

17 ТЕРМИЧЕСКАЯ СУШКА

17.1 Общие сведения о процессе сушки

Удаление влаги из твердых материалов называют сушкой. Сушка позволяет повысить потребительские качества материалов, уменьшить транспортные и складские затраты.

Влагу удаляют механическими и термическими способами. Механические способы (отжим, промокание и др.) применяются для предварительного удаления влаги. Более полно удаляется влага термическими способами за счет ее испарения и перехода в газовую фазу при подводе тепла к материалу.

Термическая сушка бывает естественной (на открытом воздухе) и искусственной (в сушилках). В промышленных условиях преобладает искусственная сушка как более интенсивная.

Термическая сушка – тепло- и массообменный процесс. Он включает: подвод тепла к материалу, перенос влаги из ядра материала на поверхность, испарение влаги и перенос паров влаги в ядро газовой фазы.

По способу подвода тепла к материалу термическую сушку делят на:

- конвективную (тепло подводится при контакте материала с нагретым газом);
- контактную (тепло к материалу поступает через отделяющую его от теплоносителя стенку);
- радиационную (тепло передается материалу инфракрасными лучами);
- диэлектрическую (нагрев материала происходит за счет преобразования энергии электромагнитных волн в тепловую);
- сублимационную (процесс возгонки замороженной влаги).

17.2 Формы связи влаги с материалом. Методы ее удаления

Влагу в твердом материале делят на свободную (несвязанную) и связанную. Влага связана с материалом механическими (свободная), физико-химическими и химическими силами (связанная).

Свободная влага связана с материалом механическими силами (поверхностного натяжения) и скорость ее удаления равна скорости испарения жидкости со свободной поверхности. Эта влага находится на поверхности материала и в его порах (капиллярах). В зависимости от размера пор ее делят на макро- и микрокапиллярную. Основную часть макрокапиллярной влаги можно удалить дешевыми механическими методами. Микрокапиллярную влагу следует удалять термической сушкой.

Физико-химическая влага делится на адсорбционную и осмотическую. Адсорбционная влага удерживается на поверхности материала и внутри его пор адсорбционными силами (силами Ван-дер-Вальса). Осмотическая влага

находится внутри клеток материала. Физико-химическая влага удаляется термической сушкой.

Химическая влага образует химические соединения с молекулами материала (кристаллогидраты). Она удаляется при проведении химических реакций и термическим разложением при прокаливании.

17.3 Конвективная сушка. Параметры влажного воздуха

Газ, взаимодействующий при термической сушке с высушиваемым материалом, называют сушильным агентом (СА). При конвективной сушке СА передает материалу тепло и отводит от материала пары влаги, т.е. является тепло- и влагоносителем. В качестве СА используют: воздух; топочные газы (для термостойких материалов); в особых случаях химически пассивный газ.

Основные требованиями, предъявляемые к СА: доступность и дешевизна; пассивность к высушиваемому материалу и конструкционным материалам; безопасность в обращении.

Чаще всего СА – смесь газа (воздуха) и пара влаги (воды). Основные параметры системы воздух – водяной пар (влажного воздуха): собственная температура влажного воздуха t , °С; температура точки росы; температура мокрого термометра; влагосодержание; относительная влажность; давление p , Па, удельная энтальпия (в дальнейшем – энтальпия); парциальное давление паров влаги $p_{\text{п}}$, Па.

Относительная влажность воздуха φ – отношение массы водяного пара в 1 м^3 влажного воздуха к массе этого пара в 1 м^3 влажного воздуха в состоянии насыщения. Определяется:

$$\varphi = \frac{p_{\text{п}}}{p_{\text{н}}}, \quad (17.1)$$

где $p_{\text{н}}$ – парциальное давление водяного пара во влажном воздухе в состоянии насыщения, Па.

Влагосодержание воздуха x , кг/кг – масса паров влаги на 1 кг абсолютно сухого воздуха.

Энтальпия влажного воздуха I , кДж/кг, приводится на 1 кг абсолютно сухого воздуха, но при этом учитывается энергия пара, содержащегося во влажном воздухе:

$$I = c_{\text{с.в}}t + i_{\text{в.п}}x, \quad (17.2)$$

где $c_{\text{с.в}}$ – удельная теплоемкость сухого воздуха, кДж/(кг·град);

$i_{\text{в.п}}$ – удельная энтальпия водяного пара, кДж/кг.

Температура мокрого термометра $t_m, ^\circ\text{C}$ – температура, при которой воздух при адиабатическом охлаждении достигает состояния насыщения ($\varphi = 1$).

Температура точки росы $t_p, ^\circ\text{C}$ – температура, при которой воздух достигает насыщения, охлаждаясь и не изменяя при этом свой состав ($x = \text{const}$).

Параметры влажного воздуха определяют по $I-x$ -диаграмме (диаграмме Рамзина, рис. 17.1). На ее вертикальную ось нанесены шкалы температур и энтальпий. Изолинии на диаграмме: температуры $t = \text{const}$; относительной влажности $\varphi = \text{const}$; энтальпии (адиабаты) $I = \text{const}$; влагосодержания $x = \text{const}$; парциального давления водяного пара $p_n = \text{const}$.

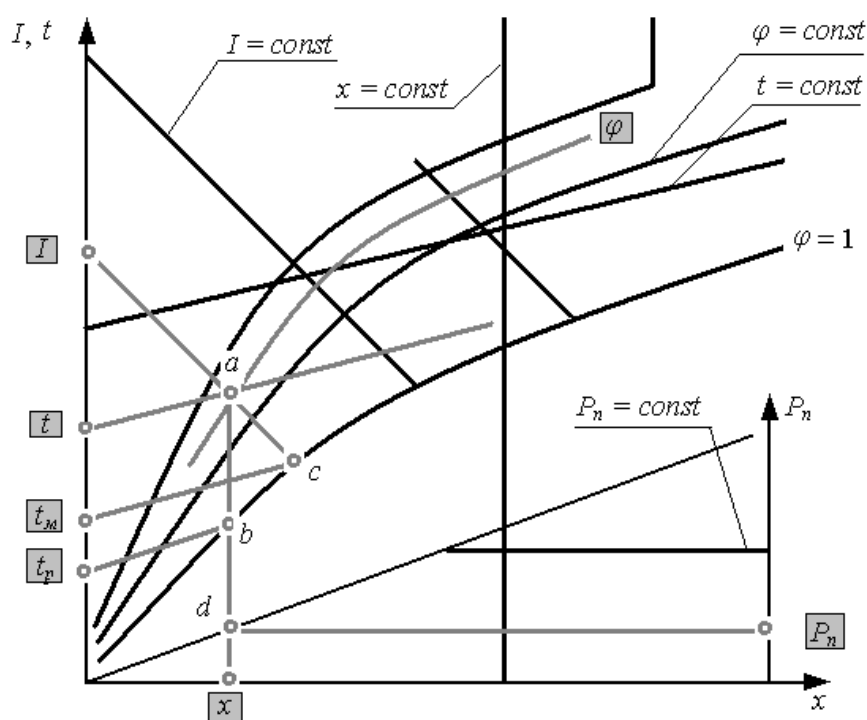


Рис. 17.1 – Определение параметров состояния влажного воздуха с помощью $I-x$ -диаграммы

На рис. 17.1 показано определение параметров влажного воздуха с помощью диаграммы при известных: температуре воздуха t и его относительной влажности φ (точка a – точка пересечения изолиний температуры t и относительной влажности φ). Спроецировав точку a на горизонтальную ось, получим влагосодержание воздуха x . Проведя через точку a линию постоянных энтальпий, определяем энтальпию воздуха I . Отмечаем точку b на пересечении изолинии x с линией насыщенного воздуха $\varphi = 1$. Через точку b проходит изотерма температуры точки росы t_p . Находим точку d на пересечении линии влагосодержания x с вспомогательной линией для определения парциального давления пара. Из точки d проводим горизонталь на шкалу парциального давления пара и определяем значение

p_n . Обозначаем точку c на пересечении адиабаты I с линией $\phi=1$. Через точку c проходит изотерма мокрого термометра t_m .

На крупномасштабных диаграммах дополнительно нанесены линии мокрого термометра. В области невысоких температур, примерно до 150°C , линии $t_m = \text{const}$ практически параллельны линиям постоянных энтальпий.

17.4 Материальный баланс сушилки

На рис. 17.2 представлена схема конвективной сушилки, работающей по простому сушильному варианту (СА нагревается во внешнем калорифере и однократно проходит через сушильную камеру).

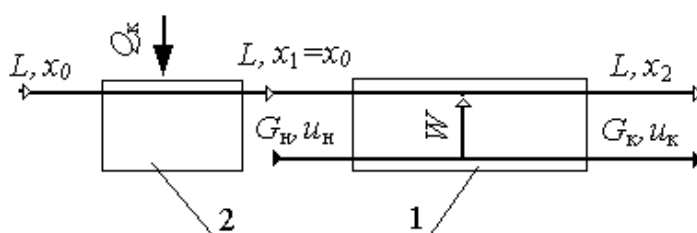


Рис. 17.2 – К составлению уравнений материального баланса сушилки:

I – сушильная камера; 2 – калорифер. Параметры СА:

0 – до калорифера (атмосферного); 1 – после калорифера и до сушильной камеры (нагретого); 2 – после сушильной камеры (отработанного)

Введем обозначения:

G_n и G_k – расходы исходного и высушенного материала, кг/с;

W – расход влаги, удаляемой из материала в сушилке, кг/с;

u_n и u_k – начальная и конечная влажность материала в расчете на его общую массу, кг влаги/кг влажного материала.

Расход удаляемой влаги:

$$W = G_n - G_k; \quad (17.3)$$

$$W = G_n \frac{u_n - u_k}{1 - u_k} = G_k \frac{u_n - u_k}{1 - u_n} = G(U_n - U_k); \quad (17.4)$$

где G – расход абсолютного сухого материала, кг/с;

U_n и U_k – начальная и конечная влажность материала в расчете на массу абсолютно сухого материала, кг влаги/кг абсолютно сухого материала.

Величина G связана с расходом влажного материала зависимостями:

$$G = G_n(1 - u_n) = G_k(1 - u_k). \quad (17.5)$$

Значения u и U связаны:

$$U = \frac{1}{1 - u}. \quad (17.6)$$

Массовый расход СА через сушилку L , кг/с:

$$L = \frac{W}{x_2 - x_1}. \quad (17.7)$$

где x_1 и x_2 – влагосодержание СА на входе и на выходе из сушильной камеры, кг/кг.

17.5 Тепловой баланс сушилки.

Понятие о теоретической и действительной сушилке

Расход тепла на сушку при простом сушильном варианте (во внешнем калорифере, рис. 17.3), Q_k Вт:

$$Q_k = L(I_1 - I_0), \quad (17.8)$$

где I_0 и I_1 – энтальпия СА на входе и выходе из калорифера, кДж/кг.

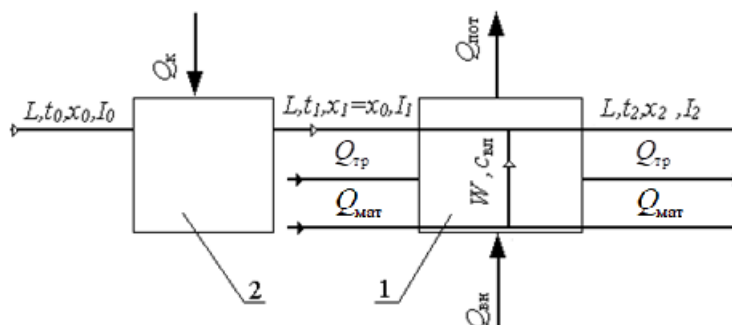


Рис. 17.3 – К составлению теплового баланса сушилки:
1 – сушильная камера; 2 – калорифер

При конвективной сушке влага из материала испаряется за счет отбора тепла от СА. Эта энергия частично возвращается в СА за счет перехода в него паров влаги. Часть энергии используется на подогрев материала $Q_{\text{мат}}$, на нагрев транспортных устройств сушилки $Q_{\text{тр}}$ и в виде потерь тепла в окружающую среду $Q_{\text{пот}}$. Испарившаяся влага передает СА свою энергию, аккумулированную ею в жидком состоянии $Q_{\text{вл}}$. Сушилка также может иметь свои внутренние источники тепла $Q_{\text{вн}}$.

Уравнение внутреннего теплового баланса сушилки:

$$L(I_1 - I_2) = Q_{\text{мат}} + Q_{\text{тр}} + Q_{\text{пот}} - Q_{\text{вл}} - Q_{\text{вн}}, \quad (17.9)$$

где I_2 – энтальпия СА на выходе из сушильной камеры, кДж/кг.

Правую и левую части выражения (17.9) делим на W . С учетом формулы (17.7) получаем:

$$\frac{I_1 - I_2}{x_2 - x_1} = q_{\text{мат}} + q_{\text{тр}} + q_{\text{пот}} - q_{\text{вл}} - q_{\text{вн}} = \Delta, \quad (17.10)$$

где $q_{\text{мат}}, q_{\text{тр}}, q_{\text{пот}}, q_{\text{вл}}, q_{\text{вн}}$ – удельные потери тепла с материалом, с транспортными устройствами и в окружающую среду и удельные приходы тепла с влагой в материале и от внутренних источников, кДж/кг влаги;

Δ – общие удельные потери тепла в сушильной камере, кДж/кг влаги.

Для определения расходов СА L и тепла на сушку $Q_{\text{к}}$, систему уравнений (17.7) и (17.10) решают методом последовательных приближений (неизвестные L , x_2 и I_2) при использовании понятия теоретической сушилки.

Теоретическая сушилка – это сушилка, которая не имеет потерь тепла в окружающую среду и внутренних источников тепловой энергии. У нее материал и транспортные устройства имеют на входе и на выходе из сушильной камеры температуру 0°C . В таком случае $\Delta = 0$, а все подводимое тепло СА затрачивается на испарение влаги, вместе с которой оно возвращается обратно СА. Поэтому энтальпия СА в теоретической сушилке остается постоянной $I_1 = I_2 = \text{const}$ (см. рис. 17.4).

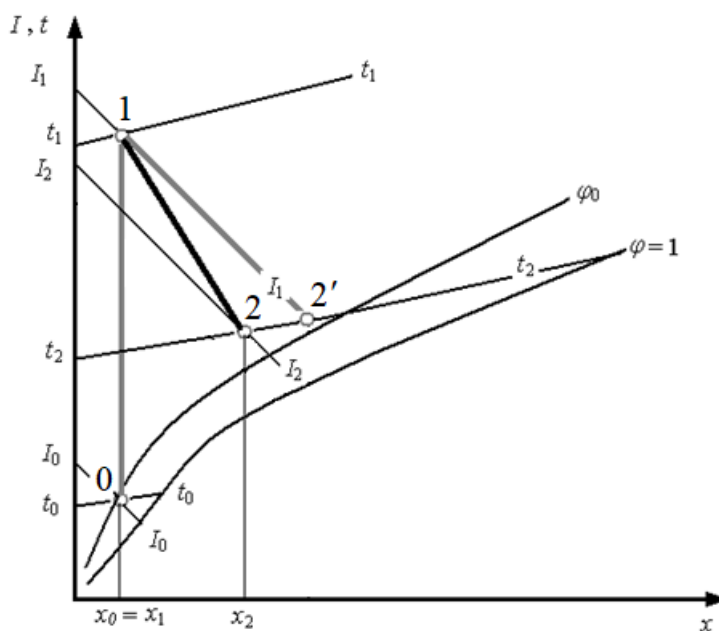


Рис. 17.4 – Отображение на $I-x$ -диаграмме процессов сушки в теоретической и действительной сушилках

На рис. 17.4: 0 1 2 2'

– отрезок прямой 0-1 – рабочая линия нагрева СА в калорифере (возрастают его температура от t_0 до t_1 и энтальпия от I_0 до I_1 , а влагосодержание остается постоянным $x_0 = x_1$);

– отрезок прямой 1-2', совпадающий с линией постоянной энтальпии $I_1 = const$ – рабочая линия изменения параметров СА в сушильной камере для теоретической сушилки;

– отрезок прямой 1-2 – рабочая линия изменения параметров СА в сушильной камере для действительной сушилки.

17.6 Варианты проведения конвективной сушки

Сушилки работают как по простому сушильному варианту, так и с частичным подогревом СА в сушильной камере, с рециркуляцией части СА, с применением в качестве СА топочных газов и т. д.

Сушка топочными газами целесообразна при удалении влаги из термостойких материалов нечувствительных к загрязнению продуктами сгорания.

При промежуточном подогреве СА при невысокой его температуре достигаются высокие значения конечных энтальпии и влагосодержания. Это позволяет проводить сушку нетермостойких материалов при небольшом расходе СА.

При сушке с частичной рециркуляцией СА процесс осуществляется при невысокой его температуре и значительном влагосодержании, т. е. обеспечиваются более мягкие условия сушки. Это необходимо при сушке некоторых нетермостойких материалов. Процесс характеризуется повышенным расходом энергии на перемещение СА.

17.7 Кинетика сушки

Кинетика сушки рассматривает закономерности протекания процесса во времени. По интенсивности протекания процесса выделяют три стадии:

1 стадия – прогрев поверхности влажного материала от начальной температуры t_H до температуры t_{MT} ;

2 стадия – первый период сушки с изменением влажности материала от u_H до $u'_{кр}$;

3 стадия – второй период падающей скорости сушки с изменением влажности материала от $u'_{кр}$ до u_K .

17.7.1 Кривая сушки

Указанные стадии сушки можно наблюдать на графиках: зависимость температуры поверхности материала от времени сушки $t = f(\tau)$ (рис. 17.5); зависимость влагосодержания материала от времени сушки $u = f(\tau)$ – кривая сушки (рис. 17.6).

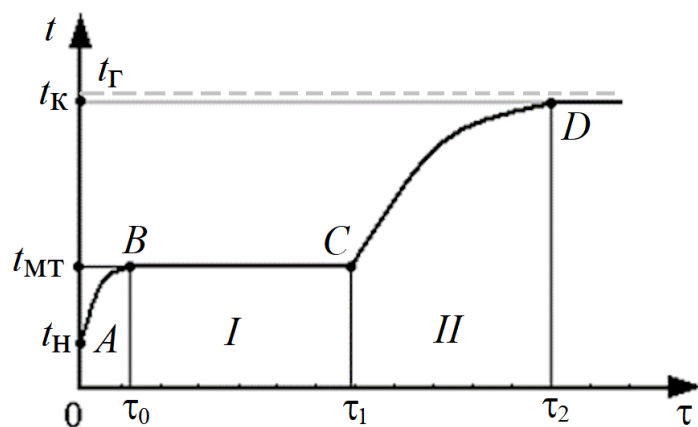


Рис. 17.5 – Зависимость температуры поверхности материала от времени сушки $t = f(\tau)$

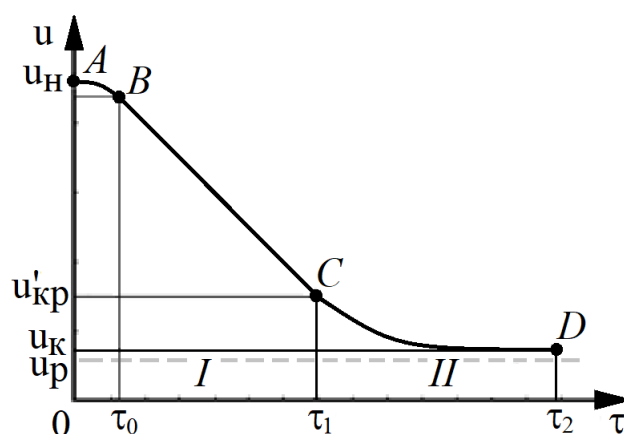


Рис. 17.6 – Зависимость влагосодержания материала от времени сушки $u = f(\tau)$

На первой стадии (AB) влагосодержание материала почти не изменяется, а теплота от CA передается на нагрев поверхности материала от t_H до t_{MT} . На второй стадии (BC) влагосодержание материала изменяется линейно от u_H до $u'_{кр}$ и скорость процесса остается практически постоянной при неизменной температуре t_{MT} . На третьей стадии изменение влагосодержания материала происходит по кривой линии (CD) от $u'_{кр}$ до $u_к$ близком к равновесному u_p . Температура поверхности материала при этом повышается и асимптотически приближается к температуре CA t_G .

Постоянство температуры поверхности материала в первый период сушки говорит о том, что здесь происходит удаление свободной влаги, а во втором периоде происходит удаление связанной влаги.

Влажность материала $u'_{кр}$, соответствующая переходу от свободной к связанной влаге в материале, называется *гигроскопической*. В точке C влажность на поверхности материала становится равной гигроскопической.

17.7.2 Кривые скорости сушки

О скорости сушки можно получить представление путем графического дифференцирования кривой сушки $u = f(\tau)$. В результате получают кривые скорости сушки: зависимость скорости сушки от времени $du/d\tau = f(\tau)$ (рис. 17.7); зависимость скорости сушки от влагосодержания материала $du/d\tau = f(u)$ (рис. 17.8).

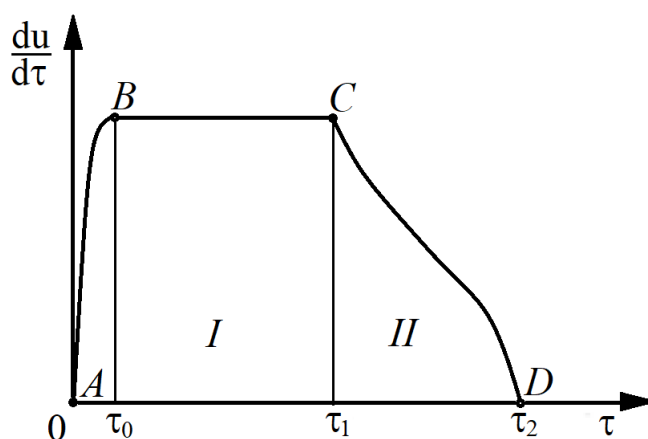


Рис. 17.7 – Зависимость $du/d\tau = f(\tau)$

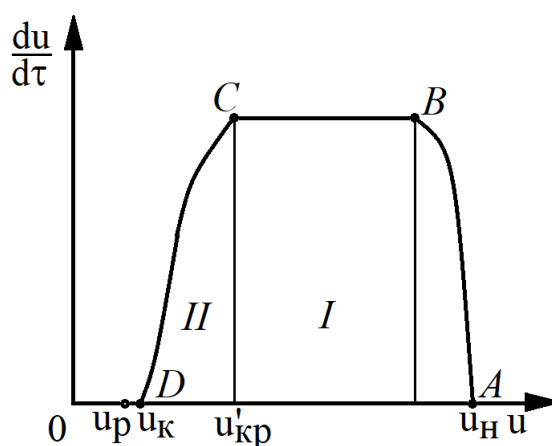


Рис. 17.8 – Зависимость $du/d\tau = f(u)$

Из графиков видны характерные стадии процесса и их продолжительность. На графике $du/d\tau = f(u)$, в зависимости от структуры высушиваемого материала, возможны различные варианты расположения участка удаления связанной влаги CD .

17.7.3 Движущая сила сушки

Движущую силу сушки выражают через параметры газовой фазы – парциальное давление ее паров или влагосодержание сушильного агента. В первом случае движущая сила сушки – разность парциальных давлений паров влаги в СА над поверхностью материала и в ядре потока СА. Во втором случае – разность влагосодержаний СА над поверхностью высушиваемого материала и в ядре потока СА. Величина движущей силы зависит от влажности материала, от формы связи влаги с материалом, а также от температуры, давления сушильного агента. Скорость сушки пропорциональна движущей силе процесса.

При удалении свободной влаги скорость сушки определяется скоростью переноса влаги в газовой фазе и зависит от гидродинамической обстановки. При удалении связанной влаги скорость сушки обусловлена диффузионным сопротивлением ходу процесса в твердой фазе.

Движущая сила сушки растет при увеличении температуры сушильного агента и снижении давления. Поэтому сушку под вакуумом применяют для термочувствительных материалов. Движущая сила сушки и ее скорость также растут при увеличении расхода сушильного агента.

17.8 Последовательность расчета конвективной сушилки

Задание на расчет сушилки содержит:

- природу и физико-механические свойства высушиваемого материала;
- расход исходного или высушенного материала;
- начальная и конечная влажность материала;
- место установки сушилки (климатические условия).

Последовательность расчета:

1) В зависимости от свойств материала, его расхода, начальной и конечной влажности выбирают тип сушилки, сушильный вариант, а также род СА и его температуру на входе в сушильную камеру.

2) Проводят расчеты материального баланса по высушиваемому материалу, определяют расход удаляемой влаги.

3) Решая совместно уравнения материального баланса по СА и уравнения теплового баланса, определяют расходы СА и тепла на проведение процесса. По полученным результатам подбирают топку или калориферы.

4) Проводят расчет размеров сушилки (объема сушильной камеры). Для этого рассчитывают (определяют) кинетические характеристики процесса.

5) Выполняют необходимые аэродинамические и конструктивные расчеты.

17.9 Конструкции сушилок

17.9.1 Классификация сушилок

Сушилки по способу подвода тепла классифицируют на: конвективные; контактные; радиационные; высокочастотные; сублимационные.

По виду теплоносителя и СА сушилки могут быть воздушными, газовыми, паровыми.

По давлению в сушильной камере сушилки делят на атмосферные и вакуумные. Вакуумные сушилки применяют для сушки ценных нетермостойких материалов.

По организации процесса во времени различают сушилки непрерывно и периодически действующие. Периодически действующие сушилки используют в малотоннажных производствах и при продолжительной сушке.

Сушилки непрерывного действия по взаимному направлению движения сушильного агента и материала делят на прямоточные, противоточные и др.

В каждом классе по способу подвода тепла сушилки делят по конструктивному признаку. Например, конвективные сушилки бывают камерными, ленточными, барабанными, кипящего слоя и др. Контактные сушилки – сушильный шкаф, гребковая, вальцовая и др.

17.9.2 Ленточные сушилки

Ленточные сушилки – конвективные сушилки непрерывного действия. Они применяются для сушки зернистых, мелкокусковых и пастообразных материалов, а также штучных изделий. СА в них является воздух. Конструкция ленточной сушилки показана на рис. 17.9.

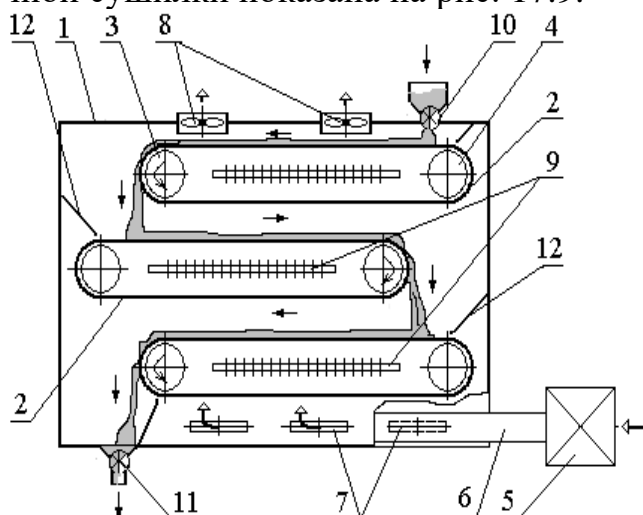


Рис. 17.9 – Ленточная сушилка:

- 1 – корпус; 2 – бесконечная лента; 3 и 4 – приводной и натяжной барабаны;
 5 – калорифер; 6 – коллектор подачи СА; 7 – окна; 8 – вентиляторы;
 9 – встроенные калориферы; 10 и 11 – питатели подачи и выгрузки материала; 12 – направляющие щитки

В сушилке материал пересыпается с вышележащей ленты на нижележащую. При сушке кусковых материалов ленты 2 могут быть перфорированными. В сушилку легко встраиваются калориферы для промежуточного подогрева СА и, соответственно, могут быть созданы мягкие условия для сушки материалов. Недостатками сушилок: громоздкость из-за низкой интенсивности сушки; сложность; большое количество движущихся частей.

17.9.3 Барабанные сушилки

Барабанные сушилки – конвективные сушилки непрерывного действия для сушки зернистых, порошкообразных и кусковых материалов (рис. 17.10).

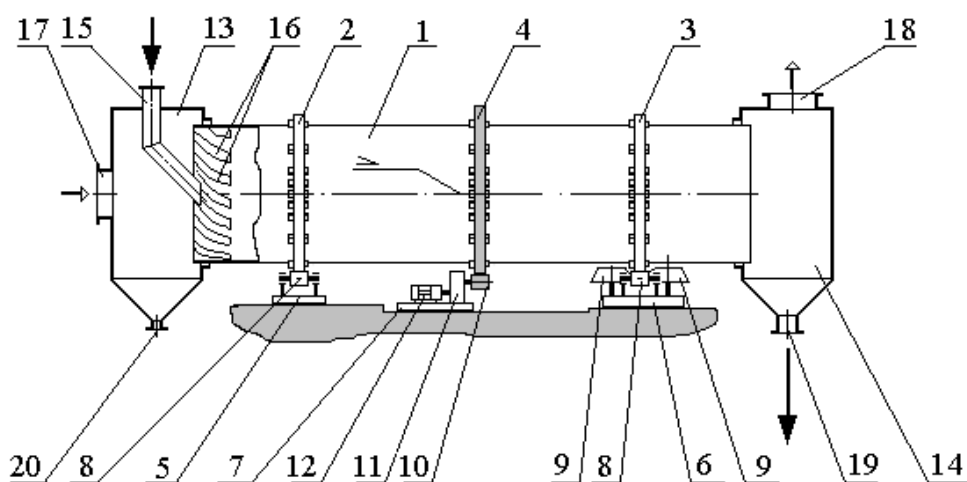


Рис. 17.10 – Барабанная сушилка:

1 – барабан; 2 и 3 – опорный и опорно-упорный бандаж;
4 – венцовая шестерня; 5–7 – опорная, опорно-упорная и приводная станции;
8 и 9 – опорные и упорные ролики; 10 – подвенцовая шестерня;
11 – редуктор; 12 – электродвигатель; 13 и 14 – загрузочная и разгрузочная камеры; 15 – течка; 16 – распределительная насадка. Штуцера: 17 и 18 – входа и выхода СА; 19 – выгрузки материала; 20 – удаления просыпи

Корпус сушилки – полый барабан 1 с опорным 2 и опорно-упорным 3 бандажми. Барабан устанавливается под небольшим наклоном к горизонту. Опорные ролики воспринимают вертикальные нагрузки от барабана, в том числе и при его вращении. Упорные ролики предотвращают продольное смещение барабана. Привод барабана осуществляется от приводной станции 7, включающей электродвигатель 12, редуктор 11 и подвенцовую шестерню 10. Подвенцовая шестерня находится в зацеплении с венцовой шестерней 4, закрепленной на барабане. Барабан верхним концом входит в загрузочную камеру 13, а нижним – в разгрузочную камеру 14. Через загрузочную камеру проходит течка 15 для подачи материала в барабан. Загрузочная камера имеет штуцер 17 для подачи свежего СА. Разгрузочная

камера имеет штуцера для отвода отработанного СА 18 и для выгрузки высушенного материала 19. Внутри барабана установлены спиральные лопасти – распределительная насадка 16.

При работе сушилки барабан приводится во вращение, в него подаются материал и СА. Наклонное положение барабана и пересыпание материала обеспечивают перемещение его от загрузочного конца к разгрузочному. Высушенный материал и отработанный СА покидают сушилку через соответствующие штуцера в разгрузочной камере. Для улучшения перемешивания и пересыпания материала в барабане устанавливают насадки.

Барабанные сушилки высокопроизводительны и высокоэффективны. Недостатки их: наличие движущихся частей и значительный расход энергии на привод.

17.9.4 Сушилки кипящего слоя (КС)

Конвективные сушилки КС используются для сушки сыпучих зернистых материалов в непрерывном и периодическом режимах.

Сушилка КС непрерывного действия (рис. 17.11) имеет корпус 1, разделенный распределительной решеткой 2 на две секции: нижнюю газораспределительную и верхнюю – сушильную камеру. Для равномерного распределения СА по сечению сушилки в ее нижней части установлен газораспределительный конус 3.

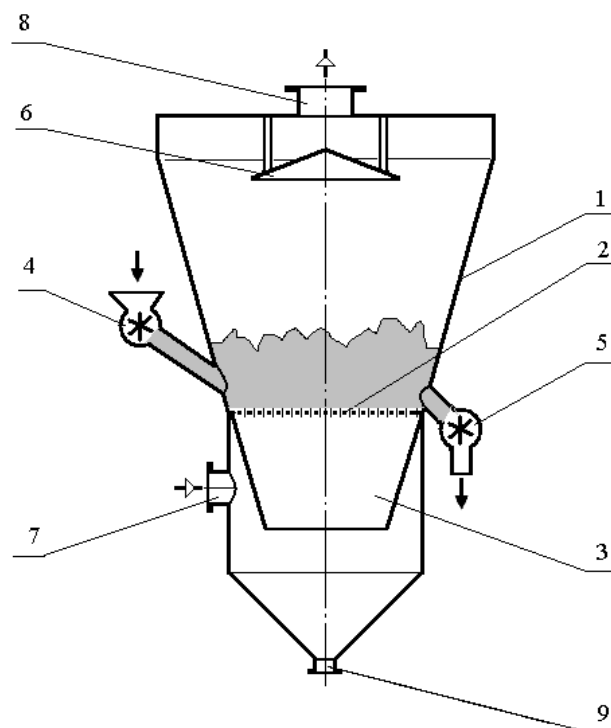


Рис. 17.12 – Сушилка кипящего слоя:

1 – корпус; 2 – решетка; 3 – газораспределительный конус; 4 и 5 – питатели подачи и выгрузки материала; 6 – отбойник. Штуцера: 7 и 8 – входа и выхода СА; 9 – выгрузки просыпи

При работе сушилки через штуцер 7 подается свежий СА, который через отверстия решетки 2 поступает в сушильную камеру. Одновременно на решетку 2 питателем 4 подается влажный материал, который контактируя с восходящим потоком СА, переходит в псевдооживленное состояние и высушивается. Достигнув противоположной от зоны загрузки части решетки, высушенный материал отводится питателем 5. Отработанный СА покидает сушилку через штуцер 8 в ее крышке.

Сушилки КС просты, высокоэффективны при удалении свободной влаги. Их недостатки: образование большого количества пыли; значительное гидравлическое сопротивление; невозможность получить высушенный материал с низкой конечной влажностью в одноступенчатой сушилке непрерывного действия; накопление статического электричества при работе с диэлектриками.

17.10 Специальные виды сушилок

Специальные сушилки: радиационные, диэлектрические, сублимационные.

В радиационных сушилках подвод тепла к материалу осуществляется инфракрасными лучами. При этом достигается большая плотность теплового потока, что обеспечивает быстрое удаление большого количества свободной влаги. В сушилках прогрев материала осуществляется с его открытой поверхности, поэтому они эффективны для сушки термостойких тонкослойных материалов.

В диэлектрических сушилках сушат диэлектрические материалы. Разогрев материала происходит во всем его объеме за счет колебания полярных молекул влаги в высокочастотном электромагнитном поле. Достоинство сушилок – быстрый разогрев материала во всем объеме. Сушилки должны быть надежно защищены от утечек электромагнитного излучения, опасного для живых организмов.

При сублимационной сушке материал предварительно замораживают. Затем в сушилке создают высокое разрежение. При этом влага, находящаяся в материале в твердом состоянии, возгоняется. Сушилки применяют для удаления влаги из нетермостойких материалов, в частности, пищевых продуктов.