

## 19 ТЕРМИЧЕСКАЯ СУШКА

### 19.1 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).

### 19.2 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.

### 19.3 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  $\varphi$  – отношение массы водяного пара в  $1 \text{ м}^3$  влажного воздуха к массе этого пара в  $1 \text{ м}^3$  влажного воздуха в состоянии насыщения. Определяется:

$$\varphi = \frac{p_{\text{п}}}{p_{\text{н}}}, \quad (19.1)$$

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:

$$I = c_{\text{с.в}}t + i_{\text{в.п}}x, \quad (19.2)$$

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. 19.1). 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  $p_n = \text{const}$ .

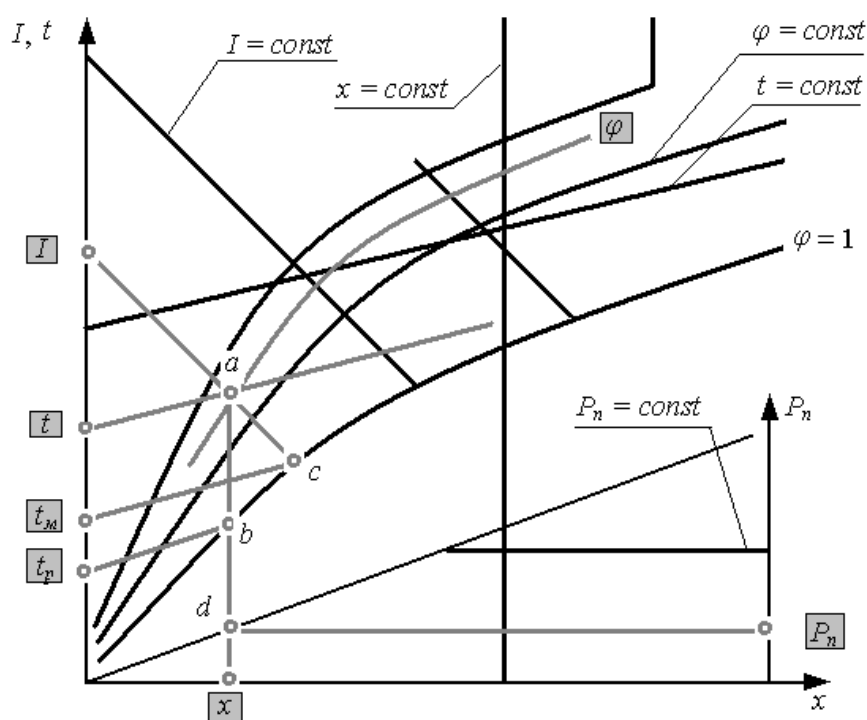


Рис. 19.1 – Определение параметров состояния влажного воздуха с помощью  $I-x$ -диаграммы

На рис. 19.1 показано определение параметров влажного воздуха с помощью диаграммы при известных: температуре воздуха  $t$  и его относительной влажности  $\varphi$  (точка  $a$  – точка пересечения изолиний температуры  $t$  и относительной влажности  $\varphi$ ). 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  $150^\circ\text{C}$ , линии  $t_m = \text{const}$  практически параллельны линиям постоянных энтальпий.

#### 19.4 Материальный баланс сушилки

На рис. 19.2 представлена схема конвективной сушилки, работающей по простому сушильному варианту (СА нагревается во внешнем калорифере и однократно проходит через сушильную камеру).

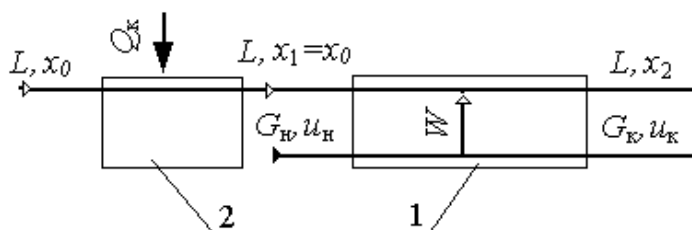


Рис. 19.2 – К составлению уравнений материального баланса сушилки:

$I$  – 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:

$$W = G_n - G_k; \quad (19.3)$$

$$W = G_n \frac{u_n - u_k}{1 - u_k} = G_k \frac{u_n - u_k}{1 - u_n} = G(U_n - U_k); \quad (19.4)$$

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:

$$G = G_n(1 - u_n) = G_k(1 - u_k). \quad (19.5)$$

Значения  $u$  и  $U$  связаны:

$$U = \frac{1}{1 - u}. \quad (19.6)$$

Массовый расход СА через сушилку  $L$ , кг/с:

$$L = \frac{W}{x_2 - x_1}. \quad (19.7)$$

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

### 19.5 Тепловой баланс сушилки.

#### Понятие о теоретической и действительной сушилке

Расход тепла на сушку при простом сушильном варианте (во внешнем калорифере, рис. 19.3),  $Q_k$  Вт:

$$Q_k = L(I_1 - I_0), \quad (19.8)$$

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

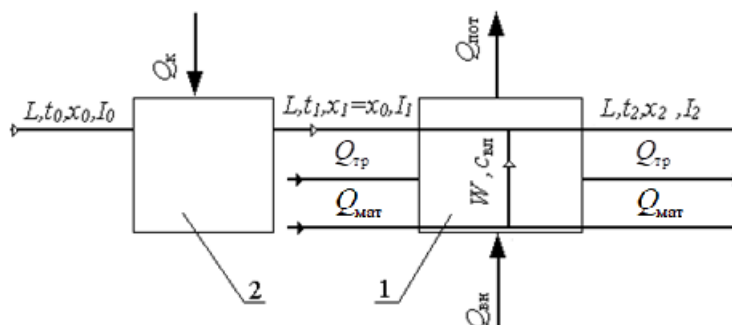


Рис. 19.3 – К составлению теплового баланса сушилки:  
1 – сушильная камера; 2 – калорифер

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:

$$L(I_1 - I_2) = Q_{\text{мат}} + Q_{\text{тр}} + Q_{\text{пот}} - Q_{\text{вл}} - Q_{\text{вн}}, \quad (19.9)$$

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

Правую и левую части выражения (19.9) делим на  $W$ . С учетом формулы (19.7) получаем:

$$\frac{I_1 - I_2}{x_2 - x_1} = q_{\text{мат}} + q_{\text{тр}} + q_{\text{пот}} - q_{\text{вл}} - q_{\text{вн}} = \Delta, \quad (19.10)$$

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;

$\Delta$  – общие удельные потери тепла в сушильной камере, кДж/кг влаги.

Для определения расходов СА  $L$  и тепла на сушку  $Q_{\text{к}}$ , систему уравнений (19.7) и (19.10) 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  $0^\circ\text{C}$ . 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. 19.4).

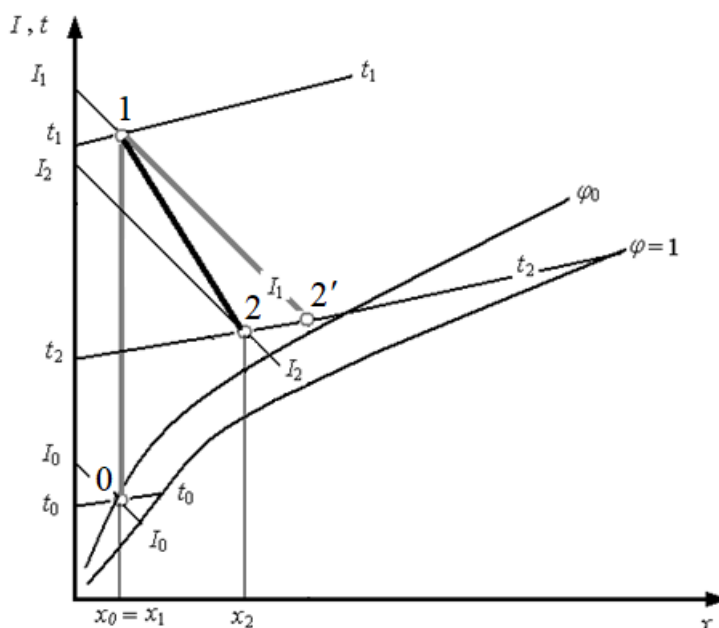


Рис. 19.4 – Отображение на  $I-x$ -диаграмме процессов сушки в теоретической и действительной сушилках

На рис. 19.4: 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.

## 19.6 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.

## 19.7 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  $u_K$ .

### 19.7.1 Кривая сушки

Указанные стадии сушки можно наблюдать на графиках: зависимость температуры поверхности материала от времени сушки  $t = f(\tau)$  (рис. 19.5); зависимость влагосодержания материала от времени сушки  $u = f(\tau)$  – кривая сушки (рис. 19.6).

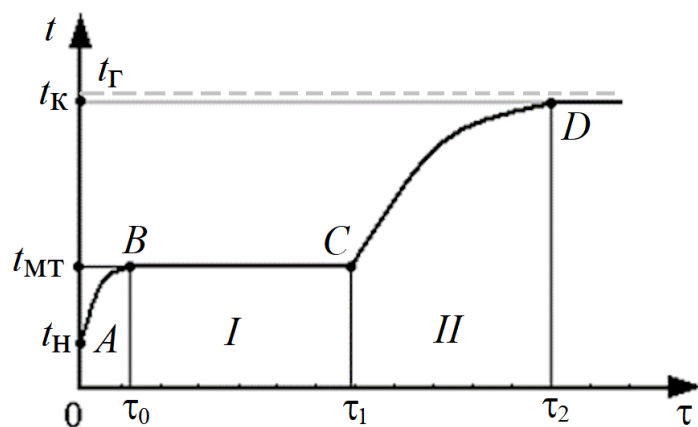


Рис. 19.5 – Зависимость температуры поверхности материала от времени сушки  $t = f(\tau)$

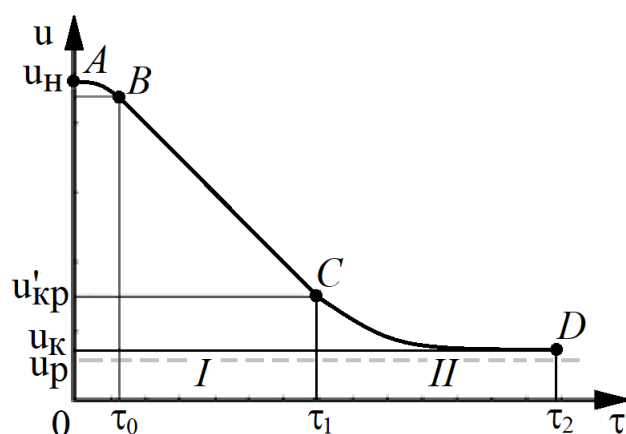


Рис. 19.6 – Зависимость влагосодержания материала от времени сушки  $u = f(\tau)$

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  $CA$   $t_Г$ .

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.

### 19.7.2 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. 19.7); зависимость скорости сушки от влагосодержания материала  $du/d\tau = f(u)$  (рис. 19.8).

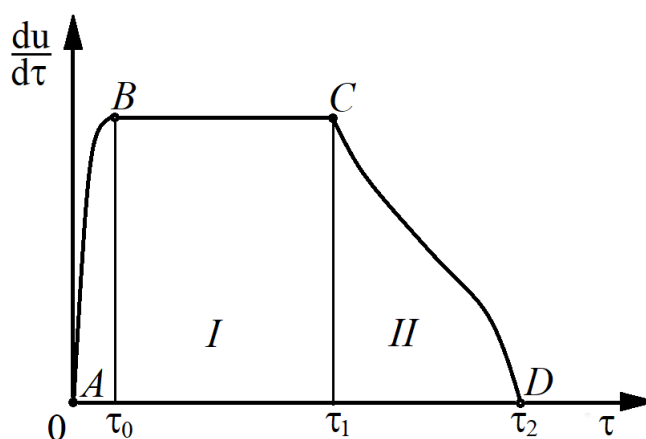


Рис. 19.7 – Зависимость  $du/d\tau = f(\tau)$

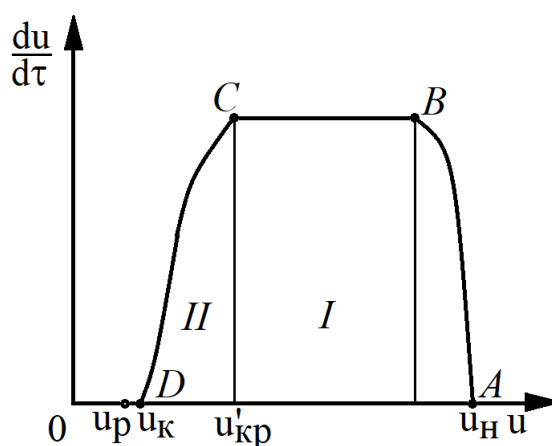


Рис. 19.8 – Зависимость  $du/d\tau = f(u)$

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  $CD$ .

### 19.7.3 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.

## 19.8 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.

## 19.9 Конструкции сушилок

### 19.9.1 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.

### 19.9.2 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. 19.9.

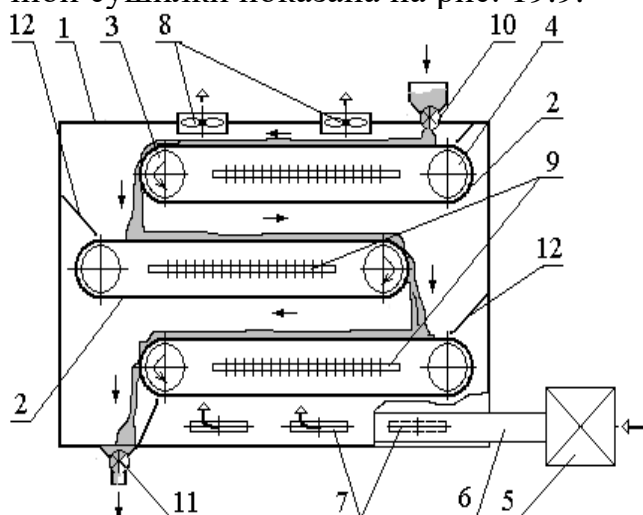


Рис. 19.9 – Ленточная сушилка:

- 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.

### 19.9.3 Барабанные сушилки

Барабанные сушилки – конвективные сушилки непрерывного действия для сушки зернистых, порошкообразных и кусковых материалов (рис. 19.10).

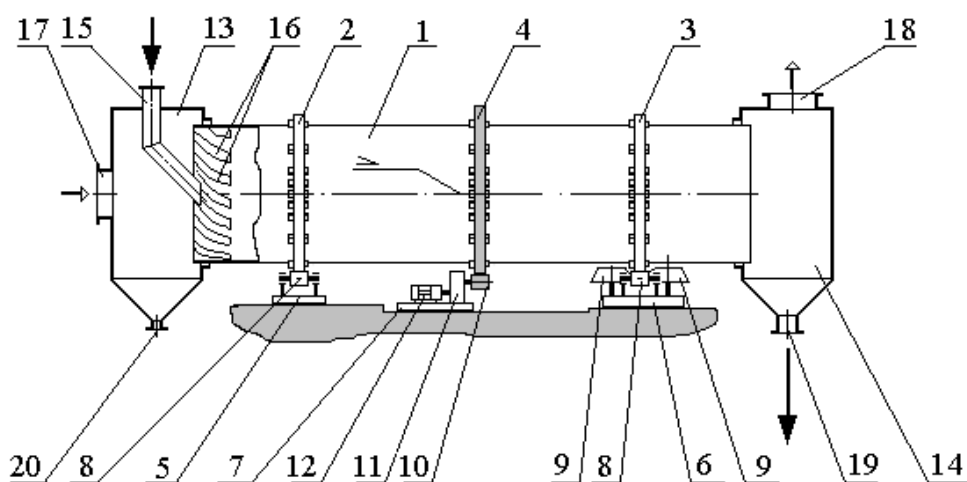


Рис. 19.10 – Барабанная сушилка:

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.

#### 19.9.4 Сушилки кипящего слоя (КС)

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

Сушилка КС непрерывного действия (рис. 19.11) 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.

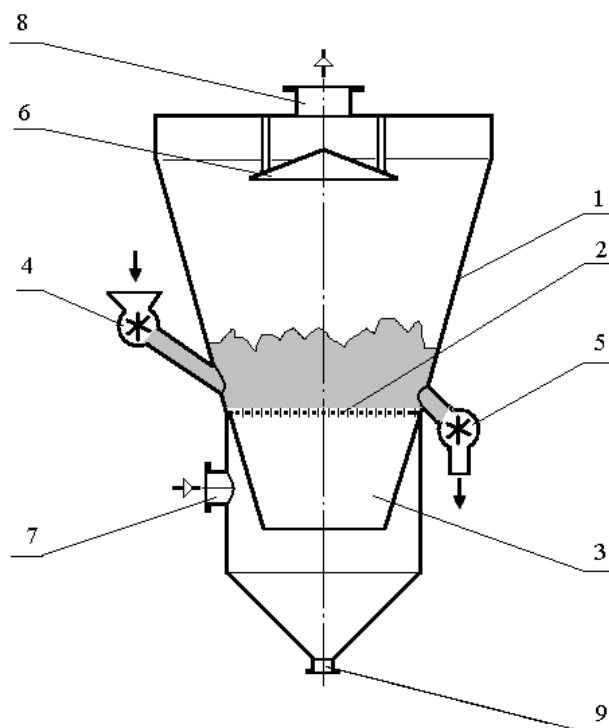


Рис. 19.12 – Сушилка кипящего слоя:

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.

### 19.10 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.