




ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
УПРАВЛЕНИЕ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ
КВАЛИФИКАЦИИ

Кафедра «Технология вяжущих веществ, бетонов и
строительной керамики»

Учебное пособие

«Явления теплопереноса в технологии производства строительных материалов»



Авторы
Явруян Х.С.,
Лотошникова Е.О.

Ростов-на-Дону, 2017

Аннотация

Настоящее издание предназначено для бакалавров направления подготовки 08.03.01 «Строительство» всех форм обучения.

Учебное пособие включает все необходимые сведения об основных тепловых и массообменных процессах, принципы функционирования отдельных аппаратов, в основном используемых в промышленности строительных материалов. Являясь промежуточной дисциплиной, данный курс достаточно хорошо базируется на знаниях фундаментальных наук, но вместе с тем содержит многочисленные примеры реализации процессов в производстве строительных материалов.

Авторы

к.т.н., профессор кафедры «ТВВБиСК» Явруян Х.С.,
к.т.н., доцент кафедры «ТВВБиСК» Лотошникова Е.О.





Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	4
1 ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ	5
1.1 Основы теплообмена	6
1.2 Основное уравнение теплопередачи.....	10
1.3 Другие схемы теплообмена в установках для тепловой обработки строительных материалов.....	11
1.4 Теплообмен при изменении агрегатного состояния вещества.....	13
1.5 Внешний и внутренний теплообмен капиллярно- пористых тел.....	16
1.6 Основные виды теплоносителей и их свойства	18
1.7 Аппараты для перемещения теплоносителя (вентиляторы, эжекторы, дымовые трубы).....	21
1.8 Показатели работы тепловых установок	24
2 ОСНОВЫ МАССООБМЕНА	28
2.1 Определение, назначение и классификация массообменных процессов	28
2.2 Механизм и модели процессов массоотдачи	29
2.3 Основные законы массообмена	31
2.4 Основное уравнение массопередачи и движущая сила процесса	35
2.5 Равновесие при массопередаче.....	37
2.6 Основные закономерности массопереноса в капиллярно – пористых телах	38
3 ТЕПЛОВАЯ ОБРАБОТКА ИЗДЕЛИЙ	41
3.1 Определение и основные понятия	41
3.2 Сушка сырья, полуфабрикатов и изделий	42
3.3 Тепловлажностная обработка полуфабрикатов, отформованных изделий, деталей и конструкций	49
3.4 Обжиг сырья, полуфабрикатов, изделий.....	53
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	56

ВВЕДЕНИЕ

При производстве строительных изделий и материалов во всех случаях для перевода сырья в новое качество – готовую продукцию – применяется тепловая обработка. Тепловая обработка дает возможность придать сырью новые, качественно отличные свойства, необходимые в строительстве.

При тепловой обработке в материалах и изделиях происходят физико-химические превращения, формируется структура, идут процессы тепло- и массообмена, возникает напряженное состояние.

Рассматривая в целом процессы, происходящие в материалах и изделиях при тепловой обработке, необходимо помнить, что они являются следствием процессов, происходящих в тепловых установках.

Для создания экономичных тепловых процессов необходимы глубокие знания в области тепловой обработки строительных материалов и изделий, устройства тепловых установок, их конструирования и эксплуатации.

Тепловая обработка является одной из основных составных частей технологии производства строительных материалов и изделий. На тепловую обработку затрачивается около 30% стоимости производства строительных материалов и изделий, кроме того она потребляет около 80% от расходуемых на весь производственный цикл топливно-энергетических ресурсов.

Создание необходимых тепловых процессов, позволяющих получить изделие хорошего качества с минимальными затратами и электроэнергии, дает возможность уменьшить капиталовложения в сферу строительства.

1 ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ

Одна из основных составных частей технологии строительных материалов – тепловая обработка, на которую затрачивается около 30 % стоимости производства. Тепловые процессы связаны с теплообменом между теплоносителями, отличаются большим разнообразием. В общем уравнении теплового баланса

$$\sum_{i=1}^{i=n} Q^n = \sum_{k=1}^{k=n} Q^p \quad (1.1)$$

В число других слагаемых входят тепловые эффекты процессов, протекающих в аппаратах. К ним относятся тепловые эффекты фазовых превращений – испарения, конденсации, плавления, растворения, экзотермии и др. Для осуществления таких фазовых переходов необходимо либо подводить поглощаемое тепло, либо отводить выделяющуюся при этом теплоту. Этот процесс осуществляется путем теплообмена между системой, в которой эти превращения происходят, и холодным или горячим теплоносителем. С другой стороны, в аппаратах протекают химические процессы, сопровождающийся либо выделением тепла (экзотермические реакции), либо его поглощением (эндотермические реакции). Для того, чтобы химический процесс протекал с достаточной скоростью и с достаточно высоким выходом продуктов реакции, в аппарате должна поддерживаться определенная оптимальная температура. Интервал температур, при которых протекают технологические процессы, чрезвычайно широк. Методы теплообмена и виды теплоносителей отличаются большим разнообразием.

Эксплуатационные свойства материалов в значительной степени зависят от рационального выбора теплового режима и оборудования. Эти же факторы определяют технико– экономические показатели технологии.

Тепловыми называются технологические процессы, в ходе которых материал нагревается или охлаждается, а скорость их протекания определяется скоростью подвода или отвода тепла. Тепловые процессы подразделяются на *процессы без изменения агрегатного состояния* и *процессы с изменением агрегатного состояния*. К первым относятся нагревание, охлаждение, прокаливание, ко вторым – выпаривание, испарение, конденсация, отвердевание, плавление.

Явления теплопереноса в технологии производства строительных материалов

Нагревание – процесс повышения температуры материала путем подвода теплоты. *Охлаждение* – процесс понижения температуры путем отвода теплоты. *Испарение* – процесс перевода жидкости в парообразное состояние путем подвода тепла; *конденсация* – процесс перехода пара в жидкое состояние путем отвода тепла. В качестве источника тепла в строительной индустрии используется: теплота горения топлива (теплоноситель – дымовые газы); теплота экзотермических реакций (теплоноситель – продукты реакции); электрическая энергия. Использование теплоты отходящих газов и жидкостей позволяет значительно снизить расход топлива и улучшить технико – экономические показатели работы завода.

Перечисленные источники тепла применяются для непосредственного нагрева. Большое распространение имеют промежуточные теплоносители: водяной пар, минеральные масла, перегретая вода, высококипящие органические жидкости и их пары, плавленные металлы и соли.

В процессах охлаждения, вплоть до температуры окружающей среды, в качестве хладагента используется вода, воздух.

1.1 Основы теплообмена

Теплообмен – это передача энергии в форме тепла от тела с большей температурой телу с меньшей температурой. *Движущей силой* процесса является *разность температур*, участвующих в теплообмене тел. Различают три механизма переноса теплоты: *теплопроводность, конвекция и излучение.*

Теплопроводность – это перенос теплоты в результате движения молекул, атомов, ионов, свободных электронов и пр. Количество теплоты, передаваемое теплопроводностью, описывается уравнением Фурье:

$$Q = -\lambda F \frac{dt^\circ}{dn}, \quad (1.2)$$

где: Q – количество теплоты, передаваемой в единицу времени;
 λ – коэффициент теплопроводности;
 F – площадь поперечного сечения тела;

$\frac{dt^\circ}{dn}$ – градиент температуры.

Количество тепла, передаваемого через единицу поверхно-

Явления теплопереноса в технологии производства строительных материалов

сти в единицу времени, называют *плотностью теплового потока*

$$q = \frac{Q}{F\tau} = -\lambda \frac{dt^\circ}{dn} = -\lambda \text{grad}T \quad (1.3)$$

Коэффициент λ зависит от состояния вещества, температуры, давления, атомно-молекулярного строения и других факторов. Он возрастает с повышением температуры и давления.

Сильное влияние на λ оказывает влажность материала, т.к. теплопроводность воды в 25 раз больше теплопроводности воздуха. Чаще всего в передаче тепла теплопроводностью встречаются случаи передачи тепла через однослойную и многослойную стенку. В этом случае количество теплоты определяется по формулам:

для однослойной стенки

$$Q = \frac{\lambda}{\delta} (T_{cm1} - T_{cm2}) F \tau; \quad (1.4)$$

для многослойной

$$Q = \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{\delta_i} (T_{cm1} - T_{cm2}) F \tau, \quad (1.5)$$

где: δ, δ_i – толщина стенки или слоя стенки;

λ, λ_i – коэффициент теплопроводности материала стенки или ее i -слоя;

T_{ct1} – температура на «горячей» стороне стенки;

T_{ct2} – температура на «холодной» стороне стенки;

F – площадь стенки;

τ – время процесса.

Передача тепла *конвекцией* происходит в жидкостях и газах вследствие движения и перемешивания их микроскопических объемов. Конвекция может быть вынужденной или принудительной и свободной или естественной. Конвекция сопровождается теплопроводностью. Перенос тепла тем интенсивнее, чем больше турбулентен поток и чем энергичнее осуществляется перемешивание его частиц.

В ядре потока перенос тепла осуществляется одновре-

Явления теплопереноса в технологии производства строительных материалов

менно конвекцией и теплопроводностью. Такой теплообмен называется конвективным. Но мере приближения к стенке интенсивность теплоотдачи падает, что объясняется наличием малоподвижного приграничного слоя, передача тепла в котором осуществляется в основном теплопроводностью. Поэтому для интенсификации процесса теплообмена нужно, чтобы тепловой пограничный слой был возможно тоньше. В этом случае конвекция начинает оказывать доминирующее влияние на теплообмен. Для описания процесса конвективного теплообмена используют закон Ньютона-Рихмана

$$dQ = \alpha dF (T_{ст} - T_{жс}) d\tau, \quad (1.6)$$

где: α – коэффициент теплоотдачи;
 $T_{ст}$ – температура стенки;
 $T_{жс}$ – температура теплоносителя.

Величина коэффициента α зависит от многих факторов: режима течения жидкости, ее тепловых свойств, геометрических параметров и шероховатости стенки. Определяют α путем обобщения опытных данных с помощью теории подобия.

В качестве тепловых критериев используют:

критерий Фурье $F_0 = \frac{\alpha \tau}{l^2}$ – определяет необходимые условия установившегося потока;

критерий Пекле $Pe = \frac{vl}{a}$ – мера соотношения конвективной и кондуктивной составляющих при теплообмене;

критерий Прандтля $Pr = \frac{\eta C_p}{\lambda}$ – мера подобия полей температур и скоростей. Характеризует подобие физических свойств теплоносителей при конвективном теплообмене;

критерий Нусельта $Nu = \frac{\alpha l}{\lambda}$ – подобие процессов теплопереноса на границе между стенкой и потоком жидкости.

В приведенных критериях:

α – коэффициент температуропроводности;
 τ – время процесса;

Явления теплопереноса в технологии производства строительных материалов

- l – характеристический размер;
- v – скорость движения теплоносителей;
- α – коэффициент теплоотдачи;
- η – динамическая вязкость жидкости.

Поскольку α входит в состав критерия Нуссельта, то он будет определяемым в критериальном уравнении, т.е.

$$Nu = f(F_0; Pr; Re; Fr; H_0; \Gamma) \quad (1.7)$$

При установившемся теплообмене критериальное уравнение упрощается:

$$Nu = \varphi(Re; Pr; \Gamma) \quad (1.8)$$

Тепловое излучение – это электромагнитное излучение, испускаемое веществом и возникающее за счет его внутренней энергии. Оно определяется температурой и оптическими свойствами вещества. С повышением температуры возрастает общая энергия теплового излучения.

Лучистая энергия распространяется прямолинейно в однородной и изотропной среде. Тела, полностью поглощающие все падающие на них лучи, называют *абсолютно черными*, если тело отражает или пропускает падающие на него лучи, то его называют *прозрачным* или *диатермичным*. Все реальные тела, которые частично поглощают, отражают или пропускают падающие на них лучи, называют *серыми*. Общее количество тепла, излучаемое поверхностью F в единицу времени, называется *лучистым тепловым потоком* q_n . Величину этого потока определяют по формуле

$$q_n = \alpha_n \Delta t, \quad (1.9)$$

где α_n – коэффициент лучистого теплообмена.

$$\alpha_n = \varepsilon_n c_0 \frac{\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4}{T_1 - T_2} \quad (1.10)$$

где: ε_n – приведенная степень черноты излучаемого или воспринимающего излучение тела;

Явления тепломассопереноса в технологии производства строительных материалов

c_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела;
 T_1 и T_2 – абсолютные температуры излучающего и поглощающего тел.

1.2 Основное уравнение теплопередачи

Теплопередача – теплообмен между двумя теплоносителями через разделяющую их твердую стенку или сквозь поверхность раздела между ними, часто встречается в практике организации тепловых процессов при производстве строительных материалов. Основное уравнение теплопередачи:

$$Q = kF\Delta t_{cp} \tau \quad (1.11)$$

где: k – коэффициент теплопередачи, определяющий среднюю скорость передачи тепла вдоль всей поверхности теплообмена;

Δt_{cp} – средняя разность температур между теплоносителями, определяющая тепловой напор.

Коэффициент теплопередачи показывает количество тепла, переходящего в 1 с от более нагретого к более холодному теплоносителю через поверхность теплообмена в 1 м² при средней разности температур между теплоносителями в 1°K. Его определяют по формуле:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (1.12)$$

где: α_1 – коэффициент теплоотдачи от первого теплоносителя к стенке;

δ_i – толщина i -слоя твердой стенки;

λ_i – коэффициент теплопроводности i – слоя твердой стенки;

α_2 – коэффициент теплоотдачи от стенки ко второму теплоносителю.

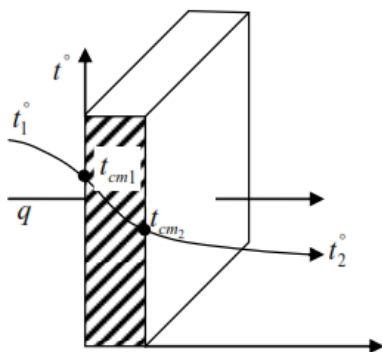


Рис. 1.1 Теплопередача через плоскую однородную стену

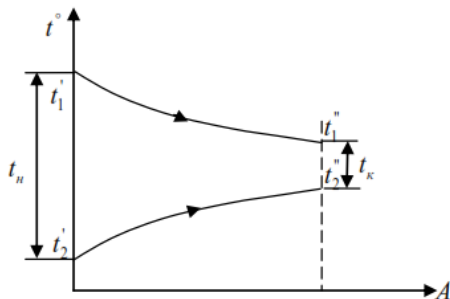


Рис. 1.2 Характер изменения температур теплоносителей при прямотоке

Средний температурный напор зависит от характера изменения температур теплоносителя вдоль поверхности теплообмена и представляет собой среднюю логарифмическую разность температур (рис. 1.2)

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_n - \Delta t_k}{\ln \frac{\Delta t_n}{\Delta t_k}} = \frac{\Delta t_n - \Delta t_k}{2,3 \lg \frac{\Delta t_n}{\Delta t_k}} \quad (1.13)$$

1.3 Другие схемы теплообмена в установках для тепловой обработки строительных материалов

Они приведены на рис. 1.3. Теплообмен конвекцией (рис. 1.3, а) характерен для большинства процессов тепловой обработки при протекании газов через плотный, кипящий и взвешенный слой материала (схема 1), через садку изделий (схема 2), у поверхности теплообменников (схема 3), над поверхностью материалов при их сушке (схема 4) и т.д.

Теплообмен лучеиспусканием (рис. 1.3, б) характерен для высокотемпературных процессов в печах вращающихся – для получения цементного клинкера, керамзита и т.д. (схема 5), ванн для расплава минерального сырья (схема 6), других печах с развитым пламенным пространством. Теплообмен лучеиспусканием при умеренных температурах (300 – 500°C) используется также

Явления теплопереноса в технологии производства строительных материалов

для сушки инфракрасными лучами (схема 7).

Передача теплопроводностью (рис. 1.3, в) имеет место при нагреве или охлаждении обрабатываемого материала, стен и других ограждений тепловых установок, а также при передаче тепла через пограничные слои теплоносителей.

Теплообмен может совершаться при установившемся состоянии, например, передача тепла через ограждения непрерывно действующих установок (схема 8) и при неустановившемся состоянии, например, нагрев изделий внешними (схема 9) или внутренними (схема 10) источниками тепла, аккумуляция тепла в стенах периодически действующих установок или в подине вагонеток туннельных печей (схема 11).

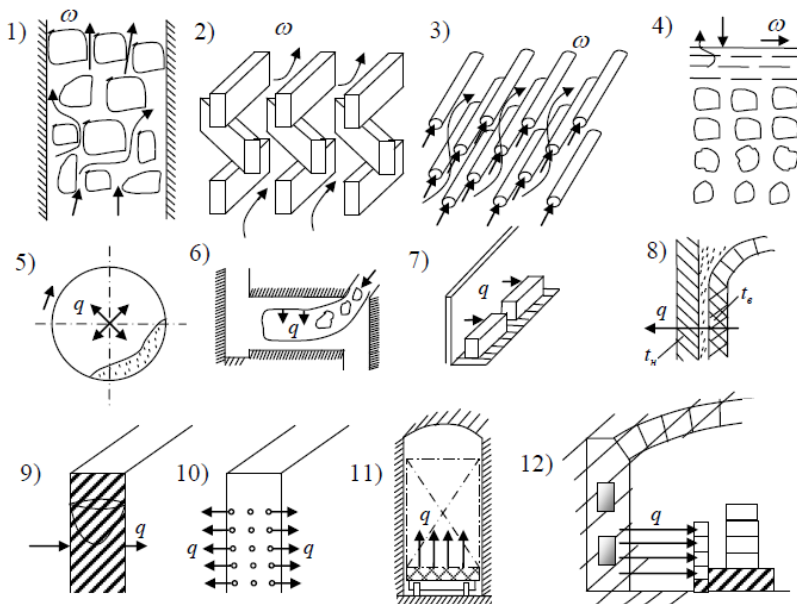


Рис. 1.3 Схемы теплообмена в установках для тепловой обработки строительных материалов:

- а – конвекцией: 1 – плотный слой; 2 – осадка изделий; 3 – теплообменник; 4 – сушка материала;
 б – лучеиспусканием: 5 – вращающаяся печь, 6 – ванная печь; 7 – сушка инфракрасными лучами;
 в – теплопроводностью: 8 – стенка ограждения установки непрерывного действия; 9, 10 – нагрев изделий внешним или внутренним источником тепла соответственно; 11 – аккумуляция тепла вагонеток туннельных печей;

В реальных производственных условиях обычно имеет место комбинированный теплообмен: от газов к материалу (внешняя задача) лучеиспусканием, конвекцией и в самом материале (внутренняя задача) – теплопроводностью. Особенно сложным является процесс теплопередачи через муфель печи к изделию (схема 12).

1.4 Теплообмен при изменении агрегатного состояния вещества

В процессе теплообмена нагреваемые или охлаждаемые тела часто меняют свое агрегатное состояние: испаряются, конденсируются, плавятся или кристаллизуются. Особенность таких процессов теплообмена заключается в том, что теплота подводится к материалам или отводится от них при постоянной температуре и распространяется не в одной, а в двух фазах. Теплоотдачу при конденсации паров можно рассчитывать путем гидродинамического и теплового анализов процесса конденсации.

Наиболее удачной следует считать схему Нуссельта, согласно которой на поверхности твердого тела, воспринимающего теплоту от пара, происходит пленочная конденсация. Пленка жидкости представляет собой основное термическое сопротивление распространению теплоты от пара к твердому телу. Эта пленка стекает с тела и по мере движения книзу уплотняется в результате конденсации пара по всей поверхности твердого тела.

По теории подобия анализ этого процесса представляет критериальную зависимость

$$Nu = f(Pe; k; Ga) \quad (1.14)$$

где: $Ga = \frac{gl^3}{\nu^2}$ – критерий Галилея.

$$k = \frac{r}{ct}$$

На основании опытных данных получена формула

$$Nu = \delta(Pe k Ga)^{0,25} \text{ или } \alpha = \delta^4 \sqrt{\frac{\lambda^3 g \rho^2 r}{H \Delta t^\circ \eta}} \quad (1.15)$$

где: r – скрытая теплота парообразования;
 α – коэффициент теплоотдачи;

Явления теплопереноса в технологии производства строительных материалов

δ – коэффициент, для случая теплоотдачи по вертикальной стенке (трубе); $\delta = 0,94$; горизонтальной $\delta = 0,72$;
 λ, ρ, η, c – физические свойства конденсата, определяемые при средней температуре пленки

$$t = 0,5(t_s^\circ + t_v^\circ) \quad (1.16)$$

где: t_s° – температура неосвещенного пара;

t_v° – температура стенки;

H – определяющий размер (высота стенки, диаметр трубы).

Теплоотдача при конденсации зависит также от скорости и направления течения паров, состояния поверхности конденсации, состава паров и степени их перегрева. Приведенные формулы справедливы для случая конденсаций неподвижного пара. Коэффициент теплоотдачи увеличивается с ростом скорости движения пара, поскольку его поток уменьшает толщину пленки конденсата или вовсе срывает ее. Теплоотдача при конденсации паров, содержащих газы, менее интенсивна, чем теплоотдача при конденсации чистых паров. Уже при содержании в водяном паре всего 1 % воздуха, его коэффициент теплоотдачи уменьшается до 60 %.

Однако в технологических установках обработку изделий ведут в паровоздушной среде.

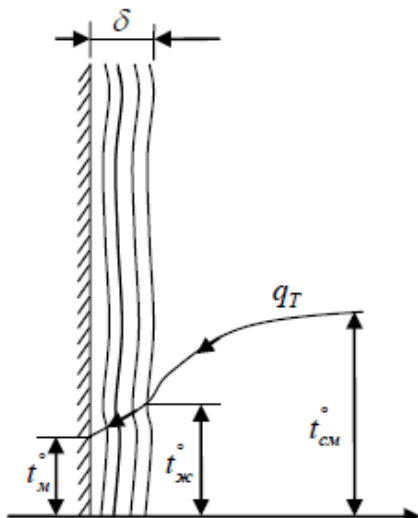
Процесс конденсации пара, находящегося в смеси с воздухом, осложняется диффузионным переносом пара к поверхности конденсации. Вместе с паром к этой же поверхности поступает воздух, понижающий парциальное давление пара. Парциальное давление смеси ($P_{см}$) будет складываться из суммы парциальных давлений сухого воздуха и пара:

$$P_{см} = P_n' + P_г' = P_n'' + P_г'' \quad (1.17)$$

где: P_n' и P_n'' – парциальное давление пара, соответственно, в окружающей среде и у поверхности материала;

$P_г'$ и $P_г''$ – то же, сухого воздуха.

Явления теплопереноса в технологии производства строительных материалов



Если λ – коэффициент теплопроводности сконденсированной пленки жидкости толщиной δ , $t_{ж}$ – температура наружной поверхности пленки; t_m – температура материала, то на основании закона Фурье

Рис. 1.4 Пленочная конденсация влаги на поверхности материала

$$q_T = \frac{\lambda}{\delta} (t_{жс} - t_m) \quad (1.18)$$

Этот суммарный поток теплоты складывается из потока теплоты от пленки сконденсированного пара $q_{ТП}$ и потока теплоты от паровоздушной смеси $q_{ТСМ}$. Удельный поток сконденсированного пара

$$g_n = a_n \frac{m_n}{RT} (P_n' - P_n'') \quad (1.19)$$

где: a_n – коэффициент массоотдачи пара;
 m_n – масса пара;
 R – универсальная газовая постоянная.

Тогда удельный поток теплоты будет равен произведению удельного потока массы на теплоту парообразования

$$q_{ТП} = r a_n \frac{m_n}{RT} (P_n' - P_n'') \quad (1.20)$$

Явления теплопереноса в технологии производства строительных материалов

Поток теплоты от паровоздушной смеси определяется уравнением Ньютона

$$q_{TCM} = \alpha_{cm}(t_{cm}^{\circ} - t_{жс}^{\circ}) \quad (1.21)$$

Тогда балансовое уравнение внешнего теплообмена при наличии пленки конденсата

$$\frac{\lambda}{\delta}(t_{жс}^{\circ} - t_{м}^{\circ}) = a_n r \frac{m_n}{RT}(P_n' - P_n'') + \alpha_{cm}(t_{cm}^{\circ} - t_{жс}^{\circ})$$

Левая часть уравнения – поток теплоты, получаемой материалом, правая часть – первый член – поток теплоты, получаемой материалом за счет конденсации пара, второй член – поток теплоты, получаемой материалом за счет теплообмена с паровоздушной смесью.

1.5 Внешний и внутренний теплообмен капиллярно-пористых тел

Рассмотрим два случая: теплообмен между окружающей средой и нагреваемым материалом (внешний теплообмен) и теплообмен между центральной зоной материала и его поверхностью – внутренний теплообмен.

При *внешнем теплообмене* возможны два варианта:

- а) теплообмен непосредственно между теплоносителем и поверхностью материала (сушка, обжиг);
- б) теплообмен между теплоносителем и материалом через пленку сконденсированной влаги (пропаривание).

Теплообмен непосредственно между теплоносителем и поверхностью материала происходит посредством конвекции, излучения и теплопроводности.

В сушильных установках ($t \leq 200$ °С) излучение незначительно и процесс теплообмена обычно описывают уравнением Ньютона:

$$q = \alpha(t_T^{\circ} - t_{ТМ}^{\circ}) \quad (1.22)$$

где: α – коэффициент теплоотдачи от теплоносителя к твердому телу;

Явления теплопереноса в технологии производства строительных материалов

t_T° – средняя температура теплоносителя;

$t_{ПМ}^\circ$ – средняя температура поверхности материала.

В печных установках и при сушке при $t^\circ > 200$ °С доля лучистого теплообмена возрастает. Теплообмен рассчитывают по той же формуле, но

$$\alpha = \alpha_l + \alpha_k \quad (1.23)$$

где: α_l – коэффициент лучистого теплообмена;

α_k – коэффициент конвективного теплообмена.

При отсутствии эндотермических реакций поток теплоты расходуется на нагрев материала и влаги в нем и на испарение влаги с поверхности материала.

Балансовое уравнение при внешнем теплообмене

$$\alpha(t_T^\circ - t_{ПМ}^\circ) = \kappa \rho_0 R_v \frac{dU}{dt} + c \rho_0 R_v \frac{dt^\circ}{dt} \quad (1.24)$$

где: g – теплота испарения;

ρ_0 – плотность сухого материала;

R_v – отношение объема сухого материала и его поверхности;

c – удельная теплоемкость материала;

$\frac{dU}{dt}$ – скорость испарения;

$\frac{dt^\circ}{dt}$ – скорость нагрева.

При отсутствии влаги в материале балансовое уравнение (1.24) упрощается и принимает вид:

$$\alpha(t_T^\circ - t_{ПМ}^\circ) = c \rho_0 R_v \frac{dt^\circ}{dt} \quad (1.25)$$

В случае теплообмена между теплоносителем и материалом через пленку сконденсированной влаги процесс несколько усложняется. При этом может происходить пленочная конденсация (при полном смачивании), рассмотренная в п. 1.4 или капельная кон-

денсация (при частичном смачивании).

Внутренний теплообмен. Поверхность нагреваемого тела получает теплоту в количестве, определяемом формулами Фурье или Ньютона. Это тепло и распределяется внутри материала. Процесс распределения теплоты в теле в общем случае складывается из потока теплоты, распределяемого за счет теплопроводности материала (уравнение Фурье) и за счет потока движущейся внутри материала массы влаги

$$q = -\lambda \nabla t + i' d_m \quad (1.26)$$

где: q – суммарный поток теплоты;
 λ – коэффициент теплопроводности материала;
 ∇t – градиент температур между поверхностью и центром материала;
 i' – теплосодержание (энтальпия) влаги, перемещающейся в материале;
 d_m – плотность суммарного потока влаги, перемещающейся в материале.

1.6 Основные виды теплоносителей и их свойства

Теплоноситель – это движущаяся жидкая или газообразная среда, применяемая для передачи тепла от более нагретого к менее нагретому телу.

В качестве прямых источников тепла используют топочные газы (газообразные продукты сгорания топлива) и электрическую энергию. Вещества, получающие тепло от источников и отдающие его нагреваемой среде, называются промежуточными теплоносителями (водяной пар, горячая вода, органические жидкости), а при низких температурах – растворы солей (CaCl_2 , NaCl и др.).

Теплоносители могут в процессе передачи теплоты изменять свое агрегатное состояние (водяной пар) или сохранять его неизменным (неконденсирующиеся газы). В первом случае температура теплоносителя остается неизменной, т.к. передается теплота фазового перехода, во втором случае температура теплоносителя изменяется.

Требования к теплоносителю: обеспечить высокую интенсивность теплообмена при небольших массовых и объемных расходах; иметь малую вязкость; иметь высокую плотность и теплоемкость; быть негорючим, нетоксичным и недорогим.

Водяной пар выделяет большое количество тепла при кон-

Явления тепломассопереноса в технологии производства строительных материалов

денсации ($2,26 \cdot 10$ Дж/кг) и вследствие высоких коэффициентов теплоотдачи при конденсации требует сравнительно небольших поверхностей нагрева теплообменников. Его можно транспортировать на большие расстояния. При использовании пара можно точно поддерживать температуру нагрева, т.к. конденсация пара происходит при постоянной температуре. Однако он обладает рядом недостатков и, в частности, загрязняет внутреннюю полость трубопроводов накипью. При смешивании с воздухом образуется паровоздушная смесь, которая легче воздуха и поднимается вверх, что вызывает неравномерность нагрева.

Горячий воздух. Нагревание воздуха осуществляется в паровых и огневых (реже электрических) воздухонагревателях. Паровые нагреватели позволяют нагреть воздух до 150 °С, а огневые – до 500 °С.

По принципу действия различают рекуперативные и регенеративные воздухонагреватели. У первых тепло от горячего теплоносителя передается нагреваемому воздуху через разделительную стенку. Во-вторых – нагревательные элементы сначала нагреваются в среде протекающего теплоносителя, а затем отдают тепло воздуху, который после теплоносителя омывает те же элементы воздухонагревателя. Огневые воздухонагреватели обогреваются топочными газами от самостоятельной топки. Они транспортируются по дымовым трубам, которые омываются воздухом.

Топочные газы. Их получают сжиганием любых видов топлива и последующим разбавлением продуктов горения наружным воздухом до необходимой температуры. Наиболее чистые газы получают при использовании газообразного топлива. Схема получения топочных газов приведена на рис. 1.5.



Рис. 1.5 Общая схема получения топочных газов

Из-за пониженной удельной теплоемкости топочных газов,

Явления теплопереноса в технологии производства строительных материалов

их требуемые объемы велики и транспортирование требует больших затрат. Поэтому обычно используют топочные газы на месте их получения.

Горячая вода, высококипящие органические теплоносители (ВОТ) и масляные теплоносители. Горячую воду греют в специальных водогрейных котлах или теплообменных аппаратах до температуры не выше 100 °С. Если нужно греть воду до более высокой температуры, то в системе подачи горячей воды будет избыточное давление. Недостаток горячей воды – она загрязняет внутреннюю поверхность теплообменников.

Минеральные масла являются довольно распространенным промежуточным теплоносителем, применяемым для равномерного нагревания различных материалов. Температура их разогрева доходит до 250 – 300 °С. Закрытые масляные нагреватели можно поместить в среду топочных газов. В минеральные масла можно вставлять электрические нагреватели. Но они обладают низким коэффициентом теплоотдачи.

Высокипящие органические теплоносители (ВОТ) часто применяют при производстве пластмасс. Это, как правило, кремнийорганические соединения с температурой кипения до 440 °С.

Электрические методы нагрева. Они широко распространены вследствие простоты организации процесса и возможности регулировать температуру в широком диапазоне.

Чаще используют *нагревание сопротивлением*, которое заключается в непосредственном пропускании электрического тока через нагреваемое тело (контактный нагрев) или пропусканием электрического тока через специальные нагревательные элементы (ТЭНы). В нагревательных элементах используют нихромовую проволоку или ленту, электропроводящий графитовый порошок.

Индукционное нагревание происходит за счет разогрева тела вихревыми токами Фуко, которые индуцируются в металле переменным полем. Позволяют точно регулировать температуру, но сами аппараты громоздки.

Высокочастотное нагревание происходит за счет разогрева диэлектриков токами частотой 10 – 100 МГц. Этот метод требует сложной аппаратуры, дорогой, но позволяет осуществить быстрый и равномерный разогрев.

Инфракрасное излучение осуществляется лампами накаливания. Основные факторы нагрева тела в поле инфракрасного излучения – интенсивность облучения и поглощающая способность обрабатываемых тел. Инфракрасные излучатели делят на две группы: газовые и электрические.

1.7 Аппараты для перемещения теплоносителя (вентиляторы, эжекторы, дымовые трубы)

Воздух, дымовые газы перемещаются в установках по системам воздухопроводов и каналов. Газовый поток должен обладать определенной кинетической энергией для преодоления аэродинамических сопротивлений газовоздушного тракта. Эта энергия ему сообщается источниками побуждения движения: дутьевыми или вытяжными устройствами. Тяга бывает *искусственная* и *естественная*.

Искусственная тяга создается вентиляторами, дымососами и эжекторами. Для перемещения теплоносителей в тепловых установках применяют вентиляторы. По принципу действия и конструктивным особенностям их подразделяют на *центробежные* и *осевые*. При работе они создают в сети статическое и динамическое давление, сумма которых равна полному напору.

Центробежный вентилятор (рис. 1.6, а) состоит из рабочего колеса с лопатками (ротора) 1, улиткообразного кожуха 2 и станины с валом, шкивом и подшипниками. При вращении рабочего колеса газы засасываются через всасывающий патрубок 3 по оси, под действием центробежной силы перемещаются в спиральном кожухе и удаляются через нагнетательный патрубок 4. Следовательно, газы поступают в осевом направлении, а выходят из него в направлении, перпендикулярном оси ротора. Они разделяются на серии низкого – до 1000, среднего – до 3000 и высокого – до 10000 Па давления и имеют различную производительность по теплоносителю. Вентиляторы низкого и среднего давления рассчитаны на производительность от 3000 до 10000 м³/ч, высокого – от 5000 до 20000 м³/ч. Центробежные вентиляторы применяют в системах тепловых установок до 180 °С. При более высокой температуре газов устанавливают дымососы. Детали дымососов выполняются из жароупорной стали.

Осевой вентилятор (рис. 1.6, б) состоит из рабочего колеса с лопастями 1, закрепленного на втулке 2, насаженного на вал электродвигателя 3 и кожуха-обечайки 4, назначение которого – создать направленный поток воздуха. Осевые вентиляторы предназначены для перемещения больших объемов (1200–4000 м³/ч) воздуха и неагрессивных газов с температурой до 100 °С и небольшим давлением (250 – 350 Па). Осевые вентиляторы применяют в основном для создания циркулирующих потоков теплоносителя в печах и сушилках.

Явления теплопереноса в технологии производства строительных материалов

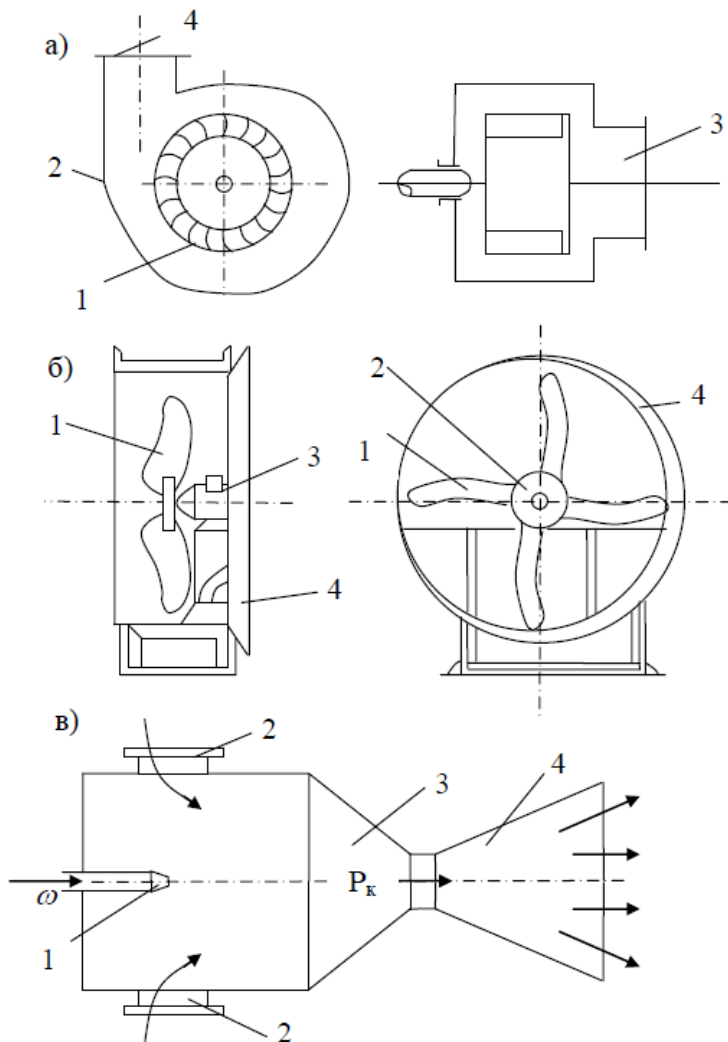


Рис. 1.6 Побудители движения газового потока:

- А. Вентилятор центробежный: 1 – рабочее колесо; 2 – кожух;
 3, 4 – всасывавший и нагревательный патрубки, соответственно
 Б. Вентилятор осевой: 1 – рабочее колесо, 2 – втулка;
 3 – вал электродвигателя; 4 – кожух – обечайка;
 В. Эжектор: 1 – сопло; 2 – патрубки; 3 – камера смешения; 4 –
 диффузор

За счет статического давления преодолевается сопротивление

Явления теплопереноса в технологии производства строительных материалов

ние трубопроводов и установок. Динамическое давление представляет собой скоростной напор, определяющий скорость движения теплоносителя в каналах и установках. Вентиляторы выбирают по давлению (напору) и производительности, между которыми установлена графическая зависимость, характеризующая их работу при различной скорости рабочего колеса. Вентиляторы работают от электродвигателя. Потребляемая мощность двигателя вентилятора с учетом запаса:

$$N_{\epsilon} = \frac{U_{\epsilon} \cdot P_n \cdot \kappa_3}{3,6 \cdot 10^6 \cdot \eta_{\epsilon} \cdot \eta_{np}} \quad (1.27)$$

где: U_{ϵ} – часовая производительность вентилятора;
 P_n – полное давление, развиваемое вентилятором;
 κ_3 – коэффициент запаса мощности, принимается равным 1,3;
 η_{ϵ} – КПД вентилятора;
 η_{np} – КПД привода.

Эжекторами или *струйными* аппаратами называют такие аппарата, в которых за счет смешения двух потоков с разными энергиями и давлениями образуется общий поток с промежуточными значениями энергии и давлений. Схема эжектора показана на рис. 1.6, в. Из сопла 1 с определенной скоростью и определенным давлением P_1 вытекает струя теплоносителя или воздуха, которая через патрубки 2 засасывает (эжектирует) определенное количество другого теплоносителя, эжектируемого со скоростью ω в патрубках. В камере 3 вследствие ее сужения у выходного конца смешиваются два теплоносителя, и смесь выбрасывается через диффузор 4.

В тепловых установках обычно средние плотности эжектирующих и эжектируемых теплоносителей неодинаковы, но при небольших скоростях истечения теплоносителя из сопла 1 (порядка 10 – 20 м/с) можно считать, что объем смеси, вытекающей из диффузора 4, будет определяться суммой объемов эжектируемого и эжектирующего теплоносителей.

Для того, чтобы эжектируемый теплоноситель проник в патрубки 2, ему необходимо преодолеть определенное сопротивление. Это сопротивление определяется разностью давлений внутри камеры смешения P_k и в окружающей эжектор среде P_{oc} . Тогда эту разность давлений можно представить так:

Явления теплопереноса в технологии производства строительных материалов

$$\Delta P = P_k - P_{oc} \quad (1.28)$$

Разность давлений ΔP преодолевается струей эжектирующего теплоносителя и уменьшает силу давления, которую могли бы развивать газы внутри диффузора. В результате в диффузоре создается результирующая кинетическая энергия движения смеси теплоносителей, равная $\frac{\omega^2 p}{2}$.

Эжекторы применяют в сушилках, печах и камерах для тепловой обработки бетона, для создания замкнутой циркуляции теплоносителя вокруг и внутри материала. Их используют в горелках для подсосывания и смешения газа и воздуха, для отвода отходящих газов и подачи теплоносителя. Если эжектор подает теплоноситель в тепловую установку и служит таким образом нагнетательным аппаратом, когда за счет эжекции преодолевается сопротивление установки, то его называют *инжектором*.

Естественную тягу создают дымовые трубы. Величина тяги (напора) h зависит от высоты трубы H , температуры теплоносителя и окружающего воздуха и может быть определена по формуле

$$h = gH(\rho_e - \rho_{cm}) \quad (1.29)$$

где: ρ_e, ρ_{cm} – плотности воздуха и теплоносителя соответственно

1.8 Показатели работы тепловых установок

Основными показателями работы тепловых установок являются: удельный расход теплоты или условного топлива, коэффициент полезного действия установки, удельный съем продукции с единицы рабочей площади или единицы объема аппарата (рис. 1.7).

Удельный расход теплоты на единицу готовой продукции составляет

$$q = \frac{Q}{G} \quad (1.30)$$

где: Q – часовой расход теплоты;
 G – часовая производительность установки в единицах продукции.
 Удельный расход условного топлива

Явления тепломассопереноса в технологии производства строительных материалов

$$B_y = \frac{Q}{29308 \cdot G} = \frac{q}{29308} \quad (1.31)$$

где: B_y – часовой расход условного топлива.
КПД установки

$$\eta = \frac{Q_{\text{полез}}}{\sum Q} \quad (1.32)$$

где: $Q_{\text{полез}}$ – полезно затраченная теплота;
 Q – общее количество теплоты, затраченное на тепловую обработку в аппарате.
Удельный съем с 1 м^2 теплового аппарата

$$q_f = \frac{G}{f} \quad (1.33)$$

где: f – площадь рабочего сечения аппарата.

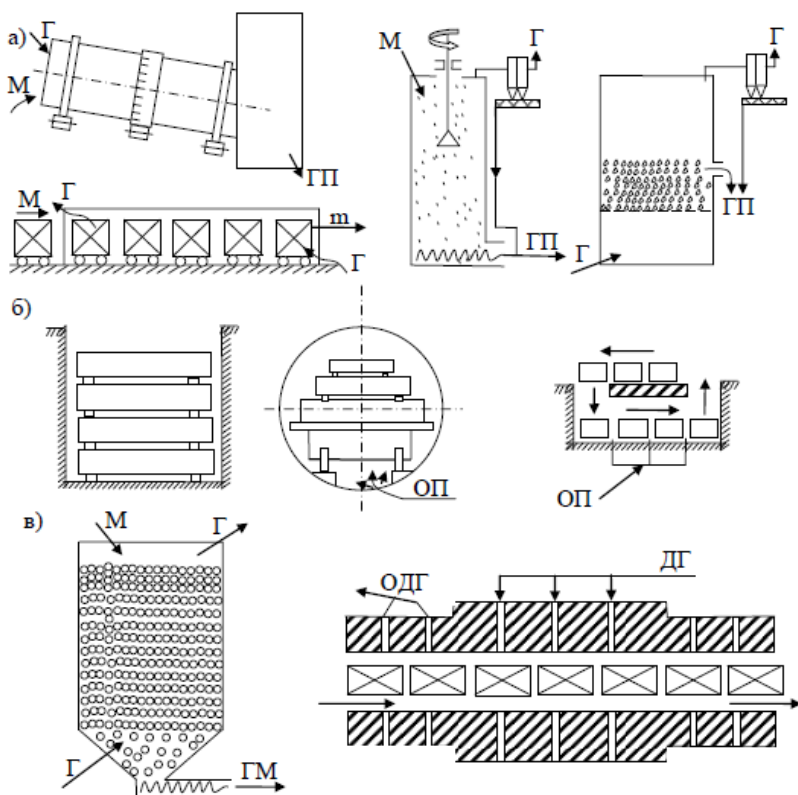


Рис. 1.7 Принципиальные схемы установок для тепловой обработки:

а – сушилки; б – для тепловлажностной обработки; в – печи

Удельный съем с 1 м³ рабочего объема аппарата

$$q_u = \frac{G}{U} \quad (1.34)$$

где: U – рабочий объем аппарата.

Учитывая эти показатели работы установок, можно сформулировать основные требования к конструкции теплового агрегата.

1. Малые удельные затраты теплоты и условного топлива на единицу продукции при высоком КПД.

Явления тепломассопереноса в технологии производства
строительных материалов

2. Обеспечение высоких удельных съёмов продукции при компактности аппарата.
3. Выпуск качественной продукции при заданной производительности.
4. Надёжность контроля теплового режима и обеспечение эффективного регулирования его.
5. Доступность, быстрота и удобство ремонта, сборность конструкции.
6. Долговечность и невысокая стоимость установки.
7. Безопасность работы.

2 ОСНОВЫ МАССООБМЕНА

2.1 Определение, назначение и классификация массообменных процессов

Процессы массообмена, протекающие в гетерогенных системах, содержащих две и более фаз, характеризуются переносом вещества из одной фазы в другую при их соприкосновении: из жидкой в газообразную и обратно, из твердое в жидкую или газообразную и обратно, из одной жидкой в другую.

В промышленности строительных материалов применяют следующие массообменные процессы:

а) *абсорбцию* – поглощение газов или паров жидкостью, т.е. переход вещества из газовой в жидкую фазу; б) *экстракцию* – извлечение вещества, растворенного в жидкости, другой жидкостью или твердым телом;

в) *ректификацию* – разделение жидкой среды на компоненты. Процесс включает переход вещества из жидкой фазы в газообразную (пар) и наоборот;

г) *адсорбцию* – избирательное поглощение газов, паров или растворенных в жидкости веществ поверхностью пористого адсорбента;

д) *сушку* – удаление влаги из твердого тела испарением;

е) *кристаллизацию* – выделение твердой фазы в виде кристаллов в результате пересыщения или переохлаждения раствора.

Перенос вещества из объема одной фазы в объем другой через поверхность раздела фаз называется *массопередачей*, а перенос вещества только в объеме фазы к поверхности раздела или от нее называется *массоотдачей*.

Переход вещества из одной фазы в другую осуществляется путем молекулярной и конвективной диффузии, поэтому процессы теплопереноса называют *диффузионными* процессами. Фазу, из которой вещество уходит, называют *отдающей* Φ_o , а фазу, в которую вещество переходит – *принимающей* Φ_n .

Процессы теплопереноса в непрерывных системах возникают самопроизвольно и протекают в направлении от высших концентраций к низшим, стремясь к динамическому фазовому равновесию, т.е. к равномерному распределению вещества во всем рассматриваемом объеме.

Движущей силой процесса теплопередачи является *разность концентраций* между данной и равновесной, при которой

процесс прекращается.

2.2 Механизм и модели процессов массоотдачи

Рассмотрим процесс массопередачи между двумя жидкостями G и L (рис. 2.1). Пусть концентрация распределяемого вещества в фазе G выше равновесной и вещество переходит из фазы G в фазу L.

В фазе G вещество переносится в направлении поверхности раздела фаз, а в фазе L – от этой поверхности. Процесс массопередачи теснейшим образом связан со структурой потока в каждой фазе. Различают две области в фазе: ядро и пограничный слой у границы раздела. В ядре имеет место интенсивное перемешивание и перенос вещества осуществляется в основном конвективной диффузией, поэтому в ядре концентрация распределяемого вещества практически постоянна.

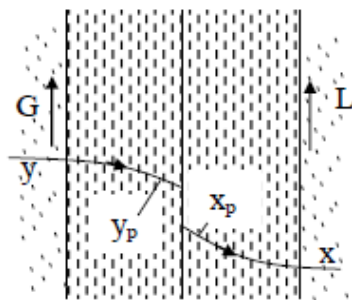


Рис. 2.1 Процесс

массообмена между двумя жидкостями

В пограничном слое происходит постепенное затухание турбулентности и концентрация вещества равномерно изменяется к границе раздела. Перенос вещества в пограничном слое осуществляется конвективной и молекулярной диффузией. Непосредственно у границы раздела перенос сильно замедляется, т.е. возрастает роль молекулярной диффузии. Таким образом, концентрация распределяемого вещества в фазе G уменьшается от величины U в ядре потока до величины U_p на границе раздела фаз. В фазе L концентрация распределяемого вещества уменьшается от X_p на границе раздела до X в ядре потока.

Если процесс установившийся, то концентрации U_p и X_p являются равновесными. Для интенсификации массопереноса желательно уменьшить толщину пограничного слоя, где сосредоточено основное сопротивление массопереносу. Добиться этого можно путем повышения степени турбулентности потока.

Согласно современным представлениям о процессе в каждой фазе у границы раздела имеются неподвижные или ламинарно движущиеся пленки, в которых перенос осуществляется

только молекулярной диффузией. В этих пленках сосредоточено основное сопротивление массопередаче. Поэтому градиенты концентраций возникают только внутри пограничных пленок, в ядре фазы концентрации постоянны и равны средним концентрациям.

Тогда

$$g = \frac{D}{\delta_{эф}} (Y_0 - Y_p) \quad (2.1)$$

где: Y_0 и Y_p – средние концентрации в ядре фазы и на границе раздела фаз;

$\delta_{эф}$ – эффективная толщина пограничной пленки;

D – коэффициент массопроводности.

Механизм массообмена в системе "жидкость – твердое тело"

Для описания этого процесса пригодна несколько другая модель. В ядре потока концентрация постоянна $y_0 = \text{const}$. Затем она медленно снижается в турбулентном пограничном слое δ_0 . С приближением к границе фазы в так называемом вязком подслое δ_1 , концентрация снижается быстрее.

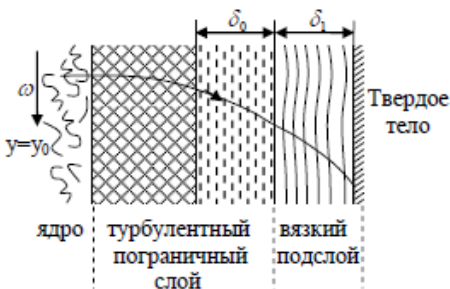


Рис. 2.2 Процесс массообмена между жидкостью и твердым телом

Под действием сил трения движение жидкости приближается к минимальному и возрастает доля вещества, передаваемого молекулярной диффузией. На большей толщине пленки δ_0 преобладает турбулентная диффузия и с ее помощью переносится основная масса материала. Лишь в самой глубине вязкого подслоя толщиной δ_1 молекулярная диффузия становится преобладающей

$$\delta_1 = \left(\frac{D}{\nu} \right)^{\frac{1}{m}} \delta_0, \text{ при } m = 2...3 \quad (2.2)$$

Явления теплопереноса в технологии производства строительных материалов

где: ν – кинематическая вязкость;
 m – коэффициент, выражающий закон затухания турбулентного обмена вблизи границы раздела фаз (определяется опытным путем).

2.3 Основные законы массообмена

Перенос массы вещества внутри одной фазы, из объема отдающей фазы к поверхности раздела и наоборот, называется массоотдачей и может происходить путем молекулярной диффузии, либо конвекцией или их совместного действия.

Молекулярная диффузия

Это явление представляет собой переход вещества из одной фазы в другую вследствие беспорядочного теплового движения молекул в газе, жидкости или твердом теле. т.е. в неподвижной однородной среде или ламинарном потоке. Процесс обусловлен наличием градиента концентраций в рассматриваемом объеме. Количество диффундируемого вещества определяется первым законом Фика по своей структуре аналогичного закону Фурье:

$$dm = -D \cdot dF \cdot d\tau \cdot \frac{\partial \bar{c}}{\partial n} \quad (2.3)$$

где: D – коэффициент диффузии;
 dm – масса вещества;
 $\frac{\partial \bar{c}}{\partial n}$ – градиент концентраций в направлении диффузного потока;
 dF – поверхность контакта фаз;
 $d\tau$ – время диффузии.

Согласно (2.3), количество вещества, которое передается диффузией, пропорционально градиенту концентраций, поверхности, перпендикулярной к направлению потока, и времени. Знак "минус" указывает, что в направлении диффузии концентрация вещества убывает. Из уравнения (2.3) вытекает и физический смысл *коэффициента диффузии* D , который показывает, какая масса вещества диффундирует в единицу времени через единицу поверхности при градиенте концентрации, равном единице:

$$D = dm \cdot \frac{\partial n}{\partial \bar{c}} F \cdot \tau \quad (2.4)$$

Следует отметить, что коэффициент диффузии является аналогом коэффициента температуропроводности. Значение коэффициента диффузии зависит от свойств среды, свойств распределяемого вещества, температуры и давления и не зависит от гидродинамических условий.

Конвективная диффузия

Конвективная диффузия – это переход вещества от одной среды в другую в движущемся потоке жидкости (газа); при этом частицы вещества движутся не только за счет броуновского движения, но и увлекаются собой. Поток вещества от поверхности раздела фаз или в обратном направлении определяется законом Н.А. Щукарева, аналогичным закону Ньютона для теплопередачи. По этому закону поток вещества на границе раздела фаз пропорционален поверхности их соприкосновения dF , разности концентраций на границе раздела фаз и в ядре потока, а также времени:

$$dm = \beta_m (\bar{c}_r - \bar{c}_j) dF \cdot d\tau \quad (2.5)$$

где: β_m – коэффициент массоотдачи, характеризующий перенос вещества одновременно конвекцией и диффузией;

\bar{c}_r, \bar{c}_j – концентрация распределяемого вещества на границе фазы и в ядре потока соответственно.

Коэффициент массоотдачи показывает, какая масса вещества передается от границы раздела фаз в принимающую фазу через 1 м^2 поверхности в единицу времени и при разности концентраций равной единице.

Физический смысл диффузных критериев подобия и критериальные уравнения массоотдачи

Приведенное дифференциальное уравнение используется для решения основной задачи конвективного массообмена – нахождения коэффициента массоотдачи β_m . Коэффициент массоотдачи β_m является не физической константой, а кинематической характеристикой, зависящей от свойств фазы (плотности, вязкости и др.) и гидрокинематических условий в ней (ламинарный или турбулентный режим течения), связанных в свою очередь с физическими свойствами фазы, а также геометрическими факторами, определяемыми конструкцией и размерами массообменного аппарата. Поэтому величина коэффициента массоотдачи β_m является функцией многих переменных, что значительно усложняет расчет и опытное определение коэффициентов. Как для гидродинамических и теплообменных процессов, не решая системы основных уравнений, можно методами теории подобия найти связь между переменными, характеризующими процесс переноса в потоке фазы, в виде обобщенных критериальных уравнений массоотдачи

$$\beta_m = \frac{D}{l} Nu_\delta \quad (2.6)$$

Учитывая роль и значение теории подобия в процессах массоотдачи, можно выявить физический смысл диффузных критериев Нуссельта и Прандтля, Фурье и Пекле.

Диффузный критерий Нуссельта Nu_δ выражает подобие переноса вещества у границы фазы

$$Nu_\delta = \beta \frac{l}{D} \quad (2.7)$$

Диффузионный критерий Фурье $F_{0\delta}$ характеризует изменение скорости потока вещества во времени и определяет необходимые условия подобия для неустановившегося режима массоотдачи

$$F_{0\delta} = D \frac{\tau}{l^2} \quad (2.8)$$

Явления теплопереноса в технологии производства строительных материалов

Диффузный критерий Пекле Pe_δ выражает меру отношения массы вещества, перемещаемой конвективным переносом и молекулярной диффузией

$$Pe_\delta = \frac{\omega l}{D} \quad (2.9)$$

Диффузный критерий Прандтля Pr_δ характеризует подобие с полей физических величин

$$Pr_\delta = \frac{\mu}{D\rho} \quad (2.10)$$

К числу критериев диффузного подобия следует отнести числа гидро- динамического подобия – критерии Фруда и Рейнольдса.

В общем виде критериальное уравнение конвективного переноса записывают так:

$$f(Re, Gr, Nu_\delta, F_{0\delta}, Pe_\delta, Pr_\delta, Fr, \frac{l_1}{l_0}) \quad (2.11)$$

Исходя из уравнения (2.11) общую функциональную зависимость определяемого критерия Nu_δ рассчитывают так:

$$Nu_\delta = f(Re, Pr_\delta) \text{ или } Nu_\delta = A Re^n Pr_\delta^m \quad (2.12)$$

Критериальное уравнение при вынужденном движении:

$$Nu_\delta = f(Re, Pr_\delta) \quad (2.13)$$

$$Nu_\delta = A Re^n Pr_\delta^m \quad (2.14)$$

при естественной конвекции:

$$Nu_\delta = f(Gr, Pr_\delta) \quad (2.15)$$

Явления теплопереноса в технологии производства строительных материалов

$$Nu_{\varnothing} = AGr^n Pr_o^m \quad (2.16)$$

Зная значение Nu_{\varnothing} , определяют коэффициент массоотдачи:

$$\beta_m = \frac{Nu_{\varnothing} \cdot D}{l} \quad (2.17)$$

В уравнениях (2.6) – (2.17) β_m – коэффициент массоотдачи; l – характерный размер; ω – скорость потока; D – коэффициент диффузии; μ – коэффициент вязкости среды; ρ – плотность среды; τ – время массообмена; A , n , m – величины, получаемые экспериментальным путем.

2.4 Основное уравнение массопередачи и движущая сила процесса

Как уже говорилось, процесс массопередачи включает процессы массоотдачи в пределах каждой из двух взаимодействующих фаз, и, кроме того, процесс переноса массы через поверхность раздела фаз. В связи с тем, что определить концентрацию фаз непосредственно у границы их раздела трудно, процесс перехода вещества из одной фазы в другую определяется основным уравнением массопередачи:

$$dm = k' \cdot dF \cdot d\tau \cdot \Delta\bar{c}_m \quad (2.18)$$

Из (2.18) следует, что количество вещества (массы) dm , которое передается из фазы в фазу, пропорционально поверхности соприкасающихся фаз dF , времени $d\tau$ и движущей силе массопередачи $\Delta\bar{c}_m$.

Интенсивность процесса или плотность потока массы составит:

$$g_m = \frac{dm}{dF \cdot d\tau} = k' \cdot \Delta\bar{c}_m \quad (2.19)$$

Коэффициент массопередачи k' показывает, какая масса вещества переходит из фазы в фазу за единицу времени через единицу поверхности контакта фаз при движущей силе массопередачи, равной единице

$$k' = \frac{dm}{dF \cdot d\tau \cdot \Delta \bar{c}_m} \quad (2.20)$$

Движущая сила массообмена характеризуется разностью между рабочей и равновесной концентрациями. При движении фаз вдоль поверхности контакта концентрация фаз изменяется, а значит изменяется и движущая сила массопередачи (рис. 2.3).

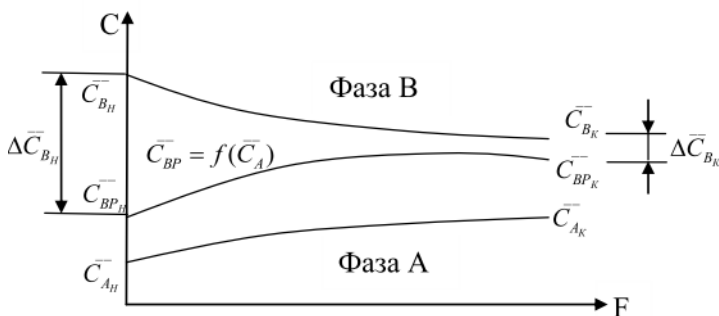


Рис. 2.3 Изменение рабочей и равновесной концентраций фаз при движении вдоль поверхности контакта

Закон этого изменения зависит от характера полей концентраций как в одной, так и в другой фазах, которые определяются гидродинамическими особенностями аппарата. Поэтому в уравнение массопередачи (2.18) вводят значение средней движущей силы процесса $\Delta \bar{c}_m$. При линейной зависимости между рабочей и равновесной концентрациями движущая сила определяется как средняя логарифмическая величина между начальной и конечной движущими силами. Так, при притоке по фазе В

$$\Delta \bar{c}_{em} = \frac{\Delta \bar{C}_{BH} - \Delta \bar{C}_{BK}}{2,3 \lg \frac{\Delta \bar{C}_{BH}}{\Delta \bar{C}_{BK}}} \quad (2.21)$$

2.5 Равновесие при массопередаче

Переход вещества из одной фазы в другую происходит при отсутствии его равновесия в фазах. В качестве примера рассмотрим еще раз две фазы G и L. Пусть распределяемое вещество находится вначале только в фазе G и имеет концентрацию Y . С момента соприкосновения фаз распределяемое вещество начинает переходить в фазу L. Как только распределяемое вещество появится в фазе L, начинается и обратный переход его в фазу G. Скорость обратного перехода будет увеличиваться по мере увеличения распределяемого вещества в фазе L. В какой-то момент скорости перехода распределяемого вещества из фазы G в фазу L и обратно станут одинаковыми. Такое состояние системы называется *равновесным*. В состоянии равновесия существует определенная зависимость между концентрациями распределяемого вещества в обеих фазах. Любой концентрации X этого вещества в фазе L соответствует равновесная концентрация его Y^* в фазе G

$$y^* = f(x) \quad (2.22)$$

Равновесие между двумя фазами можно представить графически (рис. 2.4, а).

Кривая ОС, изображающая зависимость равновесной концентрации Y^* от X , называется *линией равновесия*. Отношение концентраций фаз при равновесии называется *коэффициентом распределения*:

$$m = \frac{Y_i^*}{x_i} \quad (2.23)$$

Если линия равновесия близка к прямой (для разбавленных растворов), m является практически величиной постоянной, равной тангенсу угла наклона линии равновесия. Однако процесс массообмена на практике осуществляют не до равновесного состояния, а до некоторого другого отличного, описываемого *рабочей линией процесса* (рис. 2.4, б).

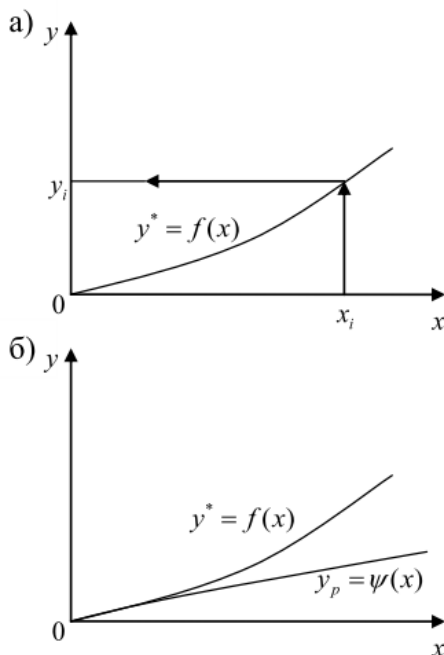


Рис. 2.4 Кривые равновесия при массопередаче

2.6 Основные закономерности массопереноса в капиллярно – пористых телах

Перемещение массы (влаги) в капиллярно – пористых телах происходит непрерывно за счет внутренней и внешней диффузии.

Перемещение влаги внутри материала называется *массо-проводностью*, которая определяет не только скорость теплообмена капиллярно-пористого тела с окружающей средой, но и технические свойства обрабатываемого материала.

Механизм и интенсивность перемещения влаги внутри тел зависит от форм связи влаги с материалом, структуры материала, его температуры, влажности, пористости и других свойств.

Аналогично закону переноса тепла основной закон переноса влаги внутри материала, согласно исследованиям А.В.Лыкова, представляется в следующем виде:

$$g_m = -\lambda_m \nabla \Theta \quad (2.24)$$

Явления теплопереноса в технологии производства строительных материалов

где: g_m – плотность потока влаги (массы);
 λ_m – коэффициент массопроводности;
 $\nabla\Theta$ – градиент потенциала переноса массы (влаги), который пропорционален градиентам влагосодержаний, температур и давлений.
 С учетом влияния указанных градиентов суммарный поток влаги можно представить как сумму частных потоков:

$$g_m = g_{m_u} + g_{m_t} + g_{m_p} \quad (2.25)$$

где: $g_{m_u}, g_{m_t}, g_{m_p}$ – плотность потока влаги, движущейся за счет градиента влагосодержания, температуры и давления соответственно.

В общем виде закон внутреннего влагопереноса (массопроводности) в капиллярно-пористых материалах выражается уравнением:

$$g_m = -a_m \rho_0 \nabla U \pm a_m \rho_0 \delta_t \nabla t \pm a_m \rho_0 \delta_p \nabla P \quad (2.26)$$

где: a_m – коэффициент потенциалопроводности, характеризующий скорость выравнивания влагосодержания в теле материала; по физическому смыслу $a_m = \frac{\lambda_m}{c_m \rho_0}$ – является ана-

логом коэффициента температуропроводности $a = \frac{\lambda}{c \rho_0}$

δ_0 – плотность абсолютно сухого материала;
 δ_t, δ_p – соответственно коэффициенты, учитывающие влияние на коэффициент потенциалопроводности a_m отношения изменения массопереноса к перепаду температур и давления;

$\nabla U, \nabla t, \nabla P$ – градиенты влагосодержания, температуры и давления соответственно.

Первый член уравнения $a_m \rho_0 \nabla U$ выражает перемещение массы в виде жидкости или пара под влиянием градиента влагосодержаний ∇U . Знак минус показывает, что масса убывает в направлении ее движения. Второй член уравнения $a_m \rho_0 \delta_t \nabla t$

Явления теплопереноса в технологии производства строительных материалов

выражает перемещение влаги под влиянием температурного градиента ∇t . Наличие градиента температуры по сечению материала приводит к перемещению влаги в материале по направлению теплового потока. Масса при наличии ∇t перемещается из мест с более высокой температурой к местам с более низкой температурой. Третий член уравнения выражает перенос массы в материале за счет градиента избыточного давления ∇P .

Внутренний массоперенос наблюдается при интенсивном нагреве влажного материала, когда внутри него возникает избыточное давление пара, увеличивающееся с повышением температуры. Градиент избыточного давления пара имеет решающее значение при переносе массы в пределах температур 60 – 100 °С и выше. При этом происходит, по-видимому, не только молярный перенос жидкости в виде пара, но и вытеснение жидкости по капиллярам к поверхности материала. Внешний массообмен определяет условия взаимодействия внешней окружающей среды (пара, паровоздушной смеси, воздуха, газа и т.п.) и материала. Процесс перемещения влаги с поверхности материала в окружающую среду и из окружающей среды к материалу возникает за счет разности парциальных давлений водяного пара на поверхности материала $P_{пм}$ и в окружающей среде $P_{ос}$.

Внешний перенос массы описывается законом Дальтона, устанавливающим связь между физическими параметрами, влияющими на скорость внешнего массообмена

$$g_m = -\beta_m (P_{пм} - P_{ос}) \quad (2.27)$$

где: β_m – коэффициент влагоотдачи;

$P_{пм}$ – парциальное давление водяных паров над поверхностью материала;

$P_{ос}$ – парциальное давление водяных паров в окружающей среде.

Значение коэффициента β_m может быть определено по эмпирической формуле ВТИ

$$\rho_m = 0,0229 - 0,0714\omega \quad (2.28)$$

где: ω – скорость движения теплоносителя.

Если значение $P_{пм}$ больше $P_{ос}$, будет идти процесс испарения влаги, а при $P_{ос} > P_{пм}$ – процесс конденсации.

3 ТЕПЛОВАЯ ОБРАБОТКА ИЗДЕЛИЙ

3.1 Определение и основные понятия

Тепловая обработка – одна из важнейших операций технологического процесса в производстве всех видов строительных материалов – применяется для предварительной подготовки исходного сырья (сушка, подогрев глины, заполнителей и др.), для промежуточной или завершающей стадии технологии.

При тепловой обработке придают сырью и материалу новые свойства, необходимые в строительстве. Гидродинамические, тепловые и массообменные процессы могут протекать одновременно или в различных сочетаниях. В установках может происходить также транспортировка материалов, измельчение сырья, смешивание составляющих компонентов, пластификация, прессование и другие процессы. При тепловой обработке влажных материалов и бетонов процессы теплообмена сопровождаются процессами внешнего и внутреннего массообмена (конденсация пара на поверхности изделия, миграция влаги, испарение с открытой поверхности). Эти процессы влияют на величину коэффициента теплообмена, а также на характер протекания и развития конструктивных и деструктивных процессов, возникающих в бетоне при твердении или при сушке и обжиге материала. В процессе тепловой обработки в материалах и изделиях происходят изменения их физико-химических и структурно – механических свойств, обуславливающих их технологические свойства (прочность, пористость, морозостойкость и пр.).

Перенос тепла и влаги в капиллярно-пористых и дисперсных материалах является определяющими в возникновении напряжений, деформаций, трещин, т.е. напряженного состояния материала.

Следовательно, тепловой обработке принадлежит ведущее значение в формировании структуры и получении материала с заданными свойствами при минимальных затратах топлива и электроэнергии, что существенно уменьшает капиталовложения в строительство, поскольку тепловая обработка потребляет около 80 % от расходуемых на весь производственный цикл топливно-энергетических ресурсов.

Тепловая обработка строительных изделий и материалов может осуществляться при различных температурах, давлениях и состояниях среды в рабочем объеме аппарата. Различают следующие способы тепловой обработки: сушка, тепловлажностная

обработка и обжиг.

3.2 Сушка сырья, полуфабрикатов и изделий

Сушкой называется процесс удаления влаги из материала (полуфабрикатов, изделий) путем ее испарения с последующим удалением образующихся паров в окружающую среду. Испарение влаги из материала может происходить при условии, когда окружающая среда не насыщена влагой и способна ассимилировать водяные пары от поверхности материала. Следовательно, при сушке необходимо, чтобы концентрация (парциальное давление) водяных паров у поверхности влажного материала ($P_{пов}$) была больше давления водяных паров окружающей среды ($P_{ос}$), т.е.

$$P_{ПОВ} > P_{ОС} \quad (3.1)$$

Давление водяного пара в материале зависит от его влажности, температуры и характера связи влаги с материалом. С увеличением влажности и температуры материала $P_{пов}$ возрастает, а с усилением связи влаги с материалом $P_{пов}$ уменьшается.

Удаление образующихся паров идет сначала молекулярной, а затем конвективной диффузией в окружающую среду.

Испарение влаги с поверхности сопровождается направленным переносом ее из внутренних слоев материала к поверхности испарения.

Интенсивность испарения будет тем выше, чем больше разность парциальных давлений пара на поверхность материала и окружающей среды и больше приток влаги к поверхности материала.

Таким образом, при сушке, являющейся тепло – массообменным процессом, можно выделить три движущих силы процесса – разность температур между центром и поверхностью материала и окружающей средой, разность влагосодержания и удельного давления водяных паров.

Для количественной оценки процесса нужно знать общее количество влаги в материале (U) % и соотношение между свободной и связанной влагой. Оба этих свойства зависят от технологических параметров изготовления изделия, степени дисперсности частиц, их химической активности, минералогического и химического состава материала. Влагосодержание материала определяют по формуле

Явления тепломассопереноса в технологии производства строительных материалов

$$U = \frac{m_{вл} - m_{сух}}{m_{сух}} \text{ (кг/кг)} \quad (3.2)$$

где: $m_{вл}$ – масса влажного образца (материала), кг;
 $m_{сух}$ – масса высушенного образца (материала), кг.

По отношению к окружающей среде различают три состояния материала:

- влажностное, т.е. материал отдает влагу в окружающую среду;
- равновесное, при котором влагообмен между материалом и средой отсутствует;
- гигроскопическое, при котором материал насыщается влагой из окружающей среды.

При сушке характер изменения влагосодержания материала, температуры материала и теплоносителя и парциального давления водяных паров внутри материала во времени представляют в виде специальных графиков, которые носят название диаграмм процесса сушки. На рис. 3.1 приведены такие диаграммы при непрерывном процессе сушки горячим воздухом или дымовыми газами с постоянной температурой (t_r) и скоростью движения. В соответствии с характером изменения этих диаграмм процесс сушки можно разделить на три периода:

1 – период подогрева материала с нарастанием его температуры до температуры мокрого термометра (t_m) и увеличением скорости сушки до некоторой максимальной величины $\left(\frac{dU}{dt}\right)_{max}$

;

2 – период постоянной скорости сушки, которая по величине близка к скорости испарения воды с открытой поверхности. Температура материала в этот период постоянна и равна температуре мокрого термометра;

3 – период падающей скорости сушки, наступающий при достижении материалом критического влагосодержания $U_{кр}$, при этом влажность на поверхности материала соответствует гигроскопической W_r .

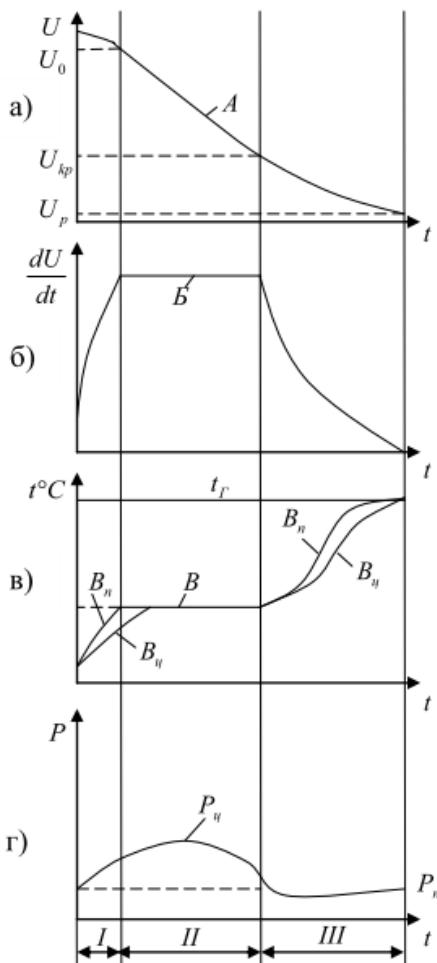


Рис. 3.1 Диаграммы процесса сушки:
 а – кривая сушки; б – кривая скорости сушки;
 в – кривая температуры материала;
 г – кривая изменения давления

Температура поверхности материала (линия B_n) растёт быстрее, чем в центре (линия B_c).

Снижение скорости сушки на третьем этапе связано с началом удаления прочно связанной влаги (адсорбционной и осмотической).

Явления тепломассопереноса в технологии производства строительных материалов

В процессе сушки величина критического влагосодержания имеет важное значение, т.к. связана с изменением размеров изделия в процессе сушки, т.е. с усадкой материала. Критическая влажность зависит от режима сушки и размеров изделия. При повышении температуры и скорости движения теплоносителя $U_{кр}$ повышается, а продолжительность периода постоянной скорости сушки уменьшается. Увеличение относительной влажности среды уменьшает $U_{кр}$, а увеличение размеров изделий ее увеличивает.

Балансовое уравнение тепло- и массопереноса при сушке

$$\alpha(t_T^\circ - t_{ПМ}^\circ) = r\rho_0 R_v \frac{dU}{d\tau} + \lambda \nabla t^\circ + i_1 a_m \rho_0 \nabla U + i'_2 a_m \delta \rho_0 \nabla t^\circ + i'_3 a_p \nabla P, \quad (3.3)$$

где: $\alpha(t_T^\circ - t_{ПМ}^\circ)$ – конвективный поток теплоты от теплоносителя к материалу;

$r\rho_0 R_v \frac{dU}{d\tau}$ – расход тепла на испарение влаги;

$\lambda \nabla t^\circ$ – расход тепла на нагрев материала теплопроводностью;

$i_1 a_m \rho_0 \nabla U$ – расход тепла на нагрев материала вследствие движущейся в нем массы влаги за счет градиента влагосодержания;

$i'_2 a_m \delta \rho_0 \nabla t^\circ$ – то же, за счет градиента температуры;

$i'_3 a_p \nabla P$ – то же, за счет градиента давления;

α – коэффициент теплоотдачи от теплоносителя к поверхности материала;

r – теплота испарения;

λ – коэффициент теплопроводности материала;

a_m – коэффициент массопередачи за счет градиента влагосодержания;

a_p – коэффициент массопередачи за счет градиента давления;

R_v – отношение объема материала к его поверхности, с которой происходит испарение;

δ – характеристический размер;

Явления теплопереноса в технологии производства строительных материалов

ρ_0 – плотность сухого материала;

t_T° – средняя температура теплоносителя;

$t_{ПМ}^\circ$ – средняя температура поверхности материала;

$\frac{dU}{d\tau}$ – скорость испарения;

∇t° – градиент температуры в материале;

∇U – градиент влагосодержания в материале;

∇P – градиент давления водяных паров в материале;

i_1 – теплосодержание влаги, перемещающейся за счет ∇U ;

i_2 – теплосодержание влаги, перемещающейся за счет ∇t° ;

i_3 – теплосодержание влаги, перемещающейся за счет ∇P .

Однако практическое пользование этим уравнением вызывает существенные затруднения.

Знание механизма распределения теплоты и влаги материала при сушке позволяет производить расчет процесса более простыми приемами.

Процесс сушки рассмотрим на примере симметричной неограниченной пластины толщиной $2R$ из только что отформованного коллоидного капиллярно-пористого тела. С его открытых поверхностей начинает испаряться влага, что приводит к разности влагосодержаний в центре и на его поверхностях. Так как теплота подводится с поверхности, то наблюдается перепад температур между поверхностью пластины и ее центром.

Помимо разности температур и влагосодержаний между поверхностью и центром пластины будет существовать и разность давлений. Давление в центре пластины P_c зависит от величины и характера пористости материала, его влагосодержания и режима сушки. Причина изменения этого давления связана с движением пузырьков воздуха, находящегося в заполненных водой капиллярах.

Приняв направление векторов градиентов от участков с меньшим потенциалом к большему, можно определить направление потоков массы за счет этих градиентов в каждый конкретный период сушки.

В первый период влагосодержание и давление больше в центре материала, поэтому их градиенты направлены от поверхности к центру, а поток массы – от центра к поверхности. Температура в этот период выше на поверхности и, следовательно,

Явления тепло-массопереноса в технологии производства строительных материалов

градиент направлен от центра к поверхности, а поток массы наоборот (рис. 3.2, а). Если принять поток влаги от центра к поверхности (т.е. как способствующие сушке) положительными, а препятствующие сушке – отрицательными, то выражение суммарного потока влаги в первый период

$$g_m = g_{m_u} + g_{m_p} - g_{m_t} \quad (3.4)$$

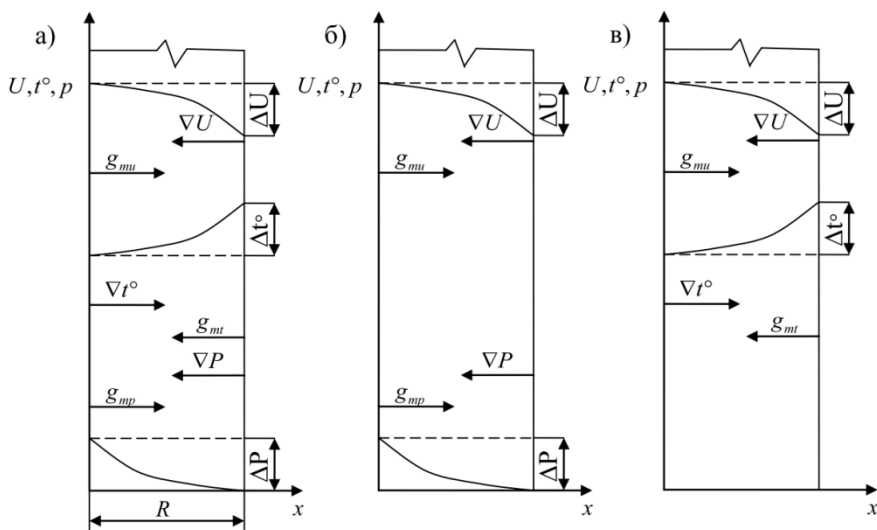


Рис. 3.2 К объяснению механизма тепло- массопереноса в процессе сушки:

а – период подъема температуры; б – период изотермической выдержки; в – период остывания

Во втором периоде градиенты давлений и влагосодержаний и, следовательно, потоки влаги за счет этих градиентов сохраняют свое направление.

Спустя некоторое время после начала второго периода температуры центра и поверхности выравниваются и градиент температур, а следовательно, и поток влаги за счет этого градиента прекращается. Тогда выражение для суммарного потока влаги в этот период принимает вид

Явления тепло- и массопереноса в технологии производства строительных материалов

$$g_m = g_{m_v} + g_{m_p} \quad (3.5)$$

Спустя некоторое время после начала третьего периода, давление в центре пластины очень незначительно и либо меняет знак, либо вовсе отсутствует, т.е. g_{m_p} близок к нулю. Градиенты влагосодержания и температуры имеют то же направление, что и в первом периоде, следовательно, для суммарного потока влаги можно записать

$$g_m = g_{m_v} - g_{m_t} \quad (3.6)$$

Анализ представленного механизма процесса тепло- и массопереноса в процессе сушки позволяет сформулировать несколько способов его ускорения:

скорость сушки увеличивается за счет снижения влагосодержания теплоносителя, увеличения скорости его движения или повышения температуры;

если в процессе перемешивания смеси и формования изделия материал будет нагрет до температуры выше, чем температура используемого сушильного агента, его поверхность через некоторое время охладится до температуры теплоносителя, а его внутренние слои будут иметь температуру выше наружной. Тогда поток влаги за счет градиента температур будет направлен к поверхности и уравнение примет вид:

$$g_m = g_{m_v} + g_{m_p} + g_{m_t} \quad (3.7)$$

Сушка материалов и изделий (полуфабрикатов) может быть *естественной* и *искусственной*. *Естественная* сушка протекает на открытом воздухе, без подвода тепла. Сушку с дополнительным подводом тепла называют *искусственной*. Искусственная сушка производится горячим воздухом или дымовыми газами в сушильках.

По способу теплообмена сушилки делят на: *конвективные*, когда высушиваемый материал непосредственно обтекается потоком теплоносителя; *контактные*, когда тепло материалу подводится теплопроводностью через стенку, разделяющую материал и теплоноситель; *радиационные*, когда нагрев материала происходит путем теплового излучения.

Наиболее широкое распространение в технологии строи-

Явления теплопереноса в технологии производства строительных материалов

тельных материалов получили конвективные и радиационные сушилки. Применяют также комбинированные способы теплообмена.

Режим сушки для каждого материала и изделия зависит от физико-химической характеристики и назначения материала.

Сырьевые материалы (глина, песок, шлак, известняк) сушат для возможности их последующей механической обработки – дробления, помола, смешивания, а отформованные – для придания им механической прочности, необходимой при обжиге (строительная керамика).

Сушка является сложным коллоидно – теплофизическим процессом, причем удаление влаги приводит к некоторому изменению свойств материала и это изменение зависит от вида связи влаги с материалом.

В основе требований, предъявляемых к сушильным установкам – обеспечение непрерывной, экономичной, быстрой и равномерной сушки при условии полной механизации и автоматизации.

3.3 Тепловлажностная обработка полуфабрикатов, отформованных изделий, деталей и конструкций

Бетонные, асбоцементные, известково-песчаные изделия, детали и конструкции, изготовленные на основе вяжущих, в свежотформованном влажном состоянии подвергают тепловлажностной обработке влажным насыщенным водяным паром. Влажная среда ($\phi = 95 - 100 \%$) позволяет сохранить влагу затвердения в материале. Повышение температуры ускоряет процесс твердения материала. При повышении температуры с 20 до 80 °С сроки твердения сокращаются в 8 – 10 раз. Например, в бетонах на цементах вяжущем ускоренное твердение новообразований происходит при температурах, близких к 100 °С, в силикатных бетонах химическое взаимодействие кремнезема с известью с заметной скоростью проявляется только при 170 – 200 °С.

Насыщенный пар, контактируя с поверхностью материала, отдает свое тепло и конденсируется на его поверхности. При этом изменяется как температура, так и влагосодержание материала и среды. Таким образом осуществляется процесс внешнего тепло-массообмена. Затем между поверхностью и внутренними слоями материала идет внутренний тепло- и массообмен – перемещение влаги и воздуха, а также изменение температурного поля внутри материала.

Явления теплообмена в технологии производства строительных материалов

Процесс тепловлажностной обработки делится на три периода: нагрев материала до греющей среды, выдержка при постоянной максимальной температуре и охлаждение.

Внешний и внутренний тепло- и массообмен в случае образования пленки сконденсировавшейся влаги на поверхности материала описывается формулой:

$$\frac{\lambda}{\delta} (t_{жс}^{\circ} - t_{м}^{\circ}) = a_n r \frac{m_n}{RT} (P_{II}' + P_{II}'') + \alpha_{см} (t_n^{\circ} - t_{жс}^{\circ}) \quad (3.8)$$

где: λ – коэффициент теплопроводности сконденсировавшейся пленки жидкости;

a_n – коэффициент массоотдачи пара;

r – теплота испарения;

$\alpha_{см}$ – коэффициент теплоотдачи паровоздушной смеси;

δ – толщина пленки жидкости;

m_n – масса пара;

R – универсальная газовая постоянная;

T – абсолютная температура паровоздушной смеси;

$t_{жс}^{\circ}$ – температура наружной поверхности пленки;

$t_{м}^{\circ}$ – температура поверхности материала;

t_n° – температура паровоздушной смеси;

P_{II}' – парциальное давление водяных паров на поверхности материала;

P_{II}'' – парциальное давление водяных паров в окружающей среде.

Если при тепловлажностной обработке греющей средой является пар или паровоздушная смесь с высокой относительной влажностью, а температура поверхности материала ниже температуры точки росы, то на поверхности материала образуется пленка влаги.

При внесении пластины в паровую среду на ее поверхности образуется пленка конденсата и влагосодержание поверхности U_n станет больше влагосодержания центра U_c . Через некоторое время за счет диффузии влаги от поверхностных слоев к центру влагосодержание будет характеризоваться кривой, показанной на рис. 3.3, – сплошной линией. Промежуточные этапы отмечены

штрихпунктирными линиями.

Таким образом вначале процесса пропарки влага движется и от поверхности к центру и от центра к поверхности; но через некоторое время и до конца периода подъема температуры весь поток влаги за счет ∇U будет двигаться от поверхности изделия к центру. Поток влаги за счет градиента температур g_{mt} в течение всего периода подогрева направлен от поверхности к центру, поскольку нагрев изделия идет снаружи.

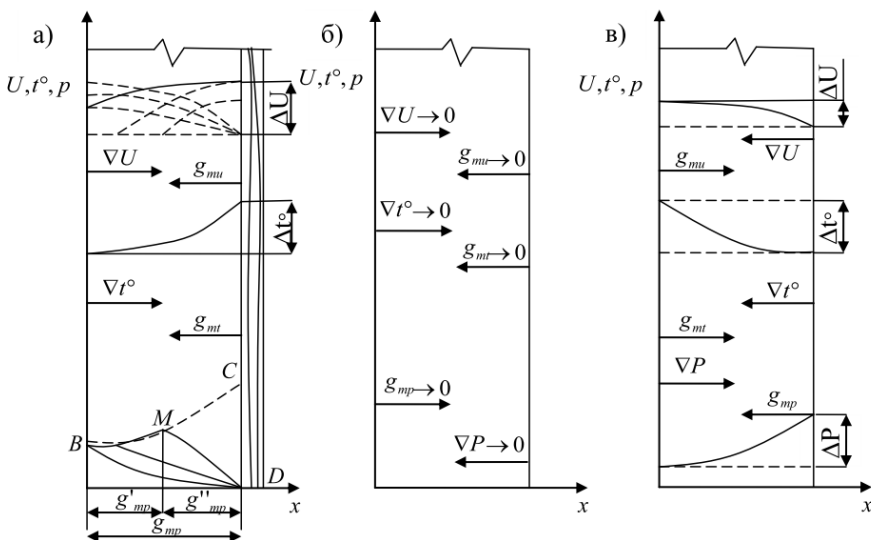


Рис. 3.3 К объяснению механизма тепло-массопереноса при тепловлажностной обработке при обогреве паром

Что касается влияния давления, то чаще всего возможен случай, когда оно меняется по сложной кривой с максимумом в точке М, когда частный поток влаги за счет градиента давлений направлен от центра к поверхности g'_{m_p} и существует до плоскости ОМ, другой – от поверхности к центру g''_{m_p} и существует тоже до плоскости ОМ. Поэтому суммарный поток влаги за счет градиента давлений может быть направлен как к центру, так и к поверхности, что зависит от пористости, характера пор и условий теплообмена. Общий поток влаги для большей части периода подогрева будет описываться уравнением

Явления тепломассопереноса в технологии производства строительных материалов

$$g_m = -g_{m_v} - g_{m_t} \pm g_{m_p} \quad (3.9)$$

В случае изотермической выдержки (рис. 3.3, б) частный поток влаги g_{m_v} практически исчезает, так как влага к этому моменту заполняет все доступные поры и капилляры и влагосодержание по сечению материала выравнивается.

Температура поверхности материала в это время постоянна, а температура центра изделия через некоторое время достигает температуры поверхности и градиент исчезает. Давление внутри материала также приближается к давлению окружающей среды. Таким образом, в этот период внутренний тепло- и массообмен практически отсутствует.

С началом периода охлаждения влага начинает испаряться с поверхности и ее температура становится равной температуре мокрого термометра. Градиенты влагосодержания и температуры по сравнению с первым периодом меняют знаки, и частные потоки влаги за счет этих градиентов направлены от центра к поверхности (рис. 3.3, в).

Последнее обстоятельство вызывает растяжение в центральных слоях и, следовательно, наличие градиента давления, направленного от центра к поверхности. Частный поток влаги g_{m_p} направлен от поверхности к центру и тормозит перемещение влаги к поверхности за счет градиента температуры и влагосодержания. Общий поток влаги описывается выражением

$$g_m = g_{m_v} + g_{m_t} - g_{m_p} \quad (3.10)$$

С учетом возникновения недопустимых влажностных деформаций материала при его обогреве паром следует специально подходить к выбору режима тепловлажностной обработки, особенно периода охлаждения материала, т.к. в этом периоде гидратационное твердение вяжущего резко замедляется и самозалечивание трещин в бетоне практически не происходит.

Для тепловлажностной обработки применяют пропарочные камеры при нормальном атмосферном давлении пара и температуре среды 60 – 100 °С, автоклавы при давлении 0,9 – 1,3 МПа и температуре 174 – 191 °С, нагрев в закрытых формах с контактной передачей тепла бетону через ограждающие поверхности формы (кассеты, термоформы, термосты и др.). Вид установки выбирается в зависимости от технологии.

3.4 Обжиг сырья, полуфабрикатов, изделий

При обжиге в материале протекают сложные физико-химические процессы, приводящие к изменению химического и минералогического состава конечного продукта.

Обжиг применяют в производстве керамических материалов (кирпича, керамзита, огнеупоров), минеральных вяжущих веществ, различного вида стекол.

Например, для подавляющего большинства керамических материалов обжиг является завершающей стадией технологического процесса.

Физические и химические процессы, протекающие при обжиге, определяют состав и характеристику образующихся фаз, их соотношение, размер, форму и взаимное расположение структурные элементы каркаса, изменение массы и объема керамического изделия.

При обжиге происходят следующие частные процессы:

- термическое разложение исходных сырьевых материалов;
- химическое взаимодействие между компонентами и их модификационное превращение;
- окислительно – восстановительные процессы при взаимодействии материала с газовой средой обжига;
- процессы растворения в расплаве твердых фаз и их кристаллизация;
- изменение объема при спекании и образование керамического черепка.

За основной признак спекания принимают повышение плотности и механической прочности материала при обжиге. Изменение при обжиге плотности является функцией изменения как массы (потери при прокаливании), так и объема материала (усадка материала при обжиге).

Изменение характеристики керамического материала при обжиге лучше всего представить графически (рис. 3.4).

На участке I за исключением небольшого термического расширения существенных изменений в материале не происходит. На участке II протекает спекание материала, которое усиливается с повышением температуры.

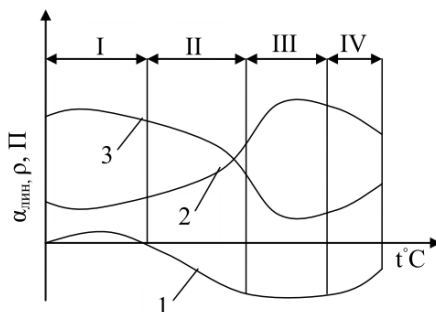


Рис. 3.4 Изменение характеристик материала при обжиге:
 1 – линейная усадка; 2 – плотность;
 3 – истинная пористость

Наблюдается существенная усадка с соответствующим увеличением плотности и снижением пористости материала. Часть открытых пор заплывает образующейся жидкой фазой, формируя закрытые поры. Участок III соответствует максимальным значениям усадки и плотности. Его часто называют интервалом спекания. Участок IV соответствует вспучиванию материала, т.е. уменьшению плотности главным образом за счет объема закрытых пор.

Температуры обжига для каждой конкретной шихты и интервалы соответствующих областей будут различны. Например, начальный период II участка используется для получения обычной стеновой керамики, средняя часть и конец этого участка – для плотной строительной керамики и огнеупоров, участок IV – для получения вспученных материалов.

Основным энергетическим источником спекания является свободная поверхностная энергия частиц на границе раздела фаз "кристалл – газ" и "жидкость – газ". При спекании уменьшаются межфазовые поверхности раздела фаз, именно поэтому при тонком измельчении исходных материалов (при значительной поверхностной энергии) спекание всегда интенсифицируется.

Если спекание происходит в системе "твердая фаза – жидкость – газ", то основная роль теплопереноса принадлежит жидкой фазе. Такие процессы называются жидкостным спеканием. Оно наиболее распространено в технологии керамики. В зависимости от скорости и продолжительности нагрева в изотермических условиях жидкая фаза приближается к равновесному состоянию с твердой фазой.

На рис. 3.5 показана схема контакта шаровых частиц с жидкой фазой. Наличие мениска на ее поверхности вызывает возникновение сжимающего капиллярного усилия, стягивающего частицу.

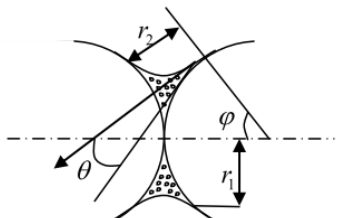


Рис. 3.5. Схема контакта сферических зерен с прослойкой жидкой фазы

Стягивающая сила может быть определена по формуле:

$$F = \pi \sigma R \sin \varphi \left[R \sin \varphi \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + 2 \sin(\varphi + \theta) \right] \quad (3.11)$$

где: σ – поверхностное натяжение на границе жидкость – газ;
 R – радиус сферической частицы;
 φ – угол, зависящий от уровня жидкой фазы;
 r_1 и r_2 – радиусы кривизны поверхности жидкости;
 θ – краевой угол смачивания.

Увеличение радиуса частиц и поверхностного натяжения повышает стягивающее усилие. Увеличение количества жидкой фазы при полном смачивании уменьшает стягивающее усилие.

В рассмотренном случае усадка заканчивается при достижении полного контакта между частицами. Наибольшая плотность материала может быть достигнута при содержании расплава около 35...40 %, т.е. равного пустотности смеси. Но и при этом пористость не снижается менее 5...8 % вследствие защемления воздуха и практической невозможности его полного вытеснения образующейся жидкой фазой.

Обжиг осуществляется в промышленных печах, в которых при тепловом воздействии осуществляется изменение химического состава материала или его кристаллическая структура. Режимы обжига зависят от формы и размеров конкретных изделий, состава и свойств масс, из которых они сформированы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арустамов Э.А. Оборудование предприятий (торговля). – Изд.: Дом «Дашков и К о », 2001.- 425 с.
2. Дашков Л.П., Памбухчиянц В.К. Организация, технология и проектирование торговых предприятий, - Учебник – 5 изд., 2003. -520 с.
3. Еремин Н.Ф. Процессы аппараты в технологии строительных материалов.- М.: Высшая школа, 1986.-280 с.
4. Процессы и аппараты в технологии строительных материалов. – Киев: Высшая школа, 1981. -296 с.
5. Стахеев И.В. Пособие по курсовому проектированию процессов и аппаратов пищевых производств. – Минск: Высшая школа, 1975.
6. Доманский И.В. и др. Машины и аппараты химических производств. Примеры и задачи: Учебное пособие для студентов вузов. –Л.: машиностроение, 1975.- 351 с.
7. Бауман В.А. и др. Механическое оборудование предприятий строительных материалов, изделий и конструкций: Учебник для вузов. – М.: Машиностроение, 1975.-351 с.
8. Маликов С.П. и др. Весы и дозаторы весовые. Справочник. –М.: Машиностроение, 1981.