

Оглавление

Сушка. Виды сушки.	2
1. Относительная влажность. Влагосодержание. Энтальпия.	3
2. Анализ процесса адиабатической сушки.	6
3. Формы связи влаги с материалом	7
4. Влажность материала и изменение его состояния в процессе сушки.	9
5. Материальный баланс сушки.	10
6. Тепловой баланс сушки.	12
7. Скорость сушки.	13
8. Устройство и принцип действия сушилок	15

СУШКА. ВИДЫ СУШКИ.

Сушкой называется процесс удаления влаги из веществ (обычно твердых тел) путем ее испарения и отвода образующихся паров. Часто тепловой сушке предшествуют механические способы удаления влаги (отслаивание, фильтрование, центрифугирование и др.).

Во всех случаях при сушке в виде пара удаляется легколетучий компонент (вода, органический растворитель и т. д.). Этот процесс применяется обычно или на конечной стадии технологического процесса с целью обеспечения высоких физико-механических характеристик получаемых продуктов, или на промежуточных стадиях, если удаление растворителя необходимо по технологическим соображениям.

По физической сущности сушка является процессом совместного тепломассопереноса и сводится к перераспределению и перемещению влаги под воздействием теплоты из глубины высушиваемого материала к его поверхности и последующему ее испарению.

По способу подвода теплоты различают:

- *конвективную сушку*, проводимую путем непосредственного контакта материала и сушильного агента. Подвод теплоты осуществляется газовой фазой (воздух или смесь воздуха с продуктами сгорания топлива), которая в процессе сушки охлаждается с увеличением своего влагосодержания;
- *контактную (кондуктивную) сушку*, которая реализуется путем передачи теплоты от теплоносителя к материалу через разделяющую их стенку;
- *радиационную сушку*-путем передачи теплоты инфракрасным излучением;
- *сублимационную сушку*, при которой влага удаляется из материала в замороженном состоянии (обычно в вакууме);
- *диэлектрическую сушку*, при которой материал высушивается в поле токов высокой частоты.

Следует отметить, что при любом способе организации процесса материал находится в контакте с влажным газом. Поэтому целесообразно рассмотреть

физические свойства влажного газа. В большинстве случаев удалению из материала подлежит вода, поэтому обычно рассматривают систему сухой воздух-пары воды.

1. ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ВЛАЖНОСТЬ. ВЛАГОСОДЕРЖАНИЕ. ЭНТАЛЬПИЯ.

Смесь сухого газа с парами жидкости называется влажным газом. Влажный газ характеризуют следующие параметры: температура; давление; плотность; относительная и абсолютная влажность; влагосодержание; теплоемкость; энтальпия.

Влажный воздух, который наиболее часто используют в качестве сушильного агента, можно считать при небольших давлениях и положительных температурах бинарной смесью идеальных газов: сухого воздуха и водяного пара.

Пар называют свободным или перегретым при температуре t и давлении P , если он не конденсируется в этих условиях. Максимально возможное содержание пара в газе, выше которого наблюдается *конденсация*, соответствует условиям насыщения при определенной температуре t и парциальном давлении $p_{н.п.}$

Различают абсолютную, относительную влажности и влагосодержание влажного воздуха.

Абсолютная влажность - это масса водяного пара в единице объема влажного воздуха. Поскольку пар как компонент бинарной газовой смеси занимает весь объем влажного газа понятие абсолютной влажности совпадает с понятием плотности пара ρ (в кг/м³) при температуре t и парциальном давлении p .

Относительная влажность (φ) - это отношение количества паров жидкости в газе к максимально возможному при данных температуре и общем давлении или (что то же) отношение плотности пара ρ_p при данных условиях к плотности насыщенного пара $\rho_{н.п.}$ при тех же условиях:

$$\varphi = \frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{н.п.}}}$$

Под *влажносодержанием* x понимают количество пара жидкости (в кг), приходящегося на 1 кг абсолютно сухого газа:

$$x = \frac{G_{\text{п}}}{L}$$

где $G_{\text{п}}$ – масса (массовый расход) пара, кг (кг/с), L – масса (массовый расход) абсолютно сухого газа, кг (кг/с).

Рассмотрим влажное твердое тело, находящееся в контакте с газовым потоком. При постоянном давлении и определенной температуре влажный газ характеризуется величиной относительной влажности:

$$\varphi = \frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{н.п.}}} = \frac{p_{\text{п}}}{p_{\text{н.п.}}}$$

Если давление пара жидкости в материале отличается от парциального давления пара в газовом потоке, то между двумя фазами будет иметь место массообмен вплоть до состояния равновесия, которое возникает при $p_{\text{м}} = p_{\text{п}}$. При этом наступает состояние динамического равновесия, которому соответствует предельная влажность материала, называемая *равновесной влажностью* w_p^0 .

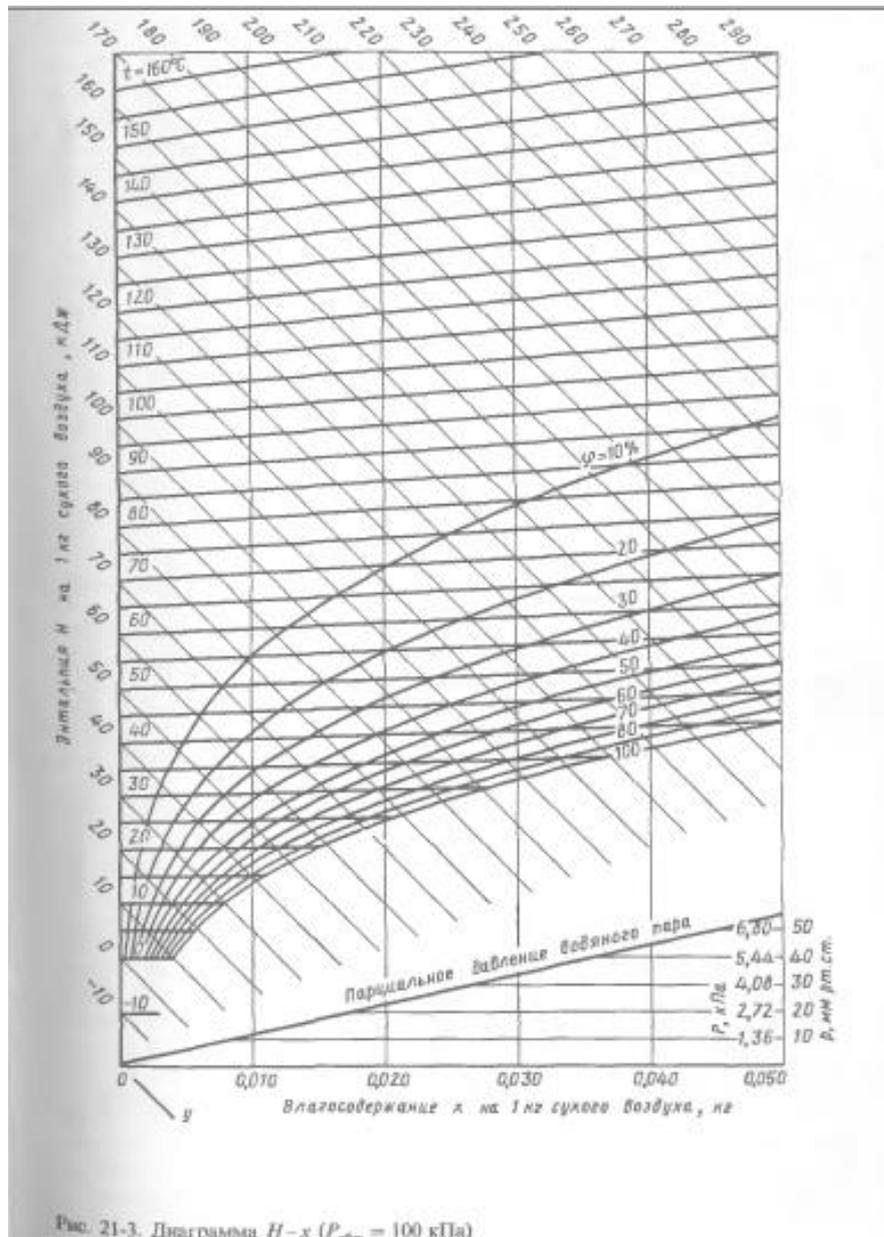
Влагосодержание – содержание влаги в килограммах на 1 кг материала.

Влажность материала может быть рассчитана по отношению к его общему количеству или по отношению к количеству находящегося в нем абсолютно сухого вещества.

Как отмечалось ранее, в большинстве технологических процессов термического обезвоживания материалов (тепловой сушки) в качестве сушильного агента используют воздух или смесь воздуха с продуктами сгорания топлива. Для определения параметров влажного воздуха, изменяющихся в процессе сушки, может быть использована диаграмма Л. К. Рамзина, на которой в координатах энтальпия (H) влагосодержание (x) нанесены линии постоянной относительной влажности ($\varphi = \text{const}$), изотермы

($t = \text{const}$) и линия зависимости парциального давления водяного пара от влагосодержания воздуха (рис. 21-3). Диаграмма построена для среднегодового давления центральных районов России (p_{100} кПа). Чтобы обеспечить корректное выполнение линий $\varphi = \text{const}$ (не допустить их слияния), угол между осями координат составляет 135° , т.е. линии постоянной энтальпии наклонены под таким углом к оси влагосодержаний.

Кроме того, на диаграмме имеются пунктирные линии (на рис. 21-3 эти линии не показаны), которые соответствуют постоянной температуре мокрого термометра. Чтобы определить понятие температуры мокрого термометра, необходимо рассмотреть изобарно-адиабатическое испарение при контакте воздуха с поверхностью жидкости.



2. АНАЛИЗ ПРОЦЕССА АДИАБАТИЧЕСКОЙ СУШКИ.

Адиабатическая сушка. В этом случае влага из материала будет испаряться за счёт тепла передаваемого материалу воздухом. При этом энтальпия воздуха не изменяется, а относительная влажность и влагосодержание увеличивается и температура понижается.

До сушки энтальпия=150кДж/кг $t=90$ влагосодержание 0,02 $\phi=5\%$. После сушки температура снизилась до 50, а относительная влажность стала 45%.

По линии адиабатического насыщения воздуха происходит изменение его состояния (температуры, влагосодержания и относительной влажности) при адиабатическом процессе испарения влаги со свободной поверхности или с поверхности влажного материала в начальный период сушки.

После достижения равновесия между влажным воздухом и испаряемой с поверхности влагой температура поверхности принимает постоянное значение равное температуре мокрого термометра. Эта температура является *температурой адиабатического насыщения*.

Изменение состояния воздуха при адиабатическом процессе относительная влажное испарение влаги со свободной поверхности происходит по линии $t_m = \text{const}$.

Температура сухого термометра 40, относительная влажность 50%.

При одних и тех же условиях температура мокрой поверхности меньше температуры сухой на 10.

Равновесия при сушке.

Если материал находится в контакте с влажным воздухом, то принципиально возможны два процесса:

а) сушка (десорбция влаги из материала) – если парциальное давление пара над поверхностью материала $P_{\text{п}}^{\text{м}}$ превышает его парциальное давление в окружающей среде $P_{\text{п}}^{\text{с}}$ ($P_{\text{п}}^{\text{м}} > P_{\text{п}}^{\text{с}}$);

б) увлажнение (сорбция в лаги материалом) – если $P_{\text{п}}^{\text{м}} < P_{\text{п}}^{\text{с}}$.

В процессе сушки величина $P_{\text{п}}^{\text{м}}$ уменьшается и приближается к пределу $P_{\text{п}}^{\text{м}} = P_{\text{п}}^{\text{с}}$.

3. ФОРМЫ СВЯЗИ ВЛАГИ С МАТЕРИАЛОМ

Механизм процесса сушки в значительной степени определяется формой связи влаги с материалом, чем эта связь прочнее, тем труднее протекает процесс. При сушке связь влаги с материалом нарушается. Различают следующие формы связи (в порядке убывания ее энергии) химическую, физико-химическую, механическую.

1) Химическая влага прямо связана с веществом в виде гидроксидных ионов и молекул соединением типа кристаллогидратов. Такая влага удаляется либо при химическом взаимодействии, либо путём прокаливании. (При сушке не удаляется).

2) Физико-химическая:

а) адсорбционная- прочно удерживается на поверхности и в порах материала.

б) осмотическая(влага набухания) – удаляется легче, находится внутри клеток материала и удерживается осмотическими силами.

в) физико-механическая - определяет влагу, свободно удерживающуюся в объёме пор тела, легко удаляется при сушке, причём наиболее легко удаляется механическая капиллярно-связанная влага, которая легко удаляется также механическим способом.

Применимо к процессу сушки влагу материала классифицируют на:

1) Свободную влагу, скорость испарения которой из материала равна скорости испарения воды со свободной поверхности, т.е при наличии в материале свободной влаги.

$P_m = P_m$ -давление насыщенного пара воды над её свободной поверхностью.

2) Связанная влага, скорость испарения которой из материала меньше скорости испарения воды со свободной поверхности.

$P_m < P_m$

Все твёрдые влажные материалы можно разделить на три группы:

1) Капиллярно-пористые - материалы в которых жидкость связана капиллярными силами. При удалении влаги эти тела становятся хрупкими, они слабо сжимаются и в высушенном состоянии легко превращаются в порошок (гипс).

2) Коллоидные - материалы, в которых преобладает адсорбция и осмотическая связанная влага. При высушивании эти тела значительно сжимаются, но при этом сохраняют эластичность (желатин).

3) *Коллоидно-пористые* - коллоидные тела по свойствам занимают промежуточное положение (глина, торф).

4. ВЛАЖНОСТЬ МАТЕРИАЛА И ИЗМЕНЕНИЕ ЕГО СОСТОЯНИЯ В ПРОЦЕССЕ СУШКИ.

Влажность материала может быть рассчитана по отношению к его общему количеству G и по отношению к количеству находящегося в нём абсолютно сухого вещества G_c .

$$\omega = \frac{G_{\text{вл.}}}{G} * 100\%$$

$$\omega = \frac{G_{\text{вл.}}}{G_c} * 100\%$$

Количество абсолютно сухого материала не меняется в процессе сушки и для упрощения расчетов обычно пользуются величинами ω и ω^c .

$$\omega = \frac{\varpi}{100 - \varpi} * 100\%$$

$$\omega = \frac{\varpi}{100 + \varpi} * 100\%$$

При изменении влажности материала от ω_1 до ω_r материал содержит свободную влагу и находится во влажном состоянии.

При изменении влажности от ω_r до ω_p материал содержит связанную влагу и находится в гигроскопическом состоянии.

A - гигроскопическая точка, а соответствующая ей влажность ω_r - гигроскопическая влажность.

Также как и во всей области влажности состояния в точке A .

Гигроскопическая влажность находится на границе свободной и связанной влаги в материале.

Свободная влага будет удаляться из материала при любой относительной влажности.

Удаление связанной влаги возможно лишь при той относительной влажности окружающей среды, которой соответствует влажность материала больше равновесной.

При гигроскопическом состоянии материала, отвечает область над кривой равновесной влажности возможно только увлажнение материала.

5. МАТЕРИАЛЬНЫЙ БАЛАНС СУШКИ.

Баланс по высушиваемому материалу является обязательным для всех видов сушки.

G_1 – количество материала поступившего на сушку кг/ч;

G_2 – количество высушенного материала кг/ч;

ω_1 – начальная влажность материала, %;

ω_2 – конечная влажность материала, %;

W – количество влаги, удавившаяся при сушке из материала, кг/ч.

$G_1 = G_2 + W$ по всему материалу.

По абсолютно сухому веществу в высушенном материале

$$G_1 \frac{100 - \omega_1}{100} = G_2 \frac{100 - \omega_2}{100}$$

$$G_1 = G_2 \frac{100 - \omega_2}{100 - \omega_1}$$

$$G_2 = G_1 \frac{100 - \omega_1}{100 - \omega_2}$$

Целью составления математического баланса является определение количества влаги удаленной при сушке

$$W = G_1 \frac{\omega_1 - \omega_2}{100 - \omega_2} = G_2 \frac{\omega_1 - \omega_2}{100 - \omega_1}$$

Иногда удобно более удобно выражать влажность материала по отношению не по всей массе, а к массе сухого вещества.

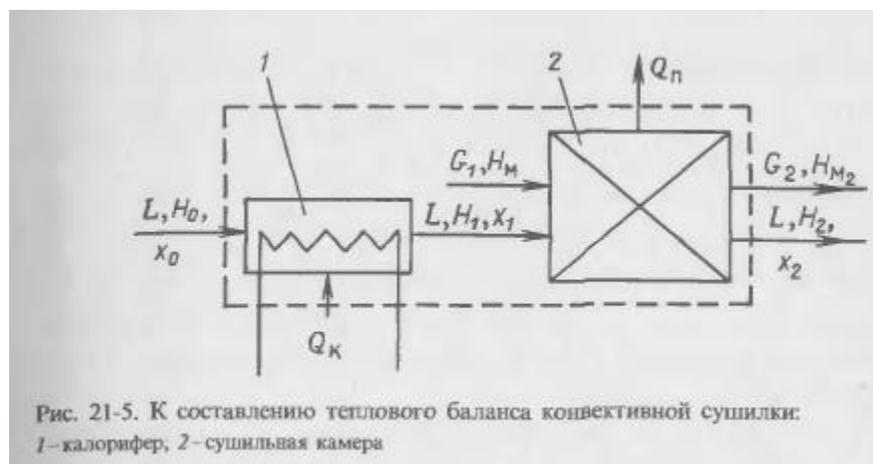
$$W = G_1 \frac{\omega_1^c - \omega_2^c}{100 - \omega_2^c}$$

$$W = G_2 \frac{\omega_1^c - \omega_2^c}{100 - \omega_1^c}$$

Если известная величина W , то можно определить количество высушенного материала, то есть сделать баланс по высушенному материалу.

При расчете конвективных сушилок помимо баланса по высушенному материалу составляется математический баланс по влаге, из которой находят расход воздуха на сушке.

Рассмотрим основную схему конвективной сушки на примере воздушной сушилки, в которой воздух нагревается только в калорифере при ней и проходит через сушилку однократно.



Расход абсолютно сухого воздуха L (кг/ч);

Влагосодержащий воздух X , на входе X_0 ;

На входе в сушилку X_1 , а на выходе X_2 , причем $X_0 = X_1$

$Lx_2 + W = Lx_1$, где $L = \text{const}$.

Отсюда расход абсолютного воздуха на сушку:

$$L = \frac{W}{X_2 - X_1} = \frac{W}{X_2 - X_0}$$

Удельный расход воздуха на извлечение из материала 1 кг влаги:

$$l = \frac{L}{W} = \frac{1}{X_2 - X_1} = \frac{1}{X_2 - X_0}$$

6. ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС СУШКИ.

I_0 – энтальпия воздуха до калорифера;

I_1 – энтальпия до сушки;

I_2 – энтальпия после сушки;

I_{M1} – энтальпия материала до сушки;

I_{M2} – энтальпия материала после сушки.

Поток теплоты входящий с материалами в сушилку:

$$G_1 I_{M1} = G_2 C_M t_1 + W C_B t_1$$

C_M – теплоемкость высушенного материала;

C_B – теплоемкость воды;

T_1 – температура материала поступающего на сушку.

$$G_2 I_{M2} = G_2 C_M t_2$$

Теплота, необходимая для сушки подводится из калорифера Q_k . С учетом поступающего в сушилку и уходящего из нее сушильного агента, а также потери теплоты, запишем формулу:

$$I_0 L + G_2 c_m t_1 + W c_B t_1 + Q_k = L I_2 + G_2 c_m t_2 + Q_{\Pi}$$

Q_{Π} - потери тепла;

G - масса материала, проходящая через сушилку в единицу времени;

$t_{т.н.;т.к.}$ - начальная и конечная температура материала.

Если в сушильной камере установлен дополнительный калорифер, то дополнительно подводится тепло $Q_{доп}$.

Общий расход теплоты на сушку:

$$Q_k + Q_{доп} = L(I_2 - I_0) + G_2 c_m (t_2 - t_1) + G_T c_T (t_{т.к.} - t_{т.н.}) - W c_B t_1 + Q_{\Pi}$$

Разделим обе части на расход удалившейся влаги W , получим:

$$q_k + q_{доп} = l(I_2 - I_0) + q_m + q_T + q_{\Pi} - c_B t$$

q – удельный расход теплоты.

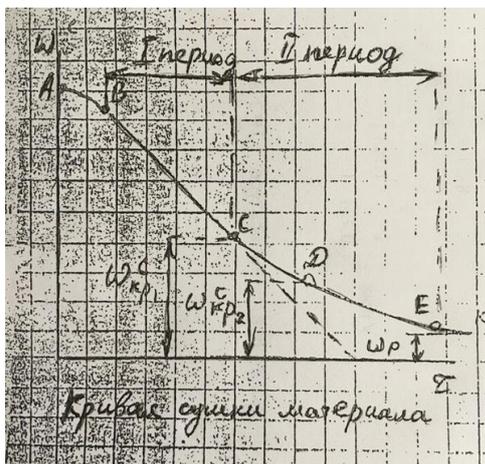
$$l(I_2 - I_0) = (q_{доп} + c_B t) - (q_m + q_T + q_{\Pi}) = \Delta$$

Δ – внутренний баланс сушильной камеры.

Данное выражение показывает, на сколько процесс сушки отклоняется от энтальпийного, при которой $\Delta=0$.

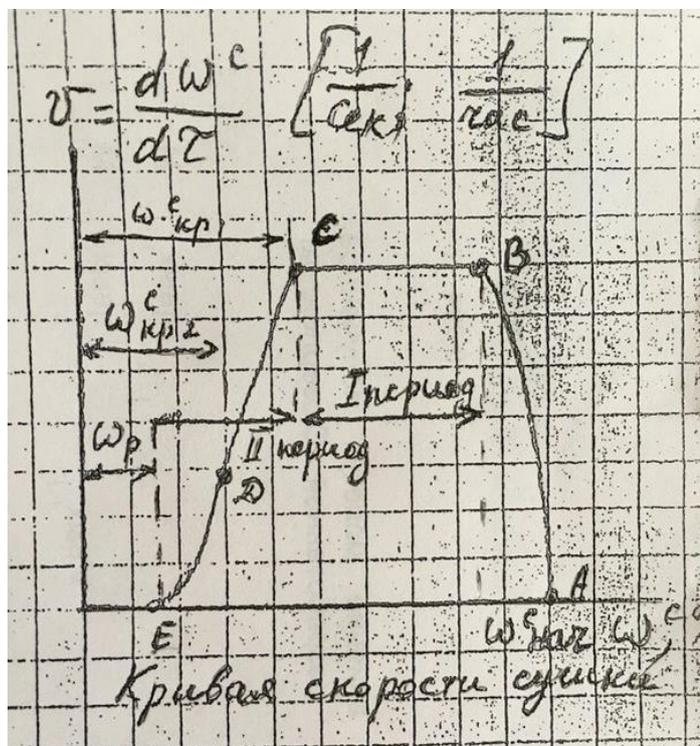
7. СКОРОСТЬ СУШКИ

Определение для расчета продолжительности сушки: кинетика сушки характеризуется средней влажностью материала относительной к количеству абсолютно сухого материала.



I – влажность снижается незначительно (А-В), наступает период скорости сушки до точки С. При этом влажность материала снижается прямолинейно. Это наблюдается до достижения первой критической влажности $\omega_{кр}^c$; после чего начинается период падения скорости сушки (II период).

В конце второго периода сушки влажность материала ассиметрически приближается к равновесной. Достижение равновесной влажности означает полное прекращение дальнейшего испарения влаги из материала.



Показана кривая скорости сушки, которая соответствует кривой сушки.

Скорость сушки:

$$v = \frac{dw^c}{d\tau}$$

Горизонтальный отрезок ВС отвечает периоду постоянно скорости (I период), отрезок СЕ периоду падающей скорости (II период).

I период происходит интенсивно к поверхности испаряемой свободной влаги.

В точке С испаряется связанная влага.

D соответствует $\omega_{кр2}^c$, достигается равновесная влажность на поверхности материала (внутри материала влажность превышает равновесную).

С этого момента вплоть до конца сушки скорость и определяется диффузией влаги к поверхности.

Помимо этого часть поверхности материала становится сухой, что также замедляет скорость сушки.

Температура материала меняется следующим образом: первоначально за очень короткий период быстро повышается температура, потом достигается постоянная величина – температура мокрого термометра (I период).

В период падающей скорости (II период) поверхность материала становится частично сухой и температура ее поднимается и при наступлении равновесия температура материала (полностью прогретого) становится равной температуре окружающей среды.

8. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ СУШИЛОК

Конструкции сушилок разнообразны и классифицируются по ряду признаков:

- по способу организации процесса (периодические и непрерывные);
- по направлению движения теплоносителя относительно материала (прямоточные, противоточные, с перекрестным током);
- по величине давления в рабочем пространстве (атмосферные, вакуумные, под избыточным давлением);

-по виду используемого теплоносителя (воздушные, на дымовых или инертных газах, на насыщенном или перегретом паре, на жидких теплоносителях);

-по способу подвода теплоты (конвективные, контактные, радиационные, с нагревом токами высокой частоты, с акустическим или ультразвуковым нагреванием);

-по виду высушиваемого материала и т.д.

Наличие большого числа признаков затрудняет общую классификацию сушилок. Поэтому ограничимся рассмотрением групп сушилок, которые находят применение в химической технологии. Ниже будут рассмотрены конструкции сушилок, которые объединены по способу подвода теплоты и состоянию слоя высушиваемого материала.

Камерная сушилка. Камерные сушилки (рис. 21-15) представляют собой герметичные камеры, внутри которых высушиваемый материал в зависимости от его вида располагается на сетках, противнях, шестах, зажимах и других приспособлениях.

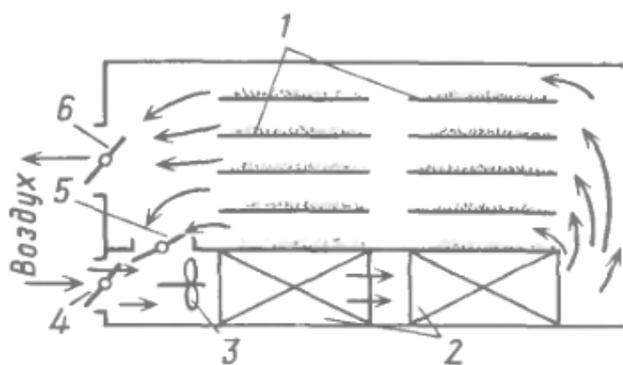


Рис. 21-15. Камерная сушилка:

1 – полки для загрузки высушиваемого материала; 2 – калорифер; 3 – вентилятор; 4 – заслонка для регулирования расхода свежего воздуха; 5, 6 – заслонки (шиберы) для регулирования расходов рециркулирующего и отработанного воздуха

Камеры изготовляют из дерева, кирпича, бетона, металла и иных материалов, выбор которых обусловлен их размерами, температурным режимом процесса, а в ряде случаев также свойствами высушиваемого материала. Объем и размеры камеры определяются продолжительностью

сушки и производительностью аппарата. Для ускорения загрузки и выгрузки материала противни или сетки для укладки размещают часто на вагонетках.

Свежий воздух с помощью вентилятора 3 через калорифер 2 подают в пространство *камеры*, внутри которой находятся полки 1 с высушиваемым материалом. Заслонки 5, 6 служат для регулирования расходов рециркулирующего и отработанного воздуха.

К достоинствам камерных сушилок относятся прежде всего простота их устройства, но они обладают рядом существенных недостатков: периодичность действия, большая затрата ручного труда на загрузку и выгрузку материала, низкая производительность и неравномерность высушивания из-за наличия неподвижного толстого слоя материала и т.д. Как правило, их применяют для сушки сравнительно небольших количеств материала и при достаточно большой продолжительности процесса.

Туннельные сушилки (рис. 21-16) - аппараты непрерывного действия, представляющие собой длинные камеры.

Внутри камеры по рельсам медленно перемещается ряд вагонеток, загруженных высушиваемым материалом. Поток нагретого воздуха, нагнетаемый вентилятором 2 через калорифер 3, проходит вдоль камеры, омывая высушиваемый материал (в данном случае противотоком) и испаряя влагу. Торцы камеры закрываются плотно прилегающими дверями-шлюзами 4, периодически открывающимися для удаления с одного конца вагонетки с высушенным материалом и загрузки с другого конца вагонетки с влажным материалом.

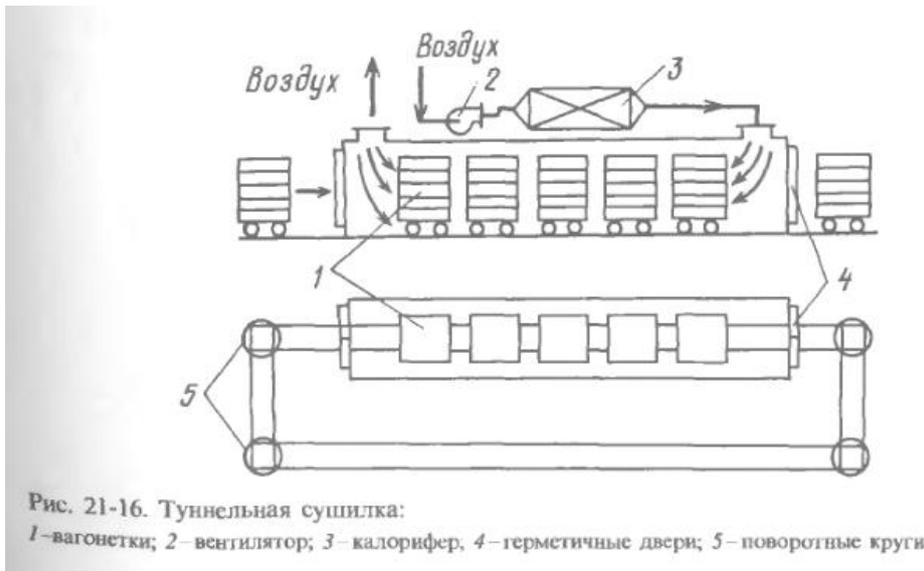


Рис. 21-16. Туннельная сушилка:
1 – вагонетки; 2 – вентилятор; 3 – калорифер; 4 – герметичные двери; 5 – поворотные круги

Общий недостаток камерных и туннельных сушилок состоит в плохом перемешивании высушиваемых материалов, обуславливающим неравномерность их сушки.

Туннельные сушилки обычно используют для сушки большого числа штучных материалов, например керамических изделий. По интенсивности процесса они мало отличаются от камерных и им присущи основные недостатки последних (длительная и неравномерная сушка, ручное обслуживание).

Петлевые сушилки (рис. 21-18) непрерывного действия предназначены, например, для сушки пастообразных материалов при атмосферном давлении.

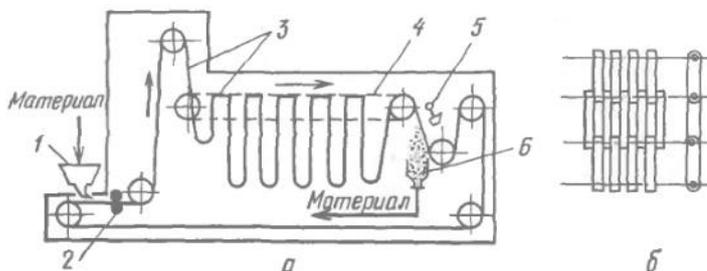


Рис. 21-18. Петлевая сушилка (а) и элемент сетчатой ленты (б):
1 – питатель влажного материала; 2 – обогреваемые валки для вдавливания материала в сетку;
3 – бесконечная сетчатая лента; 4 – цепной конвейер для передвижения петель сетчатой ленты;
5 – ударный механизм; 6 – бункер со шнеком

В петлевой сушилке питатель 1 подает материал на бесконечную

Ленточную сетчатую ленту 3, которая проходит между обогреваемыми паром вальцами 2, вдавливающими материал внутрь ячеек ленты. Лента с впрессованным материалом поступает в сушильную камеру, где образует петли. Это достигается с помощью шарнирно соединенных звеньев ленты и расположенных на ней через определенные промежутки поперечных планок, опирающихся на цепной конвейер 4. При помощи Направляющего ролика лента отводится к автоматическому ударному устройству 5, посредством которого высушенный материал сбрасывается в бункер 6, снабженный Разгрузочным шнеком. Сушильный агент движется поперек ленты.

В петлевых сушилках сушка производится в слое небольшой толщины (равной толщине звеньев ленты, составляющей 5-20 мм) при двустороннем омывании ленты горячим воздухом и прогреве запрессованного материала металлическим каркасом (сеткой), нагретым вальцами. Это обеспечивает большую скорость сушки по сравнению с камерными сушилками. Следует отметить, что петлевые сушилки отличаются сложностью конструкции и требуют значительных эксплуатационных расходов.

Барабанные сушилки (рис. 21-19) широко применяют для непрерывной сушки, как правило, при атмосферном давлении, кусковых, зернистых и сыпучих материалов (минеральных солей, фосфоритов и др.).

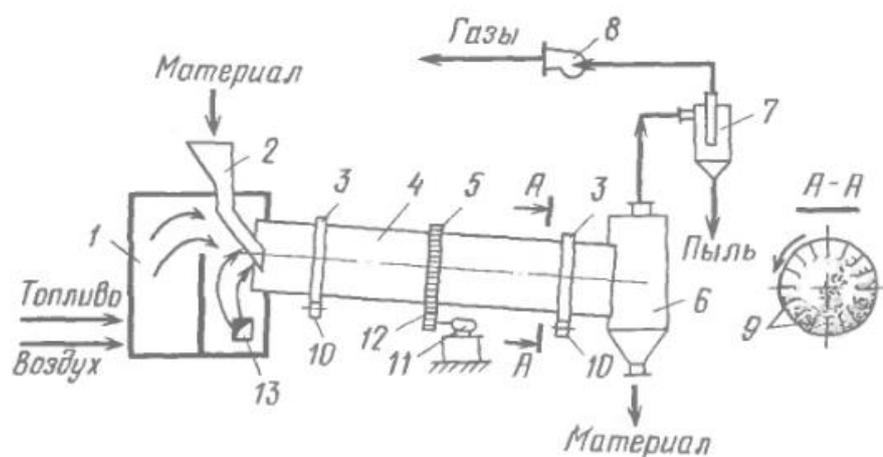


Рис. 21-19. Барабанная сушилка:

1 – топка; 2 – питатель; 3 – бандажи; 4 – барабан; 5 – зубчатый венец; 6 – разгрузочная камера; 7 – циклон; 8 – вентилятор; 9 – подъемно-лопастная насадка; 10 – опорные ролики; 11 – электродвигатель; 12 – шестеренчатая передача; 13 – окно для подачи вторичного воздуха

Барабанные сушилки имеют диаметр от 1 до 3,5 м, причем барабаны диаметром до 2,8 м могут быть различной длины (отношение длины к диаметру барабана колеблется от 4 до 8), а барабаны диаметром 2,8, 3,0 и 3,5 м выпускаются только одной длины - соответственно 14, 20 и 27 м.

Применяют также барабанные вакуумные сушилки, которые работают, как правило, периодически. Их используют для сушки термочувствительных материалов от воды и органических растворителей, а также для сушки токсичных материалов. В зависимости от свойств материала и требований к готовой продукции применяют сушилки среднего (остаточное давление 3-13 кПа) или глубокого (остаточное давление до 133 Па) вакуума. Вакуумные барабанные сушилки применяют в основном в производстве ядохимикатов, гербицидов, некоторых полимерных материалов, а также в медицинской, пищевой и фармацевтической промышленности.

