + c. \quad (11.4)$$

V. Масса изделия в зоне нагревания зависит от количества конденсирующегося пара на открытой поверхности изделий. Ранее показано, что давление в камерах тепловлажностной обработки p_k равно атмосферному и складывается из парциального давления пара $p'_{п}$ и парциального давления воздуха $p'_{в}$, т. е. $p_k = p'_{п} + p'_{в}$.

Масса, конденсирующаяся на единице поверхности материала A_m , пропорциональна коэффициенту массоотдачи при конденсации β_m и разности парциальных давлений пара в камере $p'_{п}$ и у поверхности материала $p''_{п}$, т. е. $q_m = \beta_m(p'_{п} - p''_{п})$ [см. формулу (4.37)].

При подаче паровоздушной смеси в конец зоны нагревания в этой зоне снижается парциальное давление пара $p'_{п}$. Движущая сила процесса конденсации $\Delta p'_{п}$

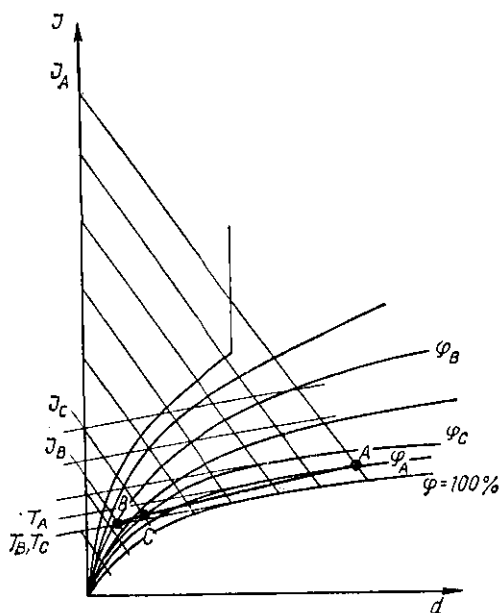


Рис. 14.3. Схема процесса смешивания паровоздушной смеси с рециркулятом в Jd -диаграмме

уменьшается, процесс конденсации замедляется. Поэтому выходной величиной X_2 будет парциальное давление пара в зоне подогрева p'_n , а входной величиной X_1 будет масса подаваемой паровоздушной смеси $G_{пв}$.

Измерить парциальное давление пара p'_n в паровоздушной смеси не представляется возможным, поэтому измеряют ее относительную влажность, $\varphi \simeq p'_n/p'_n$. Этим параметром пользуются для определения статической зависимости между X_2 и X_1 .

Пусть смешивается паровоздушная смесь в камере с рециркулятом. Процесс смешивания рассмотрим в Jd -диаграмме (рис. 14.3). На Jd -диаграмме параметры паровоздушной смеси, находящейся в камере J_A , T_A , φ_A , обозначим точкой A , параметры паровоздушной смеси, подводимой в камеру в качестве рециркулята J_B , T_B , φ_B , обозначим точкой B . Требуется смешать 1 кг паровоздушной смеси, находящейся в камере с параметрами A , и n кг паровоздушной смеси рециркулята с параметрами

ми B . После смешивания получим $(1+n)$ кг смеси с параметрами $T_{см}$ и $\varphi_{см}$, или

$$1T_A + nT_B = (1+n)T_{см}, \quad (14.5)$$

$$1\varphi_A + n\varphi_B = (1+n)\varphi_{см}. \quad (14.5a)$$

Если эти два равенства преобразовать, затем первое равенство разделить на второе, то получим

$$\frac{T_A - T_{см}}{\varphi_A - \varphi_{см}} = \frac{T_{см} - T_B}{\varphi_{см} - \varphi_B}. \quad (14.6)$$

Полученное уравнение является уравнением прямой с координатами двух точек T_A и φ_A ; T_B и φ_B . Таким образом, для смешивания паровоздушной смеси с рециркулятом в Id -диаграмме необходимо соединить эти две точки прямой, каждая точка которой является точкой смеси в своих определенных пропорциях. Из равенства $\varphi_A + n\varphi_B = (1+n)\varphi_{см}$ можно определить n — кратность смешивания. Для этого напомним: $\varphi_A - \varphi_{см} = n(\varphi_{см} - \varphi_B)$ или

$$n = (\varphi_A - \varphi_{см}) / (\varphi_{см} - \varphi_B). \quad (14.7)$$

Соединим точки A и B на схеме (см. рис. 14.3) и выберем смесь (точка C), для которой параметрами будут J_C , φ_C , T_C . Тогда выходным параметром X_2 будет постоянная величина φ_C , входным параметром (X_1) — масса рециркулята с параметрами B . Статическая взаимосвязь между X_2 и X_1 описывается формулой (14.7).

VI. В зоне изотермической выдержки необходимо поддерживать постоянную температуру, достигнутую в зоне нагревания. Теплота в зоне расходуется на восполнение потерь через ограждающие конструкции зоны в окружающую среду и на частичное испарение воды из бетона. Выходом (X_2) для этой зоны будет поддерживаемая за счет регулирования постоянная температура, входом (X_1) — расход пара $G_{п2}$. Взаимосвязь между X_2 и X_1 выражается уравнением теплового баланса зоны

$$G_{п2}(i_{п} - i_{к}) = \alpha A'(T_2 - T_{oc}) - G_{яв}(2493 + 1,97T_2) - Q_0, \quad (14.8)$$

где $G_{п2}$ — масса расходуемого пара; $i_{п}$ и $i_{к}$ — соответственно энтальпия пара и конденсата; α — коэффициент теплоотдачи в окружающую среду; A' — поверхность ограждающих конструкций с которых происходит теплоотдача; T_2 и T_{oc} — соответственно температура в зоне и в окружающей среде; $G_{яв}$ — количество испаряемой влаги из материала; Q_0 — экзотермия цемента.

Учитывая, что A' , α , T_{oc} , $G_{нв}$, $Q_{э}$, $i_{п}$, $i_{к}$ при постоянном режиме близки к постоянным (c), зависимость (14.8) можно упростить и записать

$$T_2 = f(G_{п2}) + c. \quad (14.9)$$

VII. Масса конденсата, удаляемого из зоны изотермической выдержки, практически соответствует количеству подаваемого пара. Выходом (X_2) будет масса удаляемого конденсата $G_{к2}$ входом (X_1) — массовый расход пара $G_{п2}$. Статическая зависимость может быть выражена

$$G_{к2} = f(G_{п2}). \quad (14.10)$$

VIII. Работа воздушной завесы в зоне изотермической выдержки не регулируется, а только автоматически с помощью дистанционного управления включается в работу и выключается.

IX. В зоне охлаждения формы-вагонетки с изделиями охлаждаются от T_2 до T_k , т. е. до температуры, с которой они выгружаются из камеры. Теплота, поступающая в эту зону с изделиями и формами-вагонетками, расходуется на потери в окружающую среду, на нагревание воздуха, поступающего на охлаждение, и частично с T_k выводится с изделиями на формах-вагонетках. Кроме того, часть теплоты расходуется на испарение влаги из материала. Выходом (X_2) является температура выгружаемого материала T_k , входом (X_1) — масса подаваемого на охлаждение воздуха G_v . Тепловой баланс зоны охлаждения можно определить по формуле

$$G_{мсм}(T_2 - T_k) + G_{фсф}(T_2 - T_k) = G_{нв}(2493 + 1,97T_{в2}) + \\ + G_{всв}(T_{в2} - T_{в1}) + \alpha A[(T_2 + T_k)/2 - T_{oc}], \quad (14.11)$$

где $G_{м}$, $G_{ф}$, $G_{нв}$, $G_{в}$ — соответственно масса выгружаемого материала, форм, испаряемой влаги, воздуха на охлаждение; $c_{м}$, $c_{ф}$, $c_{в}$ — соответственно теплоемкость влажного железобетона, форм-вагонеток, воздуха; α — коэффициент теплоотдачи в окружающую среду; A — площадь окружающих конструкций; T_2 , T_k , $T_{в1}$, $T_{в2}$, T_{oc} — соответственно температура в начале зоны охлаждения, равная температуре изотермической выдержки, температура выгружаемых изделий, подаваемого воздуха, отбираемого воздуха, окружающей камеру среды.

Уравнение (14.11) и является статической характеристикой зависимости $X_2 = f(X_1)$.

X. Работа воздушной завесы в зоне охлаждения не регулируется, а дистанционно включается и выключается.

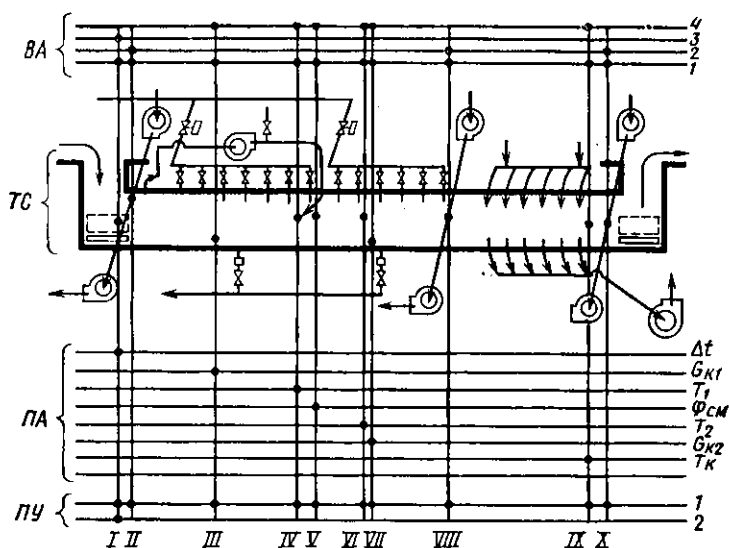


Рис. 14.4. Пример графической схемы-задания на автоматизацию щелевой пропарочной камеры

Все рассмотренные характеристики должны быть заданы, а само задание разработано в виде графика.

Графическая схема-задание на автоматизацию. В качестве примера на рис. 14.4 приведена графическая схема-задание на автоматизацию щелевой пропарочной камеры, составленная по проведенному анализу. В середине представлена собственно технологическая схема камеры ТС, выше ее справа даны четыре линии, обозначающие вид необходимой автоматизации ВА, причем они показывают: 1 — дистанционный контроль, 2 — дистанционное управление, 3 — дистанционное управление с автоматической блокировкой (защитой механизмов), 4 — автоматическое регулирование.

Под технологической схемой ТС расположены горизонтальные линии, обозначающие параметры установки, подвергаемые автоматизации, ПА. Внизу схемы расположены две горизонтальные линии ПУ, обозначающие пульты управления, причем 1 — местный (цеховой), 2 — центральный (диспетчерский). Число линий ПУ соответствует числу регулируемых параметров.

На выполненной таким образом схеме для разработ-

ки задания через участок, где должен контролироваться или регулироваться параметр, проводят вертикальную линию. В соответствии с принятым обозначением при анализе параметров регулирования (см. табл. 14.1) эти вертикальные линии обозначают римскими цифрами (см. I—X). В местах пересечения вертикальной линии с ВА точками обозначают, что надо автоматизировать: с ТС — место автоматизации, с ПА — параметр автоматизации, с ПУ — пульт управления.

Далее в порядке последовательности рассмотрена роль каждой вертикальной линии (I—X) в автоматизации процесса (см. рис. 14.4):

I — задает необходимость дистанционного управления с блокировкой механизмов системы загрузки, проталкивания и выгрузки изделий из камеры. Параметр регулирования — интервал загрузки форм-вагонеток;

II — определяет дистанционное включение и дистанционный контроль с местного пульта управления за работой воздушной завесы на загрузочном конце камеры. Параметры контроля не задаются;

III — показывает необходимость автоматического регулирования количеством удаляемого конденсата. Параметр регулирования $G_{к1}$. На пульт выводится дистанционный контроль;

IV — определяет автоматическое регулирование температуры паровоздушной смеси в конце зоны нагревания. Параметр регулирования — температура паровоздушной смеси T_1 . Процесс регулирования выводится с помощью дистанционного контроля на местный пульт;

V — задает автоматическое регулирование процесса конденсации пара на открытой поверхности изделий. В качестве параметра автоматизация используется $\varphi_{см} = p'_{п}/p'_{н}$. Процесс регулирования дистанционно контролируется;

VI — показывает необходимость автоматического регулирования температуры в зоне изотермической выдержки. Параметры регулирования — температура паровоздушной смеси T_2 . Процесс регулирования дистанционно проверяется;

VII — осуществляет автоматическое регулирование отбора конденсата. Параметр регулирования — масса отбираемого конденсата $G_{к2}$. Отбор конденсата дистанционно контролируется;

VIII — дистанционно включается и контролируется

работа воздушной завесы. Параметр регулирования не вводится;

IX — задается автоматическое регулирование температуры охлаждения материала в зоне охлаждения. Параметр регулирования — конечная температура материала T_k , которая дистанционно контролируется;

X — определяет дистанционное управление и контроль за работой воздушной завесы в конце зоны охлаждения. Параметр регулирования отсутствует.

Изображенная на рис. 14.4 схема-задание вместе с пояснительной запиской, технологической схемой работы установки и анализом параметров регулирования — исходные документы для разработки автоматической системы управления технологическим процессом тепловой обработки изделий.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

1. Что входит в комплекс АСУТП?
2. Нарисуйте принципиальную схему автоматического регулятора, и расскажите, как он работает?
3. Изложите основные принципы задания на автоматизацию.
4. Как разработать задание на автоматизацию щелевой парочной камеры?
5. Объясните принципы составления графической схемы-задания на автоматизацию тепловой установки.

РАЗДЕЛ 10. УТИЛИЗАЦИЯ ТЕПЛОТЫ И ОЧИСТКА ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ

Промышленность строительных материалов представляет собой энергоемкую отрасль. Например, если заводы машиностроительной промышленности расходуют в среднем на технологические нужды около 10% всего расхода тепловой энергии, то предприятия строительной индустрии соответственно 50—55%. Поэтому использование теплоты, выбрасываемой в атмосферу с отходящими газами печей, сушилок, конденсата парочных камер, — один из важных вопросов, стоящих перед отраслью.

Существенный резерв экономии топлива — использование вторичных энергетических ресурсов (ВЭР), кото-

рые возникают в технологии производства строительных изделий.

Экономия таких ресурсов может осуществляться двумя путями. Первый путь предусматривает повышение энергетического КПД технологических тепловых установок — сушилок, печей, пропарочных камер и т. п. В результате улучшения организации технологического процесса, условий тепло- и массообмена, режимов работы тепловых установок, применения эффективной теплоизоляции, снижения массы ограждающих конструкций, совершенствования процессов сжигания топлива значительно повышается КПД процесса тепловой обработки. Второй путь предполагает использование ВЭР, позволяющее экономить общий расход тепловой энергии по предприятиям строительной индустрии.

Повышение энергетического использования КПД рассмотрено в гл. 4. Здесь излагается использование вторичных энергетических ресурсов, образующихся при работе тепловых установок. Для тепловых установок, применяющихся в строительной индустрии, энергосодержащими отходами являются отработанные газы печей и сушилок, конденсат, отбираемый от пропарочных камер (конденсат от автоклавов используется при перепуске самими автоклавами), и теплота выгружаемой продукции.

ГЛАВА 15. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВТОРИЧНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ

Экономическая целесообразность использования вторичных энергетических ресурсов (ВЭР) определяется их температурным уровнем, тепловой мощностью и непрерывностью выдачи. Под температурным уровнем понимают температуры отходящих газов, конденсата, продукции. Тепловая мощность — объемы отходящих газов, конденсата и продукции. Непрерывность выдачи — режим работы тепловых установок.

Температура отходящих газов печей строительной индустрии составляет 373—473 К и только температурный уровень отходящих газов керамзито-обжигающих вращающихся печей составляет 700—770 К. Температура

конденсата пропарочных камер 330—350 К. Температура отходящих газов сушильных установок 310—350 К.

Объем отходящих газов, например от туннельных печей для обжига строительной керамики производительностью 30 млн. шт. кирпича в год, составляет около 20 000 м³ в час с температурой 390 К. С этими отходящими газами выбрасывается около 3 100 000 КДж тепловой энергии. Тепловая энергия, выбрасываемая одной пропарочной камерой с конденсатом при тепловлажностной обработке 20 м³ бетона за 10 ч подачи пара, составляет около 2 200 000 КДж и т. д.

Следовательно, количество выбрасываемой теплоты при обработке материала очень велико.

Если тепловую мощность ВЭР обозначить Q , то теплоту, которую можно эффективно использовать в котлах-утилизаторах, оценивают произведением $Q\eta_T$, где η_T температурный коэффициент полезного использования ВЭР. В практике η_T определяют по формуле

$$\eta_T = (T - T_0)/T_0, \quad (15.1)$$

где T и T_0 — соответственно абсолютная температура тепловых отходов и окружающей среды; η_T по данным расчетов принимают 55—60 %.

Уменьшение η_T до 50% делает процесс использования ВЭР экономически невыгодным. Если считать $T_0 = 293$ К, то минимальную температуру тепловых отходов T , при которой применение котлов-утилизаторов будет экономически целесообразным, можно определить по формуле (15.1)

$$T = \eta_T T_0 + T_0 = 0,55 \cdot 293 + 293 \approx 454 \text{ К} (\approx 180^\circ \text{C}). \quad (15.2)$$

Из этого следует, что применение котлов-утилизаторов практически оправдано только при их работе на отходящих газах в керамзитообжигающих вращающихся печах. Во всех остальных случаях использовать котлы-утилизаторы нецелесообразно.

Можно использовать и другие способы утилизации теплоты отходящих газов вращающихся печей.

Например, дальневосточный ПромстройНИИпроект совместно с Угловским заводом строительных изделий разработал и использует щелевую установку для сушки гипсопрокатных перегородок, где в качестве сушильного агента применяют отходящие газы от двух керамзитообжиговых печей. Экономия составляет около 6000 т условного топлива в год. В Москве на Бескудниковском комбинате строительных материалов № 1 теплота отходящих газов вращающихся печей используется для сушки керамзитовых гранул.

Конденсат от пропарочных камер начинают использовать заводы сборного железобетона для затворения бетонных смесей с целью их предварительного разогрева.

Для более полного вовлечения вторичных энергоресурсов подвергают утилизации низкопотенциальные виды ВЭР. Один из способов использования таких ресурсов — применение термокомпрессорных и тепловых насосов. Такой способ применим для использования воды, загрязненной растворимыми солями.

В последнее время ведутся разработки отопительно-вентиляционного оборудования, использующего выбрасываемую теплоту низкотемпературных отходящих газов (420—470 К) и конденсата с температурой 315—320 К.

Низкопотенциальные энергоресурсы перспективно использовать в абсорбционных холодильных установках.

Отечественная промышленность пока не производит установок для утилизации вторичных энергоресурсов, обладающих низким энергетическим потенциалом. Поэтому их целесообразно использовать внутри предприятия на технологические цели, сушку, нагрев смесей, воду затворения и т. п.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

1. Что такое температурный уровень?
2. Где и когда рационально использовать котлы-утилизаторы?
3. Как использовать низкопотенциальные виды ВЭР?

ГЛАВА 16. ОЧИСТКА ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ

Производство строительных материалов и изделий сопровождается выбросами в атмосферу отходящих газов, содержащих пыль, частицы золы и другие включения, загрязняющие окружающую среду. В настоящее время очистка отходящих газов от этих примесей — один из основных вопросов охраны окружающей среды.

Для очистки производственных выбросов применяют следующие способы: гравитационный, механический, фильтровальный, электрический, мокрый.

Гравитационный способ. Самая простая и распространенная установка, предназначенная для очистки газов от крупных включений указанным способом, — пылесадительная камера (рис. 16.1).

Запыленный газ поступает через патрубок 1 в каме-

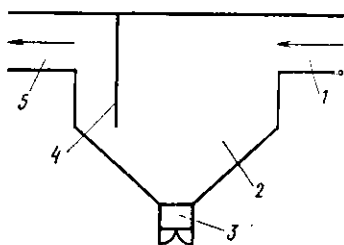


Рис. 16.1. Схема пылесадительной камеры

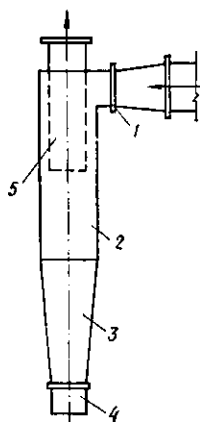


Рис. 16.2. Схема центробежного циклона

ру 2. Здесь скорость газа резко падает, и частицы пыли под действием силы тяжести оседают на днище камеры, откуда через челюстной затвор 3 периодически удаляются. Для создания более длинного пути движения газов устраивают отражающую перегородку 4, которая способствует дополнительному осаждению некоторого количества пыли. Частицы, двигаясь в потоке, продолжают по инерции прямолинейное движение, ударяются о перегородку 4, теряют скорость и осаждаются. Очищенный газ удаляется через патрубок 5. Степень очистки газа от пыли в таких камерах невелика (30—40%). Пылесадительные камеры применяются в барабанных сушилках, вращающихся печах для обжига керамзита и др.

Механический способ. Такой способ более эффективен, чем гравитационный. Механическая очистка газов происходит в центробежных циклонах (рис. 16.2).

Циклон состоит из патрубка 1 для ввода запыленного газа, вертикального цилиндрического корпуса 2 с коническим днищем 3 и пылеотводящего патрубка 4. Для отвода очищенного газа в циклоне устраивается выхлопная труба 5. Патрубок 1 вваривается в корпус 2 по касательной к цилиндру, поэтому поступающий на очистку газ движется в корпусе по спирали вниз.

При вращательном движении потока частицы пыли (как более тяжелые) перемещаются в направлении центробежной силы быстрее частиц газа, концентрируются у стенок корпуса и выпадают на коническое днище.

Очищенный газ, продолжая вращаться по спирали, поднимается вверх и через выхлопную трубу 5 удаляется из циклона. Осевшая пыль через пылеотводящий патрубок 4 выводится в пылесборник.

Такие циклоны, конструкция которых разработана научно-исследовательским институтом по санитарной и промышленной очистке газов (НИИОгаз), выпускаются с диаметром корпуса 100—1000 мм. Степень очистки газов в них составляет 30—95%, причем для пыли с частицами до 5 мкм — 30%, для пыли с частицами 20 мкм и выше возрастает до 95%.

Расчет циклонов весьма сложен, поэтому их подбирают по упрощенной методике. Сначала определяют фиктивную скорость газа v_{ϕ} по формуле

$$v_{\phi} = \sqrt{2\Delta p / \zeta \rho}, \quad (16.1)$$

где Δp — гидравлическое сопротивление циклона, Па; ρ — плотность газа, кг/м³; ζ — коэффициент гидравлического сопротивления, принимаемый по теплотехническим справочникам.

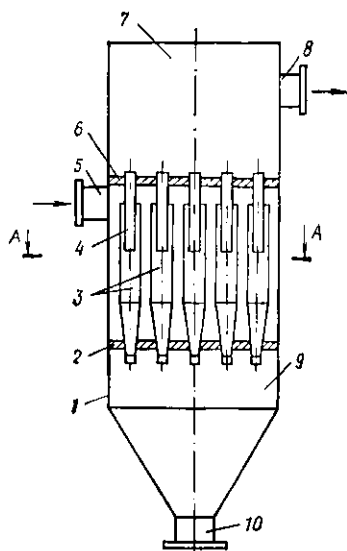
Для циклонов НИИОгаз $\Delta p / \rho$ составляет 500—700. Диаметр циклона выбирается по формуле

$$d = \sqrt{4V / \pi v_{\phi}}, \quad (16.2)$$

где d — внутренний диаметр циклона, м; V — расход газа, м³/с.

Для очистки больших количеств запыленного газа вместо одного циклона большого диаметра применяют несколько циклонов, каждый небольшого диаметра, и монтируют в общем корпусе. Такие циклоны называют батарейными (рис. 16.3). За счет уменьшения радиуса вращения потока запыленных газов степень их очистки батарейными циклонами повышается и может достигать 98%.

В металлическом корпусе 1 смонтировано несколько параллельно работающих циклонных элементов 3. Циклонные элементы крепятся на решетке 2, которая одновременно изолирует камеру для сбора уносов 9 от попадания в нее запыленного газа. Верх циклонных элементов крепится в решетке 6, которая также не пропускает запыленный воздух в камеру 7. Запыленный газ через патрубок 5 попадает в корпус батарейного циклона и распределяется параллельно во все циклонные элементы 3. Очищенный газ через выхлопные трубы циклонных элементов 4 попадает в сборную камеру 7 и через патрубок 8 удаляется из циклона. Осажденные час-



A - A

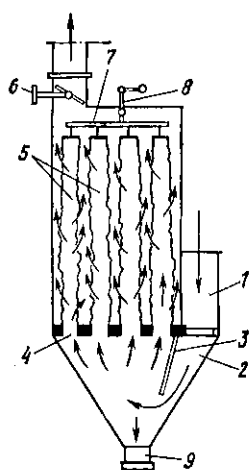
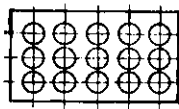


Рис. 16.4. Схема рукавного фильтра

Рис. 16.3. Схема батарейного циклона

тицы из циклонных элементов попадают в камеру 9 и через патрубок 10 выводятся из циклона.

Существуют другие виды батарейных циклонов, однако принцип их работы не отличается от изложенного. Обычно общее гидравлическое сопротивление батарейных циклонов не превышает гидравлического сопротивления единичных циклонов и составляет 400—700 Па.

Фильтровальный способ. При очистке фильтрованием газы, содержащие пылевидные твердые частицы, пропускают через пористые перегородки из природных, синтетических или минеральных волокон и нетканых волокнистых материалов (войлок, пористый картон). В качестве фильтрующего слоя применяют также перегородки из зернистых материалов (кварцевый песок, пористая керамика, пористые пластмассы и др.).

Самые распространенные — фильтры с мягкими перегородками, называемые рукавными фильтрами

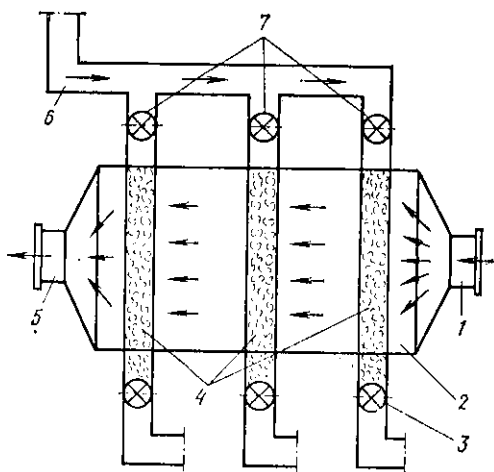


Рис. 16.5. Схема фильтра с зернистым слоем

(рис. 16.4). Запыленный газ через патрубок 1 нагнетается вентилятором в камеру 2, огибает разделительную стенку 3 и попадает в тканевые рукава 5 через отверстия распределительной решетки 4, в которые закреплены концы этих рукавов. Пыль осаждается на ткани, а очищенный газ через патрубок, снабженный дроссельной заслонкой 6, удаляется из фильтра.

Во избежание засорения ткани частицами пыли, оседающими на внутренних поверхностях тканевых рукавов, их периодически встряхивают. Для этого рукава каждой секции подвешены к планке 7, которая соединена со встряхивающим механизмом 8. Для встряхивания закрывают заслонку 6 и в течение 15—20 с рукава встряхивают, затем заслонку 6 открывают, и фильтр вновь включается в работу. Накопившуюся в камере 2 пыль через шлюзовую затвор 9 выводят из фильтра.

Для очистки газов также применяют фильтры с зернистым слоем (рис. 16.5). Загрязненный газ через патрубок 1 вентилятором нагнетается в полость фильтра 2 и последовательно проходит через несколько слоев свободно насыпанного зернистого материала 4. Очищенный воздух удаляется через патрубок 5.

Фильтровальные слои 4, выполненные из мелкораздробленных гравия, пористой керамики и др., засыпа-

ются в пространство, ограниченное сетками, и периодически заменяются, для чего устроена система питания 6, осуществляемая через секторные питатели 7, устроенные на всю длину фильтровального элемента. Материал выгружают из фильтровальных слоев секторными питателями 3. Загрязненный фильтровальный слой можно промывать или заменять новым.

Такие фильтры используют для тонкой очистки газов; их можно также применять для химической очистки от сернистых и других соединений путем замены одного слоя слоем химического поглотителя.

Электрический способ. Основан на ионизации молекул электрическим разрядом. Газ пропускают сквозь электрическое поле, образованное двумя электродами, к которым подведен постоянный ток высокого напряжения. Газ ионизируется, частицы пыли получают заряд и перемещаются к противоположно заряженному электроду.

При полной ионизации газа между электродами возникают условия для электрического разряда. С дальнейшим увеличением напряжения электрического поля возможен электрический пробой и короткое замыкание электродов. Во избежание этого создают неоднородное электрическое поле путем устройства электродов в виде натянутой между параллельными пластинами или вдоль оси трубы. Наиболее высокая напряженность поля создается у проволоки, а по мере приближения к пластине или трубе она постепенно убывает, поэтому пробой исключается.

При достаточной напряженности поля для полной ионизации между электродами возникает коронный разряд, сопровождающийся голубоватым свечением. Электрод, вокруг которого образуется такой разряд, называют *коронирующим электродом*; другой, выполненный в виде пластины или трубы, — *осадительным электродом*. Коронирующие электроды присоединяются к отрицательному полюсу источника тока, а осадительные к положительному.

При возникновении коронного разряда образуются положительные, отрицательные и свободные ионы. Положительные, двигаясь к коронирующему электроду, нейтрализуются на нем. Отрицательные, свободные, ионы перемещаются к осадительному электроду. Соприка-

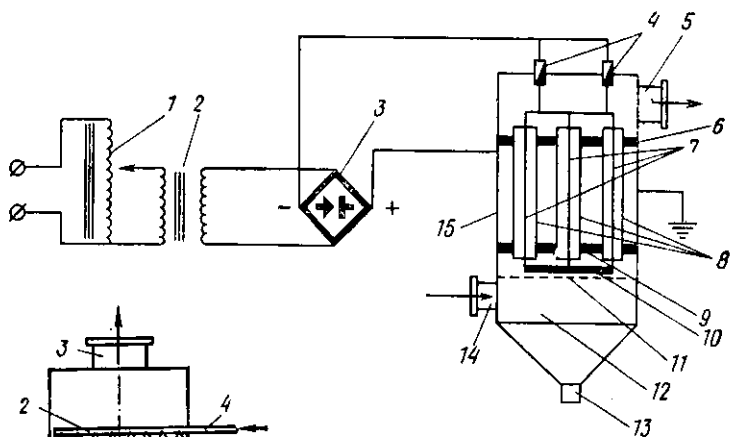


Рис. 16.6. Схема электрофильтра

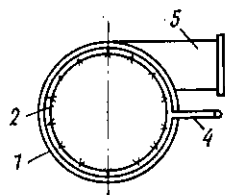


Рис. 16.7. Схема центробежного скруббера конструкции ВТИ

саясь с частицами пыли, они сообщают им свой заряд и увлекают их также к осадительному электроду.

Схема простейшего электрофильтра показана на рис. 16.6. Питание осуществляется с помощью электрической установки, состоящей из регулятора напряжения 1, повышающего напряжения с 380/220 В до 100 кВ и выше, трансформатора 2 и высоковольтного выпрямителя 3. После выпрямления ток подводится через про-

ходные изоляторы 4 к коронирующим электродам 7 и к осадительным 8. Запыленные газы подаются через патрубок 14 в камеру 12 и через распределительную решетку 11 попадают в трубы осадительных электродов 8.

Для исключения движения запыленного газа в межтрубном пространстве устанавливаются решетки 9 и 6. Коронирующие электроды 7 снизу закрепляются в стабильном положении с помощью рамы 10. Из трубного пространства очищенный газ через патрубок 5 удаляется из фильтра. Пыль с осадительных электродов 8 периодически удаляется с помощью стряхивающих или ударных механизмов, которыми оснащены фильтры; далее через камеру 12 и шиловый затвор 13 пыль выводится из установки.

Мокрый способ. Очистку запыленного газа от очень мелких включений осуществляют с помощью промывки водой или другой жидкостью. Взаимодействие между жидкостью и газом осуществляется в мокрых пылеуловителях, называемых *скрубберами*. Мокрая очистка применяется тогда, когда допустимо увлажнение и охлаждение отходящих запыленных газов.

Простейший центробежный скруббер конструкции Всесоюзного теплотехнического института (ВТИ) им. Ф. Э. Дзержинского (рис. 16.7) состоит из цилиндрического корпуса 1. Через входной патрубок 5, расположенный тангенциально по отношению к корпусу, вентилятором подается запыленный газ. Стенки корпуса через кольцевой трубопровод 2 орошаются водой, поступающей из магистрали через патрубок 4. Взвешенные в поднимающемся потоке по винтовой линии частицы пыли под действием центробежной силы отбрасываются к стенкам скруббера, смачиваются водяной пленкой и уносятся с водой через патрубок 6. Очищенный и охлажденный газ удаляется через патрубок 3. Скорость движения газа в таких скрубберах не превышает 1—1,5 м/с. Степень очистки для частиц размером 5—30 мкм составляет 85—90%.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

1. Перечислите способы очистки газов, и дайте их краткую характеристику.

2. Что такое циклон, рукавный фильтр, электрофильтр, скруббер? Как они работают?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ахвердов И. Н. Основы физики бетона. — М.: Стройиздат, 1981. — 464 с.
- Баженов Ю. М. Технология бетона. — М.: Высшая школа, 1978. — 455 с.
- Волженский А. В. Минеральные вяжущие: Учеб. для вузов. 4-е изд. — М.: Стройиздат, 1986. — 464 с.
- Долгополов Н. Н. Электрофизические методы в технологии строительных материалов. — М.: Стройиздат, 1971. — 280 с.
- Еремин Н. Ф. Процессы и аппараты в технологии строительных материалов: Учеб. для вузов. — М.: Высшая школа, 1986. — 280 с.
- Кучеренко А. А. Тепловые установки заводов сборного железобетона: Уч. пос. для вузов. — Киев: Вища школа, 1977. — 278 с.
- Лариков Н. Н. Теплотехника: Учеб. для вузов. 3-е изд. — М.: Стройиздат, 1985. — 432 с.
- Лыков А. В. Теория сушки. — М.: Энергия, 1968. — 472 с.
- Никифорова Н. М. Теплотехника и теплотехническое оборудование предприятий промышленности строительных материалов и изделий: Учеб. для техникумов. — М.: Высшая школа, 1981. — 271 с.
- Перегудов В. В., Роговой М. И. Тепловые процессы и установки в технологии строительных изделий и деталей: Учеб. для вузов. — М.: Стройиздат, 1983. — 416 с.
- Роговой М. И., Кондакова М. И., Сагановский М. Н. Расчеты и задачи по теплотехническому оборудованию предприятий промышленности строительных материалов. — М.: Стройиздат, 1978. — 360 с.
- Строительная керамика: Справочник/Под ред. Е. Л. Рохварге-ра. — М.: Стройиздат, 1976. — 493 с.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

Автоматизация комплексная 92 и сл.

Алгоритм 164

Баланс аэродинамический 111 и сл., 195, 299

— материальный 50, 174, 233, 297

— тепловой 50, 176, 253, 297

Вентилятор осевой 115

— центробежный 116—119

Влажность воздуха абсолютная 39

— относительная 39, 42, 73, 158, 264

Газ идеальный 6

— реальный 6

Градиент влагосодержания 72, 85, 155

— давления 54, 80, 85, 156, 206

— потенциала переноса массы 61,

— температурный 53, 61, 72, 155, 206

Давление абсолютное 8

— динамическое

— избыточное 8, 81

— манометрическое 8

Движение неустановившееся 101

— установившееся 101

Диаметр эквивалентный 103

Доля массовая 9

Закон сохранения массы 111, 253

— — энергии 17

— термодинамики первый 18

— — второй 28

Коэффициент

— избытка воздуха 131

— излучения 59

— массопередачи 64, 68

— массопроводности 66

— потенциалопроводности 66

— теплоотдачи 57, 60, 62

— термоградиентный 67

Критерий Бюа 98

— Нуссельта 98

— оптимизации 91

— Прандтля 98

— Рейнольдса 98, 103

— Фурье 98

Моделирование 97

Модель математическая 99, 161, 163

— физическая 97, 160

Напор геометрический 104

— статический 105

Объем удельный 7, 32

- газовой смеси 11
- парциальный 10
- Пар насыщенный 33
- влажный 34
- сухой 34
- Плотность газа 7
- газовой смеси 11
- Параметр автоматизации 309—314
- регулирования 95, 157, 307—309
- термодинамический 5
- Процесс адиабатный 24
- изобарный 21, 35
- изотермический 23
- изохорный 20
- необратимый 5, 17
- обжига 45, 187 и сл
- обратимый 5
- политропный 26
- суши 44, 152, 264
- тепловлажностной обработки 44, 258
- тепло- и массообменный 44, 56, 197, 259
- Радиус гидравлический 103
- Режим тепловой 43
- Сечение потока живое 102
- Сопротивление аэро- и гидродинамическое
- каналов 106, 121
- кипящего слоя 109
- слоя волокнистых материалов 109
- слоя кусковых и сыпучих материалов 108, 110
- Тело капиллярно-пористое 46
- коллоидное 46
- рабочее 4, 16, 44
- Температура кипения 33
- насыщения 33
- термодинамическая 7
- Цельсия 7
- Теория подобия 97
- Теплоемкость истинная 12
- объемная 12
- — смеси 13
- удельная массовая 12
- Теплопроводность 61
- Топливо технологическое 123
- условное 129
- Управляющий вычислительный комплекс (УВК) 93
- Эжектор 114, 282
- Энергия 5
- внутренняя 13, 17
- Энтальпия 18, 32, 37, 40
- Энтропия 18, 37

О Г Л А В Л Е Н И Е

Предисловие	3
Раздел 1. Теоретические основы теплотехники	4
<i>Глава 1. Основы технической термодинамики</i>	<i>4</i>
1.1. Общие понятия и определения	4
1.2. Основные параметры состояния газов	6
1.3. Смеси идеальных газов	8
1.4. Теплоемкость газов	12
1.5. Понятие о внутренней энергии	13
1.6. Работа газа при его расширении	14
1.7. Первый закон термодинамики	17
1.8. Процессы изменения состояния газа	19
1.9. Второй закон термодинамики	28
1.9.1. Круговые процессы	29
1.9.2. Цикл Карно	30
<i>Глава 2. Водяной пар</i>	<i>32</i>
2.1. Понятие о процессе парообразования	32
2.2. Построение процесса парообразования в T_s и i_s -диаграммах	35
<i>Глава 3. Влажный воздух</i>	<i>39</i>
3.1. Основные определения влажного воздуха	39
3.2. i_d -диаграмма влажного воздуха	41
<i>Глава 4. Основы тепло- и массообмена. Особенности тепловой обработки</i>	<i>43</i>
4.1. Основные понятия о тепловой обработке	44
4.2. Классификация способов тепловой обработки	44
4.3. Влажный материал, подвергаемый тепловой обработке	45
4.4. Понятие о тепловых установках, материальном и тепловом балансах	48
4.5. Особенности тепло- и массообмена	51
4.5.1. Основные определения	52
4.5.2. Виды теплообмена	56
4.5.3. Массообмен	63
4.6. Внешний тепло- и массообмен	67
4.6.1. Внешний тепло- и массообмен при сушке	67
4.6.2. Внешний тепло- и массообмен при тепловлажностной обработке	69
4.7. Внутренний тепло- и массообмен	71
4.7.1. Внутренний тепло- и массообмен при сушке	71
4.7.2. Внутренний тепло- и массообмен при тепловлажностной обработке	83
4.8. Напряженное состояние в материале при тепловой обработке	86
4.9. Принципы оптимизации тепловой обработки строительных изделий	91

4.9.1. Понятие о принципах использования ЭВМ в установках для тепловой обработки	91
4.9.2. Обеспечение применения ЭВМ	95
4.9.3. Принципы моделирования	97
4.9.4. Методы исследования процессов тепловой обработки	99
Раздел 2. Основы аэро- и гидродинамики	101
Глава 5. Основы аэро- и гидродинамики тепловых установок	101
5.1. Основные понятия о движении жидкости	101
5.2. Причины движения жидкости	104
5.3. Уравнение Бернулли и его применение	105
5.3.1. Аэро- и гидродинамическое сопротивление капалов и трубопроводов	106
5.3.2. Аэродинамическое сопротивление тепловых установок	107
5.4. Аэродинамические балансы тепловых установок	111
5.5. Устройства для перемещения теплоносителя в тепловых установках	114
5.6. Снабжение паром тепловых установок	120
Раздел 3. Топливо и процесс горения	122
Глава 6. Топливо и его сжигание	122
6.1. Виды топлива и его свойства	123
6.2. Процесс горения топлива и принципы его расчета	129
Раздел 4. Теплогенерирующие установки	134
Глава 7. Тепловые генераторы в производстве строительных материалов и изделий	134
7.1. Классификация тепловых генераторов	134
7.2. Принципы использования тепловых генераторов для сушильных установок	136
Раздел 5. Понятие об установках, преобразующих тепловую энергию в механическую	144
Глава 8. Тепловые двигатели и тепловые электрические станции	145
8.1. Понятие о двигателях внутреннего сгорания	145
8.2. Понятие о двигателях внешнего сгорания	147
8.3. Понятие о тепловых электрических станциях	149
Раздел 6. Сушка материалов и изделий	152
Глава 9. Сушка и сушильные установки	152
9.1. Теоретические основы сушки	152
9.1.1. Кинетика сушки влажных материалов	153
9.1.2. Тепло- и массообмен. Напряженное состояние в материале при сушке	155
9.2. Система: материал — сушильная установка	157
9.2.1. Разработка математической модели системы: материал — сушильная установка	160
9.2.2. Анализ математических моделей, и оптимизация процесса сушки	165
9.3. Сушильные установки	165
9.3.1. Сушилки для суспензий	166
9.3.2. Сушилки для кусковых и сыпучих материалов	167
9.3.3. Установки для сушки сформованных изделий	170
9.4. Принципы теплового и аэродинамического расчета сушильных установок	174
9.4.1. Расчет материального баланса	174
9.4.2. Расчет теплового баланса	176
9.4.3. Теоретический процесс сушки в Jd -диаграмме	177
9.4.4. Действительный процесс сушки в Jd -диаграмме	181
9.4.5. Процесс сушки с частичным использованием отработанного сушильного агента	183
Раздел 7. Обжиг материалов и изделий	187
Глава 10. Теоретические основы процессов обжига	187
10.1. Особенности физико-химических процессов обжига	187
10.2. Схемы и принципы работы промышленных печей	191
10.3. Тепло- и массообмен при обжиге	197
10.3.1. Внешний тепло- и массообмен при обжиге	197
10.3.2. Внутренний тепло- и массообмен при обжиге	202
10.4. Усадка и деформации в процессе обжига	209
10.5. Система: материал — обжигательная установка	217
Глава 11. Обжиговые установки	222
11.1. Установки для обжига гипса	223
11.2. Известкообжигательные печи	227
11.2.1. Шахтные печи, работающие на твердом топливе	227
11.2.2. Шахтные печи, работающие на природном газе	231
11.2.3. Печи кипящего слоя	233
11.3. Печи для обжига искусственных заполнителей бетона	236
11.3.1. Вращающиеся печи для обжига керамзитового гравия	236
11.3.2. Спекательные установки для обжига аглопорита	240

11.4. Печи для обжига сформованных изделий	242
11.4.1. Кольцевые печи	242
11.4.2. Туннельные печи	247
11.4.3. Щелевые печи	250
11.5. Принципы теплотехнического расчета промышленных печей	253
Раздел 8. Тепловлажностная обработка бетона и железобетона	256
<i>Глава 12. Теоретические основы тепловлажностной обработки бетона</i>	<i>256</i>
12.1. Тепловлажностная обработка бетона паром	258
12.2. Обработка бетона газообразным теплоносителем	262
12.3. Тепловлажностная обработка бетона с помощью электронагрева	267
12.4. Электрофизические методы тепловлажностной обработки бетона	269
12.5. Система: материал — установка тепловлажностной обработки	272
<i>Глава 13. Установки тепловлажностной обработки бетона</i>	<i>271</i>
13.1. Классификация установок для тепловлажностной обработки бетона	274
13.2. Установки периодического действия	275
13.2.1. Камеры ямного типа	275
13.2.2. Кассетные установки	285
13.2.3. Пакетные установки	286
13.2.4. Автоклавы	288
13.3. Установки непрерывного действия	289
13.3.1. Горизонтальные щелевые пропарочные камеры	290
13.3.2. Вертикальные пропарочные камеры	294
13.4. Принципы теплотехнического расчета установок для тепловлажностной обработки	296
3.5. Установки для нагревания заполнителей бетона и бетонной смеси	303
Раздел 9. Принципы автоматизации тепловых установок	306
<i>Глава 14. Использование системы автоматического регулирования в технологическом комплексе АСУТП</i>	<i>307</i>
14.1. Основные понятия о системе автоматического регулирования	307
14.2. Разработка задания на автоматизацию тепловых установок	309
Раздел 10. Утилизация теплоты и очистка отходящих газов	322
<i>Глава 15. Экономическая целесообразность использования вторичных энергетических ресурсов</i>	<i>323</i>
<i>Глава 16. Очистка отходящих газов</i>	<i>325</i>
Список литературы	333
Предметный указатель	333