

ГЛАВА XV

СУШКА

1. Общие сведения

Удаление влаги из твердых и пастообразных материалов позволяет удешевить их транспортировку, придать им необходимые свойства (например, уменьшить слеживаемость удобрений или улучшить растворимость красителей), а также уменьшить коррозию аппаратуры и трубопроводов при хранении или последующей обработке этих материалов.

Влагу можно удалять из материалов механическими способами (отжимом, отстаиванием, фильтрованием, центрифугированием). Однако более полное обезвоживание достигается путем испарения влаги и отвода образующихся паров, т. е. с помощью тепловой сушилки.

Этот процесс широко используется в химической технологии. Он часто является последней операцией на производстве, предшествующей выпуску готового продукта. При этом предварительное удаление влаги обычно осуществляется более дешевыми механическими способами (например, фильтрованием), а окончательное — сушкой. Такой комбинированный способ удаления влаги позволяет повысить экономичность процесса.

В химических производствах, как правило, применяется искусственная сушка материалов в специальных сушильных установках, так как естественная сушка на открытом воздухе — процесс слишком длительный.

По своей физической сущности сушка является сложным диффузионным процессом, скорость которого определяется скоростью диффузии влаги из глубины высушиваемого материала в окружающую среду. Как будет показано ниже, удаление влаги при сушке сводится к перемещению тепла и вещества (влаги) внутри материала и их переносу с поверхности материала в окружающую среду. Таким образом, процесс сушки является сочетанием связанных друг с другом процессов тепло- и массообмена (влагообмена).

По способу подвода тепла к высушиваемому материалу различают следующие виды сушки:

1) конвективная сушка — путем непосредственного соприкосновения высушиваемого материала с сушильным агентом, в качестве которого обычно используют нагретый воздух или топочные газы (как правило, в смеси с воздухом);

2) контактная сушка — путем передачи тепла от теплоносителя к материалу через разделяющую их стенку;

3) радиационная сушка — путем передачи тепла инфракрасными лучами;

4) электрическая сушка — путем нагревания в поле токов высокой частоты;

5) сублимационная сушка — сушка в замороженном состоянии при глубоком вакууме. По способу передачи тепла этот вид сушки аналогичен контактной, но своеобразие процесса заставляет сублимационную сушку выделять в особую группу.

Последние три вида сушки применяются относительно редко и обычно называются специальными видами сушки.

Высушиваемый материал при любом методе сушки находится в контакте с влажным газом (в большинстве случаев воздухом). При конвективной сушке влажному газу (являющемуся сушильным агентом) принадлежит основная роль в процессе. Поэтому изучение свойств влажного газа необходимо при рассмотрении процессов сушки и их расчетах.

2. Основные параметры влажного газа

При конвективной сушке сушильный агент передает материалу тепло и уносит влагу, испаряющуюся из материала за счет этого тепла. Таким образом, сушильный агент играет роль тепло- и влагоносителя. При прочих методах сушки находящийся в контакте с материалом влажный газ (обычно воздух) используется лишь для удаления испарившейся влаги, т. е. выполняет роль влагоносителя.

Влажный газ является смесью сухого газа и водяного пара *. В дальнейшем под влажным газом будет подразумеваться только влажный воздух, учитывая, что физические свойства топочных газов и влажного воздуха отличаются лишь количественно. Влажный воздух как влаго- и теплоноситель характеризуется следующими основными параметрами: абсолютной и относительной влажностью, влагосодержанием и энтальпией (теплосодержанием).

Абсолютная влажность определяется количеством водяного пара в кг, содержащегося в 1 м³ влажного воздуха. С достаточной для технических расчетов точностью можно считать, что влажный воздух подчиняется законам идеальных газов. Тогда водяной пар как компонент газовой смеси (влажного воздуха), находясь под парциальным давлением p_n , должен занимать весь объем смеси (1 м³). Поэтому абсолютная влажность равна массе 1 м³ пара, или плотности водяного пара ρ_n (в кг/м³) при температуре воздуха и парциальном давлении p_n .

Относительной влажностью, или степенью насыщения воздуха φ , называется отношение массы водяного пара в 1 м³ влажного воздуха ρ_n при данных условиях, температуре и общем барометрическом давлении к максимально возможной массе водяного пара в 1 м³ воздуха ρ_n (плотности насыщенного пара) при тех же условиях:

$$\varphi = \frac{\rho_n}{\rho_n} \quad (\text{XV},1)$$

В соответствии с уравнением состояния идеальных газов (уравнение Менделеева—Клапейрона)

$$\rho_n = \frac{p_n M_n}{RT} \quad \text{и} \quad \rho_n = \frac{p_n M_n}{RT} \quad (\text{XV},2)$$

где T — абсолютная температура, °К; M_n — молярная масса водяного пара, равная 18 кг/кмоль; R — универсальная газовая постоянная, равная 8314 Дж/(кмоль·град) = 1,99 ккал/(кмоль·град); p_n — давление насыщенного водяного пара при данной температуре и общем барометрическом давлении, н/м².

Подставляя значения ρ_n и ρ_n в выражение (XV,1), получим

$$\varphi = \frac{p_n}{p_n} \quad (\text{XV},3)$$

Если температура воздуха ниже или равна температуре насыщения, соответствующей общему (барометрическому) давлению (т. е. ниже примерно 100 °С), то максимально возможное давление водяного пара равно

* В большинстве случаев влагой материала является вода, которая в виде водяного пара переходит в сушильный агент. Однако при сушке может испаряться любая жидкость, содержащаяся в материале (например, летучие растворители).

давлению сухого насыщенного пара, которое может быть взято из Международных таблиц водяного пара при данной температуре воздуха.

Если температура воздуха выше температуры насыщения, то максимально возможное давление водяного пара будет равно общему, или барометрическому, давлению B . В этих условиях

$$\varphi = \frac{p_n}{B} \quad (\text{XV,4})$$

Относительная влажность φ является одной из важнейших характеристик воздуха как сушильного агента, определяющая его влагоемкость, т. е. способность воздуха к насыщению парами влаги.

При нагревании воздуха приблизительно до 100°C величина p_n , входящая в выражение (XV,3), возрастает и соответственно снижается φ ; дальнейшее повышение температуры происходит при $\varphi = \text{const}$. При охлаждении воздуха в процессе сушки, которое сопровождается поглощением влаги из материала, p_n уменьшается, а φ возрастает, в отдельных случаях вплоть до насыщения воздуха ($\varphi = 1$).

В процессе сушки воздух увлажняется и охлаждается и соответственно изменяет свой объем. Поэтому использование в качестве параметра воздуха его абсолютной влажности усложняет расчеты. Более удобно относить влажность воздуха к единице массы абсолютно сухого воздуха (1 кг сухого воздуха) — величине, не изменяющейся в процессе сушки.

Масса водяного пара (в кг), содержащегося во влажном воздухе и приходящегося на 1 кг абсолютно сухого воздуха, называется влаго-содержанием воздуха:

$$x = \frac{m_n}{m_{с.в}} = \frac{p_n}{p_{с.в}} \quad (\text{XV,5})$$

где m_n и $m_{с.в}$ — масса водяного пара и масса абсолютно сухого воздуха в данном объеме влажного воздуха; $p_{с.в}$ — плотность абсолютно сухого воздуха.

Для того чтобы установить связь между влажностью x и относительной влажностью φ , подставим в выражение (XV,5) значения p_n и $p_{с.в}$, определенные из уравнения (XV,2). Тогда

$$x = \frac{p_n M_n}{RT} : \frac{p_{с.в} M_{с.в}}{RT} = \frac{M_n}{M_{с.в}} \cdot \frac{p_n}{p_{с.в}}$$

где $p_{с.в}$ — парциальное давление абсолютно сухого воздуха; $M_{с.в}$ — молярная масса абсолютно сухого воздуха, равная 29 кг/моль .

По закону Дальтона $p_{с.в}$ равно разности общего давления влажного воздуха P и парциального давления водяного пара в нем:

$$p_{с.в} = P - p_n$$

а из уравнения (XV,3)

$$p_n = \varphi p_n$$

Подставляя в приведенное выше выражение для x эти значения p_n и $p_{с.в}$, а также численные значения M_n и $M_{с.в}$, получим

$$x = \frac{18}{29} \cdot \frac{\varphi p_n}{P - \varphi p_n} = 0,622 \frac{\varphi p_n}{P - \varphi p_n} \quad (\text{XV,6})$$

Энтальпия I влажного воздуха относится к 1 кг абсолютно сухого воздуха и определяется при данной температуре воздуха t ($^\circ\text{C}$) как сумма энтальпий абсолютно сухого воздуха $c_{с.в}t$ и водяного пара $x i_n$ (дж/кг сухого воздуха)

$$I = c_{с.в}t + x i_n \quad (\text{XV,7})$$

где $c_{с.в}$ — средняя удельная теплоемкость абсолютно сухого воздуха, которая может быть принята приближенно равной $1000 \text{ дж/(кг}\cdot\text{град)}$ [$0,24 \text{ ккал/(кг}\cdot\text{град)}$]; i_n — энтальпия водяного пара.

Водяной пар находится в процессе сушки в перегретом состоянии в смеси с воздухом. Обозначим энтальпию водяного пара при 0°C через r_0 ($r_0 = 2493 \cdot 10^3 \text{ дж/кг}$) и примем среднюю удельную теплоемкость перегретого водяного пара $c_p \approx 1,97 \cdot 10^3 \text{ дж/(кг} \cdot \text{град)}$. Тогда энтальпия перегретого пара

$$i_p = r_0 + c_p t = 2493 \cdot 10^3 + 1,97 \cdot 10^3 t \quad (\text{XV,8})$$

Подставляя выражение i_p и значение $c_{с. в}$ в уравнение (XV,7), получим (в дж/кг сухого воздуха)

$$I = (1000 + 1,97 \cdot 10^3 x) t + 2493 \cdot 10^3 x \quad (\text{XV,9})$$

При использовании внесистемных единиц энтальпия влажного воздуха выражается соответственно следующим образом (в ккал/кг сухого воздуха):

$$I = (0,24 + 0,47x) t + 595x \quad (\text{XV,9a})$$

Кроме x , φ и I при расчетах процесса сушки необходимо знать плотность или обратную ей величину — удельный объем влажного воздуха. Плотность влажного воздуха $\rho_{\text{вл. в}}$ равна сумме плотностей абсолютно сухого воздуха $\rho_{с. в}$ и водяного пара ρ_p . Учитывая, что, согласно выражению (XV,5), плотность водяного пара $\rho_p = x \rho_{с. в}$, плотность влажного воздуха

$$\rho_{\text{вл. в}} = \rho_{с. в} + \rho_p = \rho_{с. в} (1 + x)$$

Плотность абсолютно сухого воздуха из уравнения состояния

$$\rho_{с. в} = \frac{M_{с. в} \rho_{с. в}}{RT} = \frac{29 \rho_{с. в}}{8314T} = \frac{P - p_p}{287T}$$

Подставляя значения $\rho_{с. в}$ и $x = 0,622 \frac{p_p}{P - p_p}$ [см. уравнение (XV,6)] в выражение для плотности влажного воздуха, находим

$$\rho_{\text{вл. в}} = \frac{P - p_p}{287T} \left(1 + 0,622 \frac{p_p}{P - p_p} \right) = \frac{P - p_p + 0,622 p_p}{287T}$$

или

$$\rho_{\text{вл. в}} = \frac{P - 0,378 p_p}{287T} \quad (\text{XV,10})$$

Из уравнения (XV,10) видно, что при данном внешнем давлении P плотность влажного воздуха является функцией парциального давления водяного пара p_p и температуры T . В процессе сушки воздух увлажняется (возрастает p_p) и охлаждается (уменьшается T). Снижение T оказывает относительно большее влияние на значение $\rho_{с. в}$ и, как следует из уравнения (XV,10), плотность воздуха при сушке увеличивается. При увлажнении воздуха содержание в нем водяного пара (обладающего меньшим молекулярным весом, чем сухой воздух) возрастает за счет снижения содержания сухого воздуха. Поэтому с увеличением влажности воздух становится легче.

3. $I-x$ -диаграмма влажного воздуха

Основные свойства влажного воздуха можно с достаточной для технических расчетов точностью определять при помощи $I-x$ -диаграммы, впервые разработанной Л. К. Рамзиным. Диаграмма $I-x$ (рис. XV-1) построена для постоянного давления $P = 745 \text{ мм рт. ст.}$ (около 99 кн/м^2), которое, по многолетним статистическим данным, можно считать среднегодовым для центральных районов СССР.

Диаграмма имеет угол 135° между осями координат, причем на оси ординат отложены в определенном масштабе энтальпии I , а на наклонной оси абсцисс — влагосодержания x , которые, для удобства пользования диаграммой, спроектированы на вспомогательную ось, перпендикулярную оси ординат. На диаграмме нанесены: 1) линии постоянного влагосодержания ($x = \text{const}$) — вертикальные прямые, параллельные оси ординат; 2) линии постоянной энтальпии ($I = \text{const}$) — прямые, параллельные

оси абсцисс, т. е. идущие под углом 135° к горизонту; 3) линии постоянных температур, или изотермы ($t = \text{const}$); 4) линии постоянной относительной влажности ($\varphi = \text{const}$); 5) линия парциальных давлений водяного пара p_n во влажном воздухе, значения которых отложены в масштабе на правой оси ординат диаграммы.

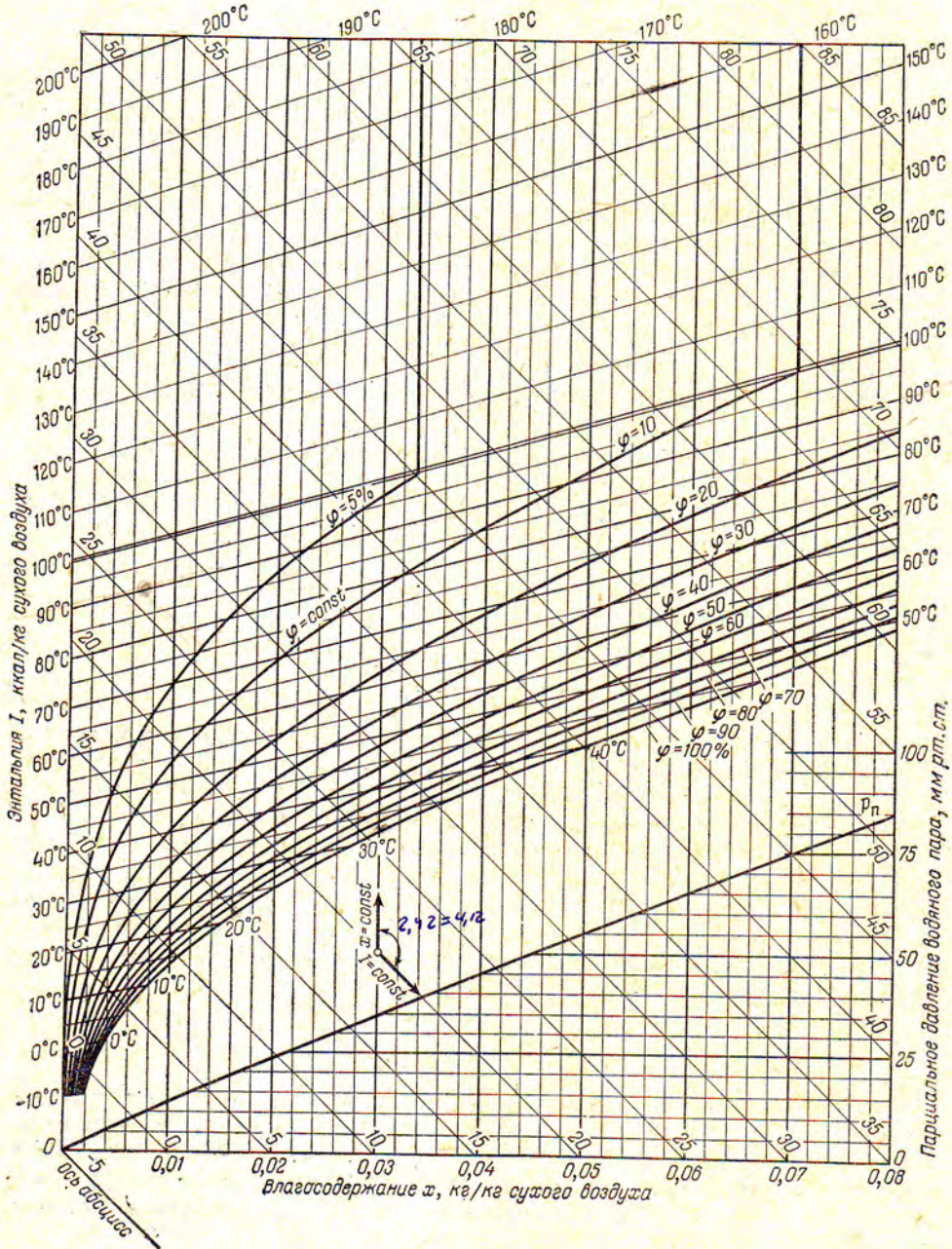


Рис. XV-1. Диаграмма I-x для влажного воздуха.

Линии $t = \text{const}$, $\varphi = \text{const}$ и p_n построены на диаграмме следующим образом.

Линии постоянных температур, или изотермы, выражающие зависимость I от x при $t = \text{const}$, строятся с помощью уравнения (XV,9). Задаваясь при данной температуре $t_1 = \text{const}$ двумя произвольными значениями x_1 и x_2 , вычисляют по уравнению (XV,9) соответствующее каждому x значение I . Полученные точки (x_1, I_1) и (x_2, I_2) наносят на диаграмму и проводят через них прямую, которая является изотермой $t_1 = \text{const}$. Наклон

изотерм несколько увеличивается с возрастанием температуры, так как теплоемкость водяного пара c_p , а следовательно, и $i_{п}$ [см. уравнение (XV,8)] при этом возрастает.

Линии постоянной относительной влажности построены с помощью уравнения (XV,6), выражающего зависимость между x и p_n при $\varphi = \text{const}$. Задаваясь при данном $\varphi_1 = \text{const}$ несколькими произвольными температурами t_1, t_2, t_3, \dots , для каждой из них находят по таблицам водяного пара соответствующее значение p_n и вычисляют отвечающее ему значение x по уравнению (XV,6). Точки с известными координатами $(t_1, x_1), (t_2, x_2), (t_3, x_3)$ и т. д. соединяют кривой, которая является линией $\varphi_1 = \text{const}$.

Линии $\varphi = \text{const}$ образуют пучок расходящихся кривых, выходящих из одной точки (не показанной на диаграмме) с координатами $t = -273^\circ\text{C}$ и $x = 0$. Для того чтобы линии $\varphi = \text{const}$ не подходили очень близко друг к другу, что затруднило бы пользование диаграммой $I-x$, последняя построена, как указывалось выше, в косоугольной системе координат. При температуре $99,4^\circ\text{C}$ давление насыщенного пара $p_n = B$, т. е. становится равным постоянному барометрическому давлению $B = 745 \text{ мм рт. ст.}$, для которого построена диаграмма.

В этом случае, согласно выражению (XV,4), величина $\varphi = p_n/B$ и уравнение (XV,6) принимает вид

$$x = 0,622 \frac{\varphi}{1 - \varphi} = 0,622 \frac{p_n}{B - p_n}$$

Следовательно, при температурах $t \geq 99,4^\circ\text{C}$ влажность φ не зависит от температуры и практически является величиной постоянной, так же как и влагосодержание воздуха x (при данном значении p_n и $B = \text{const}$). Поэтому при $t = 99,4^\circ\text{C}$ линии $\varphi = \text{const}$ имеют резкий перелом и идут почти вертикально вверх. Незначительное отклонение направления линий $\varphi = \text{const}$ от вертикального объясняется тем, что в этой области высоких температур несколько меняются параметры пара.

Линия $\varphi = 100\%$ соответствует насыщению воздуха водяным паром при данной температуре. Эта линия ограничивает снизу расположенную над ней рабочую площадь диаграммы, отвечающую не насыщенному влажному воздуху, используемому в качестве сушильного агента. Площадь диаграммы, расположенная под линией $\varphi = 100\%$, относится к воздуху, пересыщенному водяным паром, и для расчетов сушилок интереса не представляет.

Линия парциального давления водяного пара строится по уравнению

$$p_n = \frac{P_x}{0,622 + x}$$

Задаваясь произвольно различными значениями x , рассчитывают p_n и получают, согласно этому уравнению, прямую, идущую из начала координат. Парциальное давление водяного пара в воздухе с влагосодержанием x_1 определяют, проводя линию $x_1 = \text{const}$ до пересечения с линией парциальных давлений и затем проводя из точки пересечения горизонталь до правой оси ординат со шкалой p_n .

На диаграмме $I-x$ по любым двум известным параметрам влажного воздуха можно найти точку, характеризующую состояние воздуха, и определить все его остальные параметры.

Изображение процессов изменения состояния воздуха на диаграмме. При нагревании влажного воздуха в специальных теплообменниках — калориферах — его относительная влажность φ уменьшается, а влагосодержание x остается постоянным. Поэтому на диаграмме $I-x$ процесс нагрева воздуха изображают отрезком AB (рис. XV-2), проводя из точки, отвечающей начальному состоянию воздуха (t_0, x_0) , вертикальную линию $x = \text{const}$ вверх до пересечения с изотермой, отвечающей температуре нагрева воздуха t_1 .

Процесс охлаждения воздуха (имеющего начальную температуру t_1) при постоянном влагосодержании до его насыщения изображается вертикалью, проведенной из точки B (характеризующей начальное состоя-

ние охлаждаемого воздуха) вниз до пересечения с линией $\varphi = 100\%$ (отрезок BC). Точка пересечения линий $x = \text{const}$ и $\varphi = 100\%$ (точка C на рис. XV-2) характеризует состояние воздуха в результате его охлаждения при $x = \text{const}$ и называется точкой росы. Изотерма, проходящая через эту точку, определяет температуру точки росы t_p . Дальнейшее охлаждение воздуха ниже температуры точки росы (например, до температуры t_n) приводит к конденсации из него части влаги и соответственно — к уменьшению его влагосодержания от x_0 до x_n . На диаграмме процесс охлаждения насыщенного воздуха совпадает с линией $\varphi = 100\%$ (кривая CE).

При адиабатической сушке только за счет тепла, передаваемого материалу воздухом. При этом, если температура высушиваемого материала (а следовательно, и содержащейся в нем влаги) не изменяется и равна 0°C , то энтальпия воздуха после сушки I_2 будет равна его энтальпии перед сушкой I_1 , так как все тепло, отданное воздухом на испарение влаги, возвращается обратно в воздух с удаляющимися из материала парами. Одновременно понижается температура и увеличиваются влагосодержание и относительная влажность воздуха. Такой процесс носит название теоретического процесса сушки ($I_2 = I_1 = I = \text{const}$).

Для сушильной практики большое значение имеет понятие о теоретическом процессе адиабатического испарения в системе поверхность испарения—воздух. В этом процессе воздух только испаряет, а не нагревает влагу. Непосредственно над поверхностью испарения воды (а в равной степени и над поверхностью влажного материала в начальный период сушки) образуется слой насыщенного пара ($\varphi = 100\%$), находящегося в равновесии с водой. Температура влаги при этом имеет постоянное значение, равное температуре мокрого термометра t_m . Данная температура в процессе испарения не меняется, во время как температура воздуха, по мере его насыщения, все время понижается, приближаясь в пределе к температуре мокрого термометра (при $\varphi = 100\%$). Эту температуру, которую примет воздух в конце процесса насыщения, называют также температурой адиабатического насыщения. Если $t_m > 0$, то поступающая в воздух испаренная влага W вносит в него некоторое количество тепла Wct_m , поэтому адиабатический процесс охлаждения воздуха в этом случае происходит с повышением его энтальпии ($I_2 > I_1$). Если L — расход сухого воздуха на испарение, то

$$L(I_2 - I_1) = Wct_m$$

или

$$I_2 - I_1 = \frac{W}{L} ct_m$$

где c — теплоемкость воды.

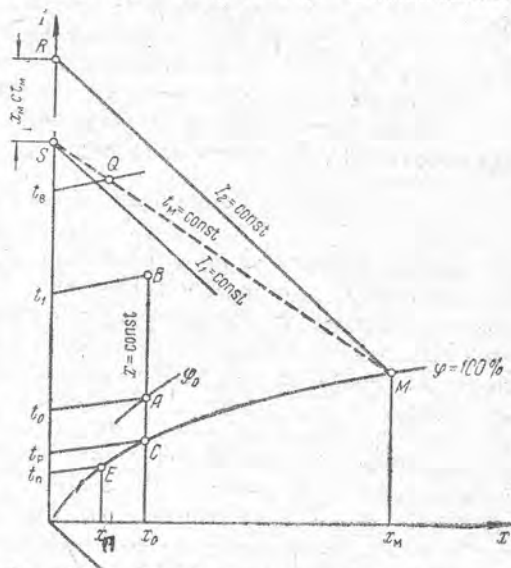


Рис. XV-2. Изображение процессов изменения состояния влажного воздуха на I-x-диаграмме.

Величина W/L показывает увеличение влагосодержания воздуха в процессе его адиабатического охлаждения, равное $(x_m - x_1)$, где x_m — влагосодержание воздуха при его полном насыщении влагой при температуре t_m .

Из найденной выше зависимости $I_1 = I_2 - (x_m - x_1) ct_m$ при $x_1 = 0$ следует:

$$I_1 = I_2 - x_m ct_m \quad (\text{XV,11})$$

Уравнение (XV,11) служит для нанесения на I - x -диаграмму линий адиабатического насыщения воздуха.

Если, например, из точки M (см. рис. XV-2) провести линию $I_2 = \text{const}$ до пересечения с осью ординат и отложить от точки пересечения R в масштабе, выбранном для энтальпий, отрезок, равный $x_m ct_m$, то полученная точка S и будет искомой, а прямая SM будет, очевидно, линией адиабатического насыщения воздуха. Эта линия называется иногда также линией постоянной температуры мокрого термометра ($t_m = \text{const}$) потому, что мокрый термометр, помещенный в воздух, насыщение которого происходит по линии адиабатического насыщения, будет показывать постоянную температуру t_m .

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.

Разность между температурой воздуха t_b и температурой мокрого термометра t_m характеризует способность воздуха поглощать влагу из материала и носит название потенциала сушки ε :

$$\varepsilon = (t_b - t_m) \quad (\text{XV,12})$$

Потенциал сушки характеризует скорость испарения влаги из материала, которая зависит от состояния воздуха и температуры процесса, т. е. определяется совместным влиянием тепло- и массообмена. Когда воздух полностью насыщается влагой ($t_b = t_m$), потенциал ε становится равным нулю.

Значение t_m определяют с помощью термометра, у которого резервуар со ртутью обернут влажной тканью («мокрый» термометр). По разности показаний обычного («сухого») термометра (температура которого равна температуре воздуха t_b) и мокрого термометра, пользуясь таблицами или номограммами, находят относительную влажность воздуха. Приборы, состоящие из сухого и мокрого термометров (психрометры), широко используются в сушильных установках.

Состояние воздуха (относительная влажность, влагосодержание, энтальпия и парциальное давление водяного пара) можно определить, пользуясь I - x -диаграммой, если известны t_b и t_m . Для этого находят точку M (см. рис. XV-2) как пересечение изотермы $t_m = \text{const}$ с линией $\varphi = 100\%$. Из точки M проводят прямую $t_m = \text{const}$ (линия постоянной температуры мокрого термометра) до пересечения с изотермой $t_b = \text{const}$. Искомая точка Q будет характеризовать состояние воздуха по заданным показаниям «сухого» (t_b) и «мокрого» (t_m) термометров психрометра. Для более точного определения характеристики воздуха необходимо ввести поправку на скорость движения воздуха в месте установки психрометра.

4. Равновесие при сушке

Если материал находится в контакте с влажным воздухом, то принципиально возможны два процесса: 1) сушка (десорбция влаги из материала) при парциальном давлении пара над поверхностью материала p_m , превышающим его парциальное давление в воздухе или газе p_n , т. е. при $p_m > p_n$; 2) увлажнение (сорбция влаги материалом) при $p_m < p_n$.

В процессе сушки давление p_m уменьшается и приближается к пределу $p_m = p_n$. При этом наступает состояние динамического равновесия, которому соответствует предельная влажность материала, называемая равновесной влажностью w_p .

Равновесная влажность зависит от парциального давления водяного пара над материалом p_n или пропорциональной ему величины относительной влажности воздуха φ [см. выражение (XV,3)] и определяется опытным путем.

Для этой цели навеска высушиваемого материала помещается в среду с различной относительной влажностью ϕ при $t = \text{const}$ и периодически взвешивается. Влажность материала при достижении им постоянной массы является равновесной. Обычно навески доводят до постоянной массы в эксикаторе с растворами серной кислоты различной концентрации и получают зависимость w_p от ϕ (рис. XV-3),

Зависимость $w_p = f(\phi)$ устанавливается при постоянной температуре t , таким образом, является изотермой. Кривая 1 на рис. XV-3 получена при испарении (десорбции) влаги из материала, т. е. при его сушке, и называется *изотермой десорбции*. Вышерасположенная кривая 2, полученная при обратном процессе — увлажнении высушенного материала, — называется *изотермой сорбции*.

Расхождение кривых 1 и 2 (гистерезис) указывает на то, что для достижения одной и той же равновесной влажности величина ϕ воздуха при увлажнении материала должна быть больше, чем при сушке последнего. Вероятной причиной гистерезиса является попадание воздуха в капилляры высушенного материала и его сорбция стенками капилляров. В результате этого при последующем увлажнении материала уменьшается его смачиваемость влагой и для вытеснения воздуха из капилляров требуется большее парциальное давление водяного пара или большая величина ϕ (изотерма сорбции 2 расположена выше изотермы 1).

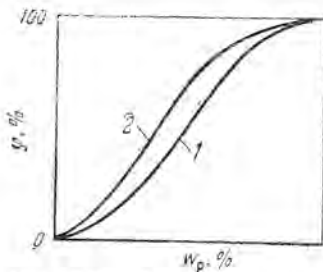


Рис. XV-3. Зависимость равновесной влажности материала от относительной влажности воздуха:

1 — изотерма десорбции; 2 — изотерма сорбции.

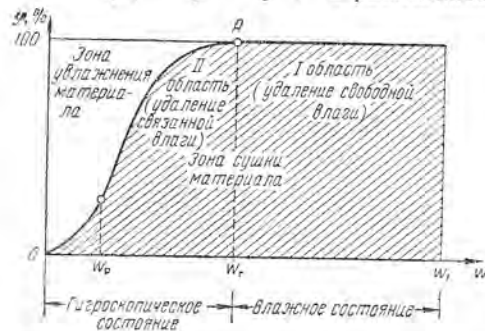


Рис. XV-4. Изменение влажности материала в процессе сушки.

Формы связи влаги с материалом. Механизм процесса сушки в значительной степени определяется формой связи влаги с материалом: чем прочнее эта связь, тем труднее протекает процесс сушки. При сушке связь влаги с материалом нарушается.

П. А. Ребиндером предложена следующая классификация форм связи влаги с материалом: физико-химическая, физико-химическая и физико-химическая.

Химически связанная влага наиболее прочно соединена с материалом в определенных (стехиометрических) соотношениях и может быть удалена только при нагревании материала до высоких температур или в результате проведения химической реакции. Эта влага не может быть удалена из материала при сушке.

В процессе сушки удаляется, как правило, только влага, связанная с материалом физико-химически и механически. Наиболее легко может быть удалена механически связанная влага, которая, в свою очередь, подразделяется на влагу макрокапилляров и микрокапилляров (капилляров со средним радиусом приблизительно больше и меньше 10^{-5} см). Макрокапилляры заполняются влагой при непосредственном соприкосновении ее с материалом, в то время как в микрокапилляры влага поступает как при непосредственном соприкосновении, так и в результате поглощения ее из окружающей среды. Влага макрокапилляров свободно удаляется не только сушкой, но и механическими способами.

Физико-химическая связь объединяет два вида влаги, отличающихся прочностью связи с материалом: адсорбционной и осмоти-

чески связанную влагу. Первая прочно удерживается на поверхности и в порах материала. Осмотически связанная влага, называемая также влагой набухания, находится внутри клеток материала и удерживается осмотическими силами. Адсорбционная влага требует для своего удаления значительно большей затраты энергии, чем влага набухания. Присутствие этих видов влаги особенно характерно для коллоидных и полимерных материалов.

Применительно к процессу сушки влагу материала классифицируют в более широком смысле на свободную и связанную. Под свободной понимают влагу, скорость испарения которой из материала равна скорости испарения воды со свободной поверхности. Следовательно, при наличии в материале свободной влаги $p_m = p_n$, где p_n — давление насыщенного пара воды над ее свободной поверхностью. Под связанной понимают влагу, скорость испарения которой из материала меньше скорости испарения воды со свободной поверхности $p_m < p_n$.

Влажность материала и изменение его состояния в процессе сушки. Влажность материала может быть рассчитана по отношению к его общей массе G или по отношению к массе находящегося в нем абсолютно сухого вещества G_c , причем

$$G = G_c + G_{вл}$$

где $G_{вл}$ — масса содержащейся в материале влаги.

Влажность, отнесенная к общему количеству материала (в %):

$$\omega = \frac{G_{вл}}{G} 100 \quad (\text{XV},13)$$

Влажность, отнесенная к количеству абсолютно сухого материала (в %):

$$\omega^c = \frac{G_{вл}}{G_c} 100 \quad (\text{XV},14)$$

Масса абсолютно сухого материала не меняется в процессе сушки, и для упрощения расчетов обычно пользуются величинами ω^c . Влажность, отнесенная к массе абсолютно сухого материала ω^c , и влажность, рассчитанная на его общую массу ω , связаны между собой зависимостью (в %):

$$\omega^c = \frac{\omega}{100 - \omega} 100 \quad (\text{XV},15)$$

или

$$\omega = \frac{\omega^c}{100 + \omega^c} 100 \quad (\text{XV},15a)$$

Рассмотрим изменение состояния материала в процессе сушки (рис. XV-4). При изменении влажности от ω_1 до ω_r материал содержит свободную влагу ($p_m = p_n$) и находится во влажном состоянии. При изменении влажности от ω_r до ω_p материал содержит связанную влагу ($p_m < p_n$) и находится в гигроскопическом состоянии. Точка A называется гигроскопической, а соответствующая ей влажность ω_r — гигроскопической влажностью. Так же как и во всей области влажного состояния, в точке A , соответствующей $\varphi = 100\%$, $p_m = p_n$.

Гигроскопическая влажность ω_r находится на границе свободной и связанной влаги в материале. Свободная влага будет удаляться из материала при любой относительной влажности окружающей среды меньше 100% ($\varphi < 100\%$). Удаление связанной влаги возможно лишь при той относительной влажности окружающей среды, которой соответствует влажность материала, большая равновесной. На рис. XV-4 вся область, где материал может сушиться, заштрихована. При гигроскопическом состоянии материала, отвечающем области над кривой равновесной влажности, возможно только увлажнение материала, но не его сушка.

5. Материальный и тепловой балансы сушки

Материальный баланс сушки. Баланс по высушиваемому материалу является общим для конвективной, контактной и других видов сушки.

Для составления баланса обозначим:

G_1 — масса влажного материала, поступающего на сушку, кг/ч;

G_2 — масса высушенного материала, кг/ч;

ω_1 и ω_2 — начальная и конечная влажность материала соответственно (считая на общую массу материала), %;

W — масса влаги, удаляемой из материала при сушке, кг/ч.

Тогда материальный баланс будет иметь следующий вид: по всему материалу, подвергаемому сушке

$$G_1 = G_2 + W \quad (\text{XV},16)$$

по абсолютно сухому веществу в высушиваемом материале

$$G_1 \frac{100 - \omega_1}{100} = G_2 \frac{100 - \omega_2}{100} \quad (\text{XV},17)$$

Из уравнения (XV,17) следует:

$$G_1 = G_2 \frac{100 - \omega_2}{100 - \omega_1} \quad (\text{XV},18)$$

и

$$G_2 = G_1 \frac{100 - \omega_1}{100 - \omega_2} \quad (\text{XV},19)$$

Обычно целью составления материального баланса является определение массы влаги W , удаляемой при сушке. Из уравнения (XV,16) находим

$$W = G_1 - G_2 \quad (\text{XV},20)$$

Подставляя в выражение (XV,20) значение G_2 из уравнения (XV,19), получим

$$W = G_1 - G_1 \frac{100 - \omega_1}{100 - \omega_2} = G_1 \frac{\omega_1 - \omega_2}{100 - \omega_2} \quad (\text{XV},21)$$

При подстановке в выражение (XV,20) значения G_1 по уравнению (XV,18) определим массу удаляемой влаги:

$$W = G_2 \frac{\omega_1 - \omega_2}{100 - \omega_1} \quad (\text{XV},21a)$$

Если значение W известно, то из уравнения (XV,21a) можно определить значение G_2 .

Уравнения (XV,21) и (XV,21a) являются основными уравнениями материального баланса процессов сушки.

Влажность материала часто бывает удобно выражать по отношению к массе не всего материала, а к массе содержащегося в нем сухого вещества. В этом случае, пользуясь зависимостью (XV,15), заменяют величины ω_1 и ω_2 в уравнении (XV,21) на ω_1^c и ω_2^c соответственно. При этом получим

$$W = G_1 \frac{\omega_1^c - \omega_2^c}{100 + \omega_1^c} = G_2 \frac{\omega_1^c - \omega_2^c}{100 + \omega_2^c} \quad (\text{XV},22)$$

При расчете конвективных сушилок помимо баланса по высушиваемому материалу составляется материальный баланс по влаге, из которого находят расход сухого воздуха на сушку.

Рассмотрим основную схему процессов конвективной сушки на примере воздушной сушилки, в которой воздух нагревается только в подогревателе (калорифере) перед сушилкой и однократно проходит через сушилку. Принцип устройства такой сушилки соответствует схеме на рис. XV-5 при условии, что отсутствует дополнительный подогреватель воздуха, показанный на рисунке.

Пусть на сушку поступает воздух с влажностью x_0 кг/кг сухого воздуха, причем расход абсолютно сухого воздуха составляет L кг/ч. Из сушилки (при отсутствии потерь воздуха) выходит такое же количество абсолютно сухого воздуха, а влажность меняется до x_2 кг/кг сухого воздуха. Масса влаги, испаряющейся из материала в сушилке, составляет W кг/ч. Тогда материальный баланс по влаге будет иметь вид:

$$Lx_0 + W = Lx_2$$

Из уравнения баланса определяем расход абсолютно сухого воздуха на сушку

$$L = \frac{W}{x_2 - x_0} \quad (\text{XV,23})$$

Удельный расход воздуха на испарение из материала l кг влаги равен соответственно

$$l = \frac{L}{W} = \frac{1}{x_2 - x_0} \quad (\text{XV,24})$$

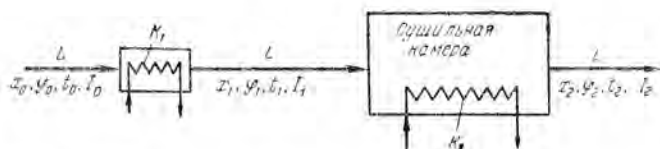


Рис. XV-5. Принципиальная схема конвективной сушилки непрерывного действия (основной вариант процесса сушки).

Обозначим влажность воздуха, нагретого в калорифере и поступающего в сушилку, через x_1 кг/кг сухого воздуха. Проходя через калорифер, воздух не поглощает и не отдает влаги, поэтому его влажность остается постоянным, т. е. $x_1 = x_0$. Соответственно уравнения (XV,23) и (XV,24) могут быть записаны в виде

$$L = \frac{W}{x_2 - x_1} \quad (\text{XV,23a})$$

и

$$l = \frac{1}{x_2 - x_1} \quad (\text{XV,24a})$$

Следует иметь в виду, что влажность наружного воздуха x_0 в среднем летом выше, чем зимой. Величина x_0 входит как вычитаемое в знаменатель правой части уравнения (XV,24). Следовательно, расчет удельного расхода воздуха (и соответственно подбор калориферов для его нагрева) надо вести по наибольшей величине x_0 в летних условиях для того географического пункта, в котором должна работать сушилка. Средние статистические данные о значениях x_0 в летнее и зимнее время года для различных городов СССР приводятся в справочных таблицах.

Тепловой баланс сушилок. Рассмотрим тепловые балансы наиболее распространенных конвективных и контактных сушилок.

Конвективные сушилки. Для составления типового теплового баланса конвективной сушилки воспользуемся ее общей схемой, приведенной на рис. XV-5.

Пусть на сушку поступает G_1 кг/ч исходного материала, имеющего температуру θ_1 °С. В сушилке из материала испаряется W кг/ч влаги и из сушилки удаляется G_2 кг/ч высушенного материала при температуре θ_2 °С. Обозначим удельную теплоемкость высушенного материала c_m дж/(кг·град) и теплоемкость влаги c_v дж/(кг·град) [для воды $c_v = 4,19$ кдж/(кг·град) или 1 ккал/(кг·град)].

В сушилку подается влажный воздух (сушильный агент), содержащий L кг/ч абсолютно сухого воздуха. Перед калорифером воздух имеет энтальпию I_0 дж/кг сухого воздуха, после нагрева; т. е. на входе в сушилку,

энтальпия воздуха повышается до I_1 дж/кг сухого воздуха. В процессе сушки в результате передачи тепла материалу, поглощения испаряющейся из материала влаги и потерь тепла в окружающую среду энтальпия воздуха изменяется и на выходе из сушилки энтальпия отработанного воздуха равна I_2 дж/кг сухого воздуха.

При составлении теплового баланса следует учитывать, что в сушилке могут быть транспортные устройства, на которых находится высушиваемый материал (например, вагонетки и т. п.). Пусть масса этих устройств G_T кг, удельная теплоемкость их материала c_T дж/(кг·град), температура на входе в сушилку $t_{ТН}$. В сушилке температура транспортных устройств возрастает и достигает $t_{ТК}$ на выходе из сушилки.

Согласно схеме (см. рис. XV-5), тепло подводится в калорифер K_1 , установленный перед сушилкой (Q_K), и в дополнительный калорифер K_2 внутри камеры сушилки (в количестве Q_D). Тогда с учетом потерь тепла сушилкой в окружающую среду Q_P имеем:

Приход тепла		Расход тепла	
С наружным воздухом	LI_0	С отработанным воздухом	LI_2
С влажным материалом * с сухим материалом	$G_2 c_M \theta_1$	С высушенным материалом	$G_2 c_M \theta_2$
с влагой, испаряемой из материала	$W c_B \theta_1$	С транспортными устройствами	$G_T c_T t_{ТК}$
С транспортными устройствами	$G_T c_T t_{ТН}$	Потери тепла в окружающую среду	Q_P
В основном (внешнем) калорифере	Q_K		
В дополнительном (внутреннем) калорифере	Q_D		

При установившемся процессе сушки тепловой баланс выражается равенством

$$LI_0 + G_2 c_M \theta_1 + W c_B \theta_1 + G_T c_T t_{ТН} + Q_K + Q_D = LI_2 + G_2 c_M \theta_2 + G_T c_T t_{ТК} + Q_P$$

Из этого уравнения можно определить общий расход тепла ($Q_K + Q_D$) на сушку:

$$Q_K + Q_D = L(I_2 - I_0) + G_2 c_M (\theta_2 - \theta_1) + G_T c_T (t_{ТК} - t_{ТН}) - W c_B \theta_1 + Q_P$$

Разделив обе части последнего равенства на W , получим выражение для удельного расхода тепла (на 1 кг испаренной влаги):

$$q_K + q_D = l(I_2 - I_0) + q_M + q_T - c_B \theta_1 + q_P \quad (XV,25)$$

В уравнении (XV,25): $l(I_2 - I_0)$ — количество тепла (с учетом всех видов его прихода и расхода), приходящегося на 1 кг испаренной влаги; $q_M = G_2 c_M (\theta_2 - \theta_1) / W$ — удельный расход тепла на нагрев высушенного материала; $q_T = G_T c_T (t_{ТК} - t_{ТН}) / W$ — удельный расход тепла на нагрев транспортных устройств; $c_B \theta_1$ — энтальпия 1 кг влаги, поступающей в сушилку и испаряемой из материала; $q_P = Q_P / W$ — удельные потери тепла сушилкой в окружающую среду.

Удельный расход тепла в основном (внешнем) калорифере можно также представить в виде

$$q_K = l(I_1 - I_0) \quad (XV,26)$$

Подставляя значение q_K в уравнение (XV,25), находим

$$l(I_1 - I_0) + q_D = l(I_2 - I_0) + q_M + q_T - c_B \theta_1 + q_P$$

или

$$l(I_2 - I_1) = q_D + c_B \theta_1 - q_M - q_T - q_P \quad (XV,27)$$

Обозначив правую часть уравнения (XV,27)

$$(q_D + c_B \theta_1) - (q_M + q_T + q_P) = \Delta \quad (XV,28)$$

* Тепло, вносимое исходным влажным материалом, в тепловом балансе рассматривается как сумма теплот, вносимых высушенным материалом и испаряемой влагой.

запишем его в следующей форме:

$$l(I_2 - I_1) = \Delta \quad (\text{XV}, 29)$$

$$I_2 = I_1 + \frac{\Delta}{l} \quad (\text{XV}, 29a)$$

Входящая в уравнение величина Δ выражает разность между приходом и расходом тепла непосредственно в камере сушилки, без учета тепла, приносимого и уносимого воздухом, нагретым в основном калорифере. Величину Δ часто называют внутренним балансом сушильной камеры.

Подставляя в уравнение (XV,29) значение l из уравнения (XV,24), получим

$$\frac{I_2 - I_1}{x_2 - x_0} = \frac{I_2 - I_1}{x_2 - x_1} = \Delta \quad (\text{XV}, 30)$$

Для анализа и расчета процессов сушки удобно ввести понятие о теоретической сушилке, в которой температура материала, поступающего на сушку, равна нулю, нет расхода тепла на нагрев материала и транспортных устройств, нет дополнительного подвода тепла в самой сушильной камере и потерь тепла в окружающую среду. Следовательно, для теоретической сушилки

$$q_d = c_a \theta_1 = q_m = q_r = q_n = 0 \quad (\text{XV}, 31)$$

и, согласно выражению (XV,28)

$$\Delta = 0$$

При этом в соответствии с уравнением теплового баланса (XV,29a) при $l \neq 0$ для теоретической сушилки

$$I_1 = I_2 \quad (\text{XV}, 32)$$

Рис. XV-6. Принципиальная схема контактной сушилки непрерывного действия.

т. е. процесс сушки в такой сушилке изображается на $I-x$ -диаграмме линией $I = \text{const}$. Это означает, что испарение влаги в теоретической сушилке происходит только за счет охлаждения воздуха, причем количество тепла, передаваемого воздухом, полностью возвращается в него с влагой, испаряемой из материала.

В действительных сушилках энтальпия воздуха в сушильной камере обычно не остается постоянной. Если приход тепла в камеру сушилки ($q_d + c_a \theta_1$) больше его расхода ($q_m + q_r + q_n$), т. е. значение Δ положительно [см. уравнение (XV,28)], то в соответствии с уравнением (XV,29a) энтальпия воздуха при сушке возрастает ($I_2 > I_1$). При отрицательном значении Δ энтальпия воздуха в процессе сушки уменьшается и $I_2 < I_1$.

В частном случае в действительной сушилке возможны условия, при которых отдельные члены правой части уравнения (XV,27) хотя и не равны нулю, как для теоретической сушилки, но вследствие того, что приход тепла в сушильную камеру равен его расходу

$$q_d + c_a \theta_1 = q_m + q_r + q_n \quad (\text{XV}, 33)$$

значение Δ также будет равно нулю и процесс сушки в действительных условиях равнозначен процессу в теоретической сушилке.

Контактные сушилки. Как указывалось, при контактной сушке тепло, необходимое для испарения влаги, передается материалу не путем непосредственного контакта его с движущимся горячим воздухом (или газом), а через стенку, отделяющую материал от теплоносителя. В качестве теплоносителя при контактной сушке обычно используют насыщенный водяной пар. Поэтому тепловой баланс непрерывнодействующей контактной сушилки (рис. XV-6) будет отличаться от соответствующего баланса для конвективной сушилки.

В дополнение к обозначениям, введенным ранее (см. стр. 524), примем, что расход греющего пара составляет D кг/ч, его энтальпия I_{Γ} дж/кг, температура конденсации T °C и энтальпия паров, образовавшихся из влаги материала, i_B дж/кг.

Рассмотрим статьи прихода и расхода тепла в сушилке:

Приход тепла		Расход тепла	
С греющим паром	DI_{Γ}	С конденсатом греющего пара	$Dc_B T$
С влажным материалом с высушенным материалом	$G_2 c_M \theta_1$	С высушенным материалом	$G_2 c_M \theta_2$
с влагой, испаряемой из материала	$W c_B \theta_1$	С испаренной из материала влагой	$W i_B$
		Потери тепла в окружающую среду	Q_{Π}

Тепловой баланс контактной сушилки:

$$DI_{\Gamma} + G_2 c_M \theta_1 + W c_B \theta_1 = D c_B T + G_2 c_M \theta_2 + W i_B + Q_{\Pi}$$

или

$$D(I_{\Gamma} - c_B T) = G_2 c_M (\theta_2 - \theta_1) + W (i_B - c_B \theta_1) + Q_{\Pi} \quad (XV.34)$$

Из последнего выражения может быть определен расход пара D , тепло которого затрачивается на нагрев высушенного материала [$G_2 c_M (\theta_2 - \theta_1)$], на испарение влаги [$W (i_B - c_B \theta_1)$] и компенсацию потерь тепла в окружающую среду (Q_{Π}).

При проведении периодических процессов сушки тепловой баланс составляется отдельно для стадий нагревания и сушки. При этом за расчетный принимается больший из расходов пара, полученных для каждой стадии.

6. Определение расходов воздуха и тепла на сушку

К числу основных задач технологического расчета конвективных сушилок относится определение расходов воздуха (газа) и тепла на сушку. Эти величины могут быть найдены как чисто аналитическим, так и графоаналитическим путем (с помощью изображения процесса на $I-x$ -диаграмме). Расчет сушилок с использованием $I-x$ -диаграммы нагляден и дает достаточно точные для практических целей результаты. Кроме того, он значительно менее трудоемок, чем аналитический, и поэтому широко используется в инженерной практике. Аналитический расчет применяется лишь в отдельных случаях, например при необходимости уточнить результаты расчета в случае малых перепадов температур и влагодержаний сушильного агента.

Графоаналитический расчет. Рассмотрим изображение процесса сушки в теоретической сушилке (рис. XV-7, а). Для расчета должны быть известны два любых параметра наружного воздуха; обычно такими параметрами являются его температура t_0 и относительная влажность φ_0 . По пересечению линий $t_0 = \text{const}$ и $\varphi_0 = \text{const}$ находят точку A , характеризующую состояние воздуха перед калорифером. Из точки A проводят вертикаль до пересечения с изотермой $t_1 = \text{const}$, где t_1 — температура воздуха после калорифера, которая должна быть задана. Точка пересечения B характеризует состояние нагретого воздуха перед входом в сушильную камеру. Вертикальный отрезок AB изображает процесс нагрева воздуха в калорифере, протекающий при $x_0 = x_1 = \text{const}$ (x_1 — влагосодержание нагретого воздуха).

Из точки B проводят линию I_1 , которой изображается адиабатический процесс изменения состояния воздуха в сушилке. Кроме значений x_0 , φ_0 и t_1 , при расчете должен быть задан один из параметров отработанного воздуха — обычно t_2 или φ_2 . Поэтому, продолжая линию $I_1 = \text{const}$ до пересечения с изотермой $t_2 = \text{const}$ или линией $\varphi_2 = \text{const}$, получают точку C , выражающую состояние отработанного воздуха на выходе из сушилки. Отрезок BC , параллельный оси абсцисс ($I_1 = I_2 = \text{const}$), изображает охлаждение воздуха в процессе сушки.

Ломаная линия ABC — графическое изображение всего процесса изменения состояния воздуха в теоретической сушилке (в калорифере и сушильной камере), работающей по основной схеме.

Завершив построение, для точек A и C находят на диаграмме значения $x_0 = x_1$ и x_2 [для расчета удельного расхода воздуха по уравнению (XV,24)] и для точек B и A — значения I_1 и I_0 , с помощью которых по уравнению (XV,26) определяют удельный расход тепла q_k в основном калорифере. Умножив величины I и q_k на W , находят расходы воздуха L и тепла Q на сушку.

Удельные расходы сухого воздуха и тепла в калорифере можно также определить графически по диаграмме $I-x$. Для этого из точки C (см. рис. XV-7, а) опускают перпендикуляр на линию AB до пересечения в точке D . Отрезок CD характеризует разность влагосодержаний ($x_2 - x_0$), или ($x_2 - x_1$). Пользуясь отрезками AB и CD , измеренными на диаграмме, находят удельные расходы воздуха $l = 1/CD m_x$ и тепла в калорифере:

$$q_k = \frac{m_1 AB}{m_x CD} \quad \text{или} \quad q_k = M \frac{AB}{CD}$$

где M — отношение принятых для данной диаграммы масштабов по осям энтальпий m_1 и влагосодержаний m_x .

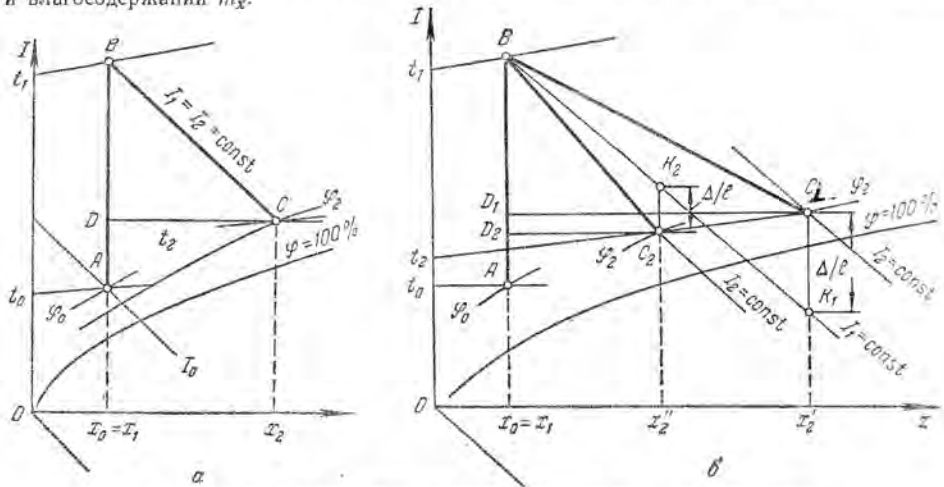


Рис. XV-7. Изображение процессов сушки на $I-x$ -диаграмме:
а — теоретическая сушилка; б — действительная сушилка.

Для изображения процесса в действительной сушилке из точки A , характеризующей состояние воздуха перед калорифером, проводят вертикаль до пересечения с заданной изотермой $t_1 = \text{const}$ — точка B . В уравнении (XV,30) координаты конечной точки (x_2, I_2) можно заменить на текущие координаты (x, I) для некоторой произвольно выбранной точки ϵ , лежащей на прямой линии процесса в сушильной камере действительной сушилки. Тогда

$$\frac{I - I_1}{x - x_1} = \Delta \quad (\text{XV,35})$$

В уравнении (XV,35) неизвестными являются лишь величины I и x . Задаясь значением x (или I) по уравнению (XV,35) можно вычислить значение величины I (или x) и таким образом найти координаты точки ϵ (x, I). Соединяя точки ϵ и B и продолжая отрезок $B\epsilon$ до пересечения с заданным параметром отработанного воздуха (например, с линией $\phi_2 = \text{const}$), находят точку C_1 (при $\Delta > 0$) или C_2 (при $\Delta < 0$), выражающую состояние отработанного воздуха. Для этой точки (C_1 или C_2) находят величину x_2 [для определения удельного расхода воздуха по уравнению (XV,24)]. Опуская из точки C_1 или C_2 перпендикуляр на вертикаль AB , будем иметь соответственно отрезок C_1D_1 или C_2D_2 , характеризующий увеличение влагосодержания воздуха в сушильной камере в условиях действительного процесса.

При известных параметрах наружного воздуха (обычно t_0 и φ_0) расчет сушилок возможен и в том случае, если температура нагрева воздуха t_1 не задана в явном виде, а известны какие-либо два параметра отработанного воздуха (например, t_2 и φ_2). В этом случае построение процесса начинают от заданной точки (C , C_1 или C_2).

Для теоретической сушилки (см. рис. XV-7, а) из заданной точки C проводят линию $I_1 = I_2 = I = \text{const}$ до пересечения с вертикалью $x_0 = \text{const}$ в точке B , через которую и проходит искомая изотерма $t_1 = \text{const}$.

Построение процесса для действительной сушилки также начинают от заданной точки C_1 (при $\Delta > 0$), от которой откладывают вниз (в масштабе энтальпий) отрезок $C_1K_1 = \Delta/l = \Delta(x_2' - x_0)/m_1$ (рис. XV-7, б) и через полученную точку K_1 проводят линию $I_1 = \text{const}$ до пересечения с линией $x_0 = \text{const}$ в точке B . Через эту точку будет проходить искомая изотерма $t_1 = \text{const}$. Точку B , характеризующую состояние воздуха при поступлении в сушильную камеру, соединяют с точкой C_1 . Линия ABC_1 изображает процесс в действительной сушилке при $\Delta > 0$, когда изменение состояния воздуха в сушильной камере происходит с повышением энтальпии ($I_2 > I_1$). Как видно из рис. XV-7, в этом случае линия BC_1 , характеризующая изменение состояния воздуха в сушильной камере, проходит более полого, чем линия $I_1 = \text{const}$ для теоретической сушилки.

При $\Delta < 0$, когда изменение состояния воздуха в сушильной камере происходит с понижением энтальпии ($I_2 < I_1$), отрезок $C_2K_2 = \Delta/l = \Delta(x_2'' - x_0)/m_1$ откладывают вверх от заданной точки C_2 (см. рис. XV-7, б). Через полученную точку K_2 проводят линию $I_1 = \text{const}$ до пересечения с линией $x_0 = \text{const}$ в точке B . В этом случае (при $\Delta < 0$) прямая BC_2 проходит более круто, чем $I_1 = \text{const}$, что указывает на понижение энтальпии воздуха в сушильной камере ($I_1 > I_2$).

Удельные расходы сухого воздуха l и тепла на калорифер q_k определяют так же, как это указывалось выше.

Аналитический расчет. Определение расходов воздуха и тепла на сушку возможно также чисто аналитическим способом — с помощью уравнения теплового баланса (XV,30). Для расчета должны быть известны основные параметры (t_0 и φ_0) воздуха, поступающего в калорифер. Температура воздуха, выходящего из калорифера, t_1 принимается не выше допустимой для данного материала температуры сушки. Значения x_0 (равное x_1) и I_1 вычисляют по формулам (XV,6) и (V,9) соответственно.

Одним из параметров отработанного воздуха (t_2 или φ_2) при расчете необходимо задаться. Если задана температура t_2 , то по уравнению (XV,9) находят энтальпию отработанного воздуха I_2 в виде функции от пока неизвестного его влагосодержания x_2 . Подставляя полученное выражение I_2 в уравнение (XV,30), решают его относительно x_2 :

$$x_2 = \frac{1000t_2 + \Delta x_1 - I_2}{\Delta - 1,97 \cdot 10^3 t_2 - 2493 \cdot 10^3} \quad (\text{XV,36})$$

Рассчитав x_2 по уравнению (XV,9), определяют I_2 . Теперь можно рассчитать удельные расходы воздуха [по уравнению (XV,24)] и тепла [по уравнению (XV,26)]. Если же значение t_2 неизвестно и задана относительная влажность отработанного воздуха φ_2 , то, приравняв выражения x_2 по уравнениям (XV,36) и (XV,6), получим

$$\frac{1000t_2 + \Delta x_1 - I_2}{\Delta - 1,97 \cdot 10^3 t_2 - 2493 \cdot 10^3} = 0,622 \frac{\varphi_2 p_n''}{p - \varphi_2 p_n''} \quad (\text{XV,37})$$

где p_n'' — давление насыщенного водяного пара в отработанном воздухе.

Задавая произвольно температурой t_2 , по справочным таблицам находят соответствующее давление p_n'' . Подставляя это значение p_n'' в уравнение (XV,37), рассчитывают его правую и левую части, которые должны быть равны друг другу. В случае несовпадения их численных значений снова задаются t_2 и, таким образом, подбором определяют истинное значение t_2 .

7. Варианты процесса сушки

При определенном сочетании свойств сушильного агента (t и φ) и скорости его движения относительно материала (v) достигается тот или иной режим сушки в конвективной сушилке. Кроме этих факторов на режим сушки влияет также давление, если оно значительно отклоняется от атмосферного (сушка под вакуумом). Для обеспечения заданных режимов сушки используют различные варианты процесса сушки.

В сушилке основного варианта, т. е. работающей по основной схеме (см. рис. XV-5), создаются жесткие условия сушки. Это объясняется тем, что все тепло, необходимое для испарения влаги из материала, подводится однократно (в наружном калорифере) и воздух нагревается сразу до относительно высокой температуры t_1 , являющейся обычно предельно допустимой для высушиваемого материала. При превышении этой тем-

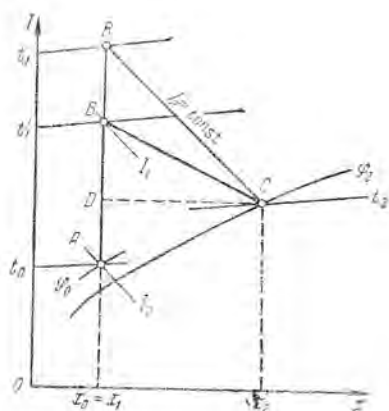
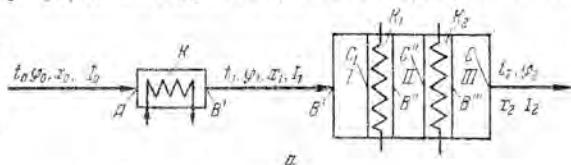


Рис. XV-8. Изображение теоретического процесса сушки с частичным подогревом воздуха в сушильной камере на $I-x$ -диаграмме.

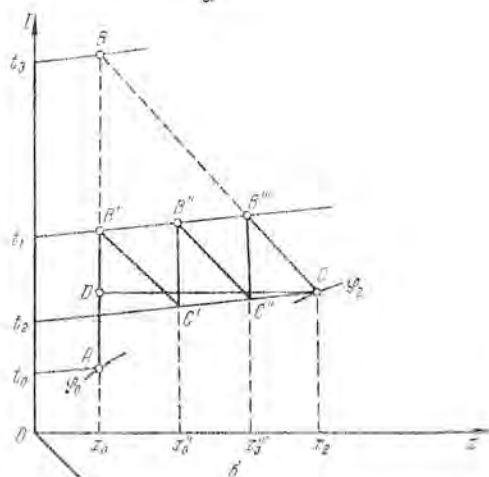


Рис. XV-9. Сушилка с промежуточным подогревом воздуха по зонам:
а — принципиальная схема; б — изображение теоретического процесса на $I-x$ -диаграмме.

пературы возможно разложение материала или ухудшение его качества. При нагреве в калорифере влагосодержание воздуха остается неизменным и резко падает его относительная влажность. Поэтому сушка по основной схеме происходит при значительном перепаде температур $t_1 - t_0$, в атмосфере воздуха с малым x и низким значением φ .

В ряде случаев материалы требуют сушки в более мягких условиях: во влажном воздухе и при более низких температурах. Для этой цели в сушильной технике широко применяют различные варианты процесса сушки.

Сушка с частичным подогревом воздуха в сушильной камере. В этом процессе во внешнем калорифере K_1 (рис. XV-5) воздуху сообщается лишь часть тепла, а другая часть передается с помощью дополнительного калорифера K_2 , установленного в сушильной камере.

Для простоты на диаграмме $I-x$ (рис. XV-8) изображен процесс в теоретической сушилке, работающей по этому варианту. Из диаграммы видно, что воздух нагревается во внешнем калорифере до температуры t_1 , допускаемой свойствами материала (вертикаль AB'), испарение влаги из материала изображается линией $B'C$. Весь процесс в сушилке представлен на диаграмме ломаной $AB'C$.

Общее количество тепла на нагрев воздуха складывается в данном случае из тепла, подводимого в основном (внешнем) калорифере q_k , и тепла, подводимого в дополнительном калорифере q_d :

$$q_k + q_d = \frac{I_1 - I_0}{x_2 - x_0} + \frac{I_2 - I_1}{x_2 - x_0} = \frac{AB'}{DC} \cdot \frac{m_f}{m_x} + \frac{B'B}{DC} \cdot \frac{m_f}{m_x}$$

или

$$q_k + q_d = \frac{(AB' + B'B)}{DC} \cdot \frac{m_f}{m_x} = \frac{AB}{DC} \cdot M \quad (\text{XV, 38})$$

где M — отношение масштабов диаграммы.

При данном суммарном удельном расходе тепла ($q_k + q_d$) отношение между значениями q_k и q_d может меняться, что будет соответствовать перемещению точки B' между точками A и B по линии $x_0 = x_1 = \text{const}$. Однако, как видно из выражения (XV,38) и рис. XV-8, общие расходы воздуха и тепла в сушилке будут те же, что и в сушилке основной схемы, работающей при тех же начальных и конечных параметрах воздуха (ломаная ABC). Эти расходы составляют соответственно

$$L = \frac{W}{DCm_x} \quad \text{и} \quad Q = W \frac{AB}{DC} M$$

Таким образом, достоинство описанного варианта сушки состоит в том, что в камеру сушилки подводится воздух, нагретый до более низкой температуры, чем по основной схеме сушки. Это позволяет проводить процесс при перепаде температур $t_1 - t_2$ меньшем, чем в сушилке основной схемы, где указанный перепад был бы равен $t_1 - t_2$ и потребовалось бы нагреть воздух во внешнем калорифере до температуры t_1 (точка B), превышающей допустимую для данного материала (t_1).

Сушка с промежуточным подогревом воздуха по зонам. Сушилка, работающая по этой схеме (рис. XV-9), состоит из ряда зон, в каждой из которых установлен дополнительный калорифер (на рисунке для простоты показаны только две зоны). Такой многократный, или ступенчатый, подогрев воздуха в сушильной камере позволяет не только вести сушку в мягких условиях — при небольшом перепаде температур в камере, но и обеспечивает более г и б к и е условия сушки.

Воздух, нагретый во внешнем калорифере, проходит зону I , где извлекает из материала часть влаги и несколько охлаждается; после чего поступает в зону II , на входе в которую нагревается в калорифере K_1 , сушит материал, после чего вновь подогревается в калорифере K_2 , затем поступает в следующую зону и т. д.

Таким образом, воздух проходит последовательно все зоны, в каждой из которых осуществляется процесс сушки по основной схеме. Поэтому изменение состояния воздуха носит ступенчатый характер и изображается на диаграмме $I-x$ ломаной линией $AB'C'B''C''B'''C$ (для теоретической сушилки).

Согласно схеме (см. рис. XV-9), отработанный воздух каждой предыдущей ступени является исходным для последующей и нагревается в ней при $x = \text{const}$. Следовательно, $x_0 = x'_0 = x_1$; $x_2 = x'_0 = x'_1$; $x_2 = x''_0 = x''_1$, причем нижние индексы относятся соответственно к исходному, нагретому и отработанному воздуху, а верхние индексы указывают порядковый номер зоны.

Вместе с тем расход абсолютно сухого воздуха одинаков для всех зон и равен его расходу для всей сушилки:

$$l'W' = l''W'' = l'''W''' = L = \frac{1}{DCm_x} W$$

или

$$\frac{W'}{x_2 - x_0} = \frac{W''}{x_2 - x_2'} = \frac{W'''}{x_2 - x_2''} = \frac{W}{x_2 - x_0}$$

откуда

$$x_2' - x_0 = (x_2 - x_0) \frac{W'}{W}$$

$$x_2'' - x_2' = (x_2 - x_0) \frac{W''}{W}$$

$$x_2''' - x_2'' = (x_2 - x_0) \frac{W'''}{W}$$

Таким образом, влагосодержание воздуха увеличивается от зоны к зоне; при этом перепад влагосодержаний в каждой зоне пропорционален относительному количеству испаренной в ней влаги.

Суммарный удельный расход тепла во всех зонах:

$$q = l(AB' + C'B'' + C''B''') m_l = lABm_l$$

Общий расход тепла в сушилке

$$Q = LABm_l = \frac{ABm_l}{CDm_x} W$$

Следовательно, общий расход воздуха и тепла в данном случае тот же, что и в сушилке основной схемы, работающей при тех же начальных (точка A) и конечных (точка C) параметрах воздуха.

Однако, как видно из рис. XV-9, температура нагрева воздуха в рассматриваемом варианте значительно ниже, чем в сушилке основной схемы ($t_1 < t_3$).

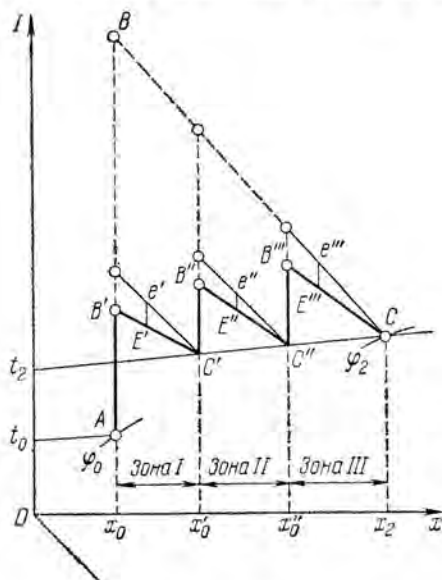
Действительную сушилку, работающую по этому варианту, рассчитывают последовательно от зоны к зоне, производя построение процесса для каждой зоны так же, как для сушилки основной схемы (с однократным использованием воздуха).

Для каждой зоны, в соответствии с количеством испаренной в ней влаги (W', W'', \dots и т. д.), определяют значение Δ (Δ', Δ'', \dots и т. д.), причем Δ для различных зон могут иметь как положительные, так и отрицательные значения. При расчете задаются двумя параметрами отработанного воздуха на выходе из сушилки (обычно t_2 и φ_2) и двумя параметрами (t и φ) нагретого или отработанного воздуха для каждой зоны, которые должны соответствовать намеченному режиму сушки по зонам.

На диаграмме $I-x$ (рис. XV-10) сначала строят процесс в теоретической сушилке, работающей при тех же начальном и конечном параметрах воздуха, т. е. по точкам A (x_0, φ_0) и C (t_2, φ_2), и получают ломаную ABC .

Рис. XV-10. Изображение на $I-x$ -диаграмме процесса реальной сушки с промежуточным подогревом воздуха по зонам.

Отрезок на оси абсцисс диаграммы, отвечающий $x_2 - x_0$, делят на части, пропорциональные количеству испаренной по зонам влаги W', W'', W''', \dots , и получают точки, характеризующие влагосодержание отработанного воздуха по зонам (x_1, x_2, \dots). Из этих точек проводят линии



$x = \text{const}$, ограничивающие пределы изменения состояния воздуха в каждой зоне. Дальнейшее построение осуществляют последовательно для всех зон, начиная от первой, как для сушилок основной схемы (см. рис. XV-7).

Сушка с частичной рециркуляцией отработанного воздуха. При сушке по этой схеме (рис. XV-11) часть отработанного воздуха возвращается и смешивается перед наружным калорифером со свежим воздухом, поступающим в сушилку. В некоторых схемах смешение отработанного воздуха со свежим может происходить после наружного калорифера.

Параметры смеси, получаемой при смешении L_0 кг/ч свежего и L_2 кг/ч отработанного воздуха (в пересчете на абсолютно сухой воздух) с различными параметрами (x_0, I_0 и x_2, I_2), можно определить, пользуясь правилом аддитивности:

$$x_{\text{см}} = \frac{L_0 x_0 + L_2 x_2}{L_0 + L_2}$$

$$I_{\text{см}} = \frac{L_0 I_0 + L_2 I_2}{L_0 + L_2}$$

Разделив все члены правой части полученных уравнений на L_0 и обозначив отношение $L_2/L_0 = n$ (кратность смешения), находим

$$x_{\text{см}} = \frac{x_0 + n x_2}{1 + n} \quad (\text{XV,39})$$

$$I_{\text{см}} = \frac{I_0 + n I_2}{1 + n} \quad (\text{XV,40})$$

Решая уравнения (XV,39) и (XV,40) относительно n и приравнявая полученные выражения, найдем уравнение связи между параметрами компонентов и смеси:

$$\frac{x_{\text{см}} - x_0}{x_2 - x_{\text{см}}} = \frac{I_{\text{см}} - I_0}{I_2 - I_{\text{см}}} \quad (\text{XV,41})$$

Уравнение (XV,41) изобразится на диаграмме $I-x$ прямой, проходящей через точки, характеризующие состояние компонентов смеси (свежего и отработанного воздуха). Точка, отвечающая составу смеси, делит эту прямую на отрезки, находящиеся в отношении $L_2/L_0 = n$. В соответствии с этим построение процесса на $I-x$ -диаграмме для теоретической сушилки с частичной рециркуляцией воздуха (см. рис. XV-11) проводят следующим образом. Пусть заданы составы свежего воздуха (точка A), отработанного воздуха (точка C) и кратность смешения n . Соединяя точки A и C прямой, находят положение точки M , которая делит прямую AC в отношении $AM/MC = L_2/L_0 = n$. Из точки M проводят линию $x_{\text{см}} = \text{const}$ до пересечения с линией $I_2 = I_1 = \text{const}$, проводимой из точки C . Точка пересечения B_1 характеризует состав воздуха на входе в сушильную камеру, а изотерма t_1 , проходящая через точку B_1 , — температуру нагрева этого воздуха (смеси свежего и рециркулирующего воздуха).

Если же заданы составы свежего и отработанного воздуха (точки A и C) и допустимая температура нагрева смеси свежего и рециркулирующего воздуха t_1 , то положение точки B_1 находят по пересечению линии $I_2 = I_1 = \text{const}$, проведенной из точки C , с заданной изотермой $t_1 =$

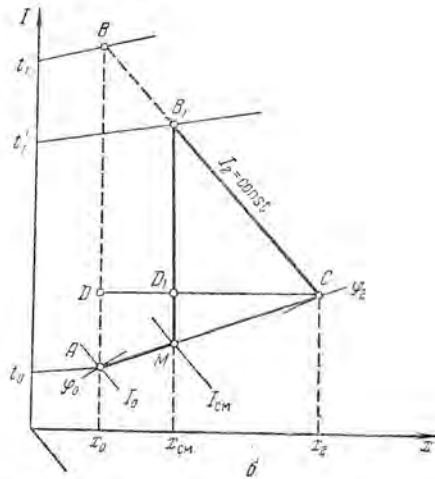
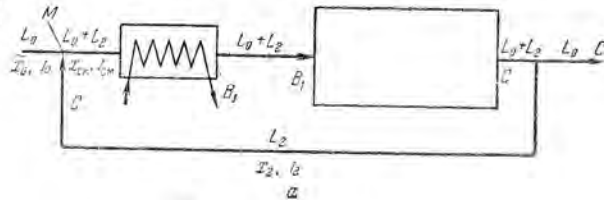


Рис. XV-11. Сушилка с частичной рециркуляцией отработанного воздуха:

a — принципиальная схема; b — изображенные теоретические процесса на $I-x$ -диаграмме.

= const. Опуская из точки B_1 вертикаль до пересечения с прямой AC , находят положение точки M , характеризующей параметры смеси свежего и рециркулирующего воздуха ($t_{см}$, $x_{см}$, $\varphi_{см}$).

Отрезок AM изображает процесс смешения свежего и отработанного воздуха, отрезок MB_1 — нагрев смешанного воздуха в наружном калорифере и линия B_1C — изменение состояния воздуха в процессе сушки. Таким образом, весь процесс в целом изображается ломаной AMB_1C .

Построение процесса в действительной сушилке производится после построения его в теоретической (работающей в тех же пределах изменения состояния воздуха) так же, как было описано выше (см. стр. 598).

Из $I-x$ -диаграммы (см. рис. XV-11) видно, что удельный расход свежего воздуха составляет (в кг сухого воздуха на 1 кг влаги):

$$l_{св} = \frac{1}{x_2 - x_0} = \frac{1}{CDm_x} \quad (XV,42)$$

Следовательно, расход свежего воздуха (в пересчете на сухой воздух) будет одинаков для данной сушилки и сушилки основной схемы, работающей при тех же значениях t_0 , φ_0 и t_2 , φ_2 , процесс в которой изображается ломаной ABC на рис. XV-7, а.

Удельный расход смеси свежего и рециркулирующего воздуха в пересчете на сухую массу составит (в кг сухого воздуха на 1 кг влаги):

$$l_{см} = \frac{1}{x_2 - x_{см}} = \frac{1}{CD_1m_x} \quad (XV,43)$$

Удельный расход тепла на калорифер:

$$q_k = l_{см}(I_1 - I_{см}) = \frac{l_1 - l_{см}}{x_2 - x_{см}} = \frac{MB_1}{D_1C} \cdot \frac{m_1}{m_x} \quad (XV,44)$$

Как видно на рис. XV-11, из подобия треугольников MB_1C и ABC вытекает, что $MB_1/CD_1 = AB/CD$, т. е. расходы тепла в данной сушилке и сушилке основной схемы (при тех же пределах изменения состояния воздуха) будут одинаковы.

При сушке с частичной циркуляцией материал сушится при более низких температурах воздуха, чем в сушилке основной схемы ($t_1 < t_1$). Вместе с тем сушка происходит в среде более влажного воздуха, так как влагосодержание смеси $x_{см}$ больше влагосодержания свежего воздуха x_0 . Такой режим сушки желателен для материалов, которые при неравномерной сушке воздухом с низкой влажностью при высоких температурах могут подвергнуться разрушению (например, керамические изделия). Воздух с высоким влагосодержанием $x_{см}$ получается по этой схеме без затрат пара на его искусственное увлажнение. При добавлении части отработанного воздуха к свежему увеличивается объем циркулирующего воздуха, а следовательно, и скорость его движения через сушилку, что способствует более интенсивному тепло- и влагообмену.

Надо иметь в виду, что для сушилки с рециркуляцией требуется больший расход энергии на вентилятор и большие капитальные затраты, чем для сушилки основной схемы. В связи с этим выбор кратности циркуляции воздуха следует производить на основе технико-экономического расчета.

Разновидностью сушилок с рециркуляцией являются сушилки с замкнутой циркуляцией (конденсационные). Из такой сушилки весь отработанный воздух (или газ) направляется в конденсатор, в котором охлаждается и теряет часть влаги, при этом его влагосодержание снижается до исходного ($x_0 = x_1$). После конденсатора воздух нагревается в наружном калорифере до температуры t_1 . Эти сушилки требуют больших расходов тепла, капитальных и эксплуатационных расходов, чем сушилки с частичной рециркуляцией.

В химической промышленности конденсационные сушилки используют при необходимости производить сушку в чистом, не содержащем пыли воздухе, а также при удалении из

высушиваемого материала ценных паров неводных растворителей. В последнем случае на линии рециркуляции воздуха вместо конденсатора могут быть установлены адсорберы с различными поглотителями.

Сушка с промежуточным подогревом и рециркуляцией воздуха по зонам. Этот вариант сушильного процесса совмещает достоинства обоих вариантов, из которых он состоит, и применяется в тех случаях, когда предъявляются высокие требования к равномерности сушки во влажном воздухе при относительно низких температурах.

В сушилке, работающей по такой схеме (рис. XV-12), частичная рециркуляция воздуха осуществляется вентиляторами (b_1 , b_2 и b_3), находящимися в зонах сушилки. Перед сушилкой смешиваются свежий воздух (характеризуемый точкой A на диаграмме $I-x$) и часть конечного отработанного воздуха, состояние которого определяется точкой C_3 . Эта смесь свежего и рециркулирующего воздуха, параметры которой соответствуют точке M , в свою очередь смешивается с отработанным воздухом первой зоны, параметры которого характеризуются точкой C_1 . Новая смесь, имеющая состав, отвечающий точке M_1 , подается вентилятором b_1 зоны I в калорифер K_1 и нагревается в нем (точка B_1). Далее смесь поглощает влагу из материала в зоне I , при этом ее состояние изменяется по линии B_1C_1 (для простоты на диаграмме изображен процесс в трехзонной теоретической сушилке). Состав отработанного воздуха первой зоны характеризуется точкой C_1 , а весь цикл изменения состояния воздуха в этой зоне — замкнутой ломаной $MM_1B_1C_1M_1$. Часть отработанного воздуха зоны I рециркулирует в зоне, а другая часть поступает в следующую зону II . Здесь отработанный воздух первой зоны (точка C_1) смешивается с частью отработанного воздуха второй зоны (точка C_2), смесь направляется в калорифер K_2 , после чего поглощает влагу из материала в зоне II и т. д. Процессы изменения состояния воздуха в зоне I ($MM_1B_1C_1M_1$), в зоне II ($C_1M_2B_2C_2M_2$) и зоне III ($C_2M_3B_3C_3M_3$) протекают аналогично, причем в каждой зоне осуществляется многократная циркуляция воздуха.

Из диаграммы $I-x$ видно, что построение процесса в каждой зоне производится как для сушилки с частичной рециркуляцией, а процесс в целом строится как для сушилки с промежуточным подогревом воздуха по зонам. Высокая степень равномерности сушки достигается в этих условиях за счет большего расхода энергии, чем в сушилках с промежуточным нагревом воздуха.

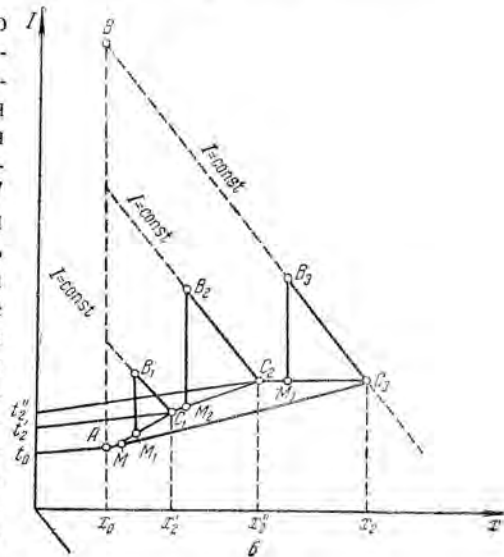
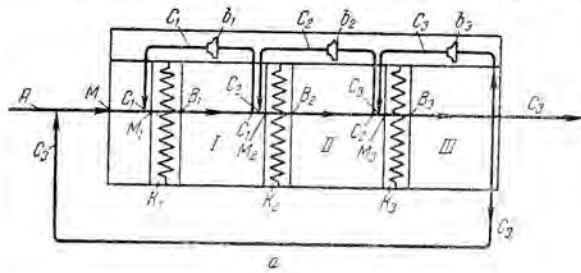


Рис. XV-12. Сушилка с промежуточным подогревом и рециркуляцией воздуха по зонам:

a — принципиальная схема; b — изображение теоретического процесса на $I-x$ -диаграмме.

Помимо последнего варианта возможны и другие сложные варианты сушки, полученные комбинированием в одной схеме простых вариантов, описанных выше. Такие схемы позволяют обеспечить наиболее благоприятные с технологической точки зрения и экономичные режимы сушки.

Сушка топочными газами. В настоящее время все более широкое распространение приобретает сушка топочными газами, используемыми для сушки не только неорганических, но и органических материалов. Это объясняется в первую очередь тем, что температура топочных газов значительно выше температуры воздуха, нагреваемого перед сушкой. В результате влагопоглощающая способность газов во много раз больше влагопоглощающей способности воздуха и соответственно больше потенциал сушки (см. стр. 590).

В качестве сушильного агента применяют газы, полученные либо сжиганием в топках твердого, жидкого или газообразного топлива, либо отработанные газы котельных, промышленных печей или других установок. Используемые для сушки газы должны быть продуктами полного сгорания топлива и не содержать золы и сажи, загрязняющих высушиваемый материал в условиях конвективной сушки. С этой целью газы подвергаются сухой или мокрой очистке перед поступлением в сушилку. Обычно температура топочных газов превышает предельно допустимую для высушиваемого материала и поэтому их разбавляют воздухом для получения сушильного агента с требуемой температурой.

Для расчета газовых сушилок необходимо знать параметры топочных газов, прежде всего их влагосодержание x и энтальпию I . Влагосодержание топочных газов x (в $кг/кг$ сухих газов) определяется отношением количества водяного пара G_n к количеству сухих газов $G_{с.г}$, получаемых при сжигании 1 $кг$ топлива:

$$x = \frac{G_n}{G_{с.г}} \quad (XV,45)$$

Значения G_n и $G_{с.г}$ рассчитываются по формулам для процесса сжигания топлива в зависимости от вида последнего (например, твердое или газообразное).

Энтальпия топочных газов I зависит главным образом от высшей теплотворной способности топлива Q_b^p и коэффициента избытка воздуха в топке α :

$$I = \frac{Q_b^p \eta_T + c_T t_T + \alpha L_0 I_0 + W_n i_n}{G_{с.г}} \quad (XV,46)$$

где η_T — к. п. д. топки; c_T — средняя удельная теплоемкость топлива (при средней температуре t_T); L_0 — теоретическое количество абсолютно сухого воздуха (необходимого для сжигания 1 $кг$ топлива), определяемое по элементарному составу топлива; I_0 — энтальпия наружного воздуха; W_n и i_n — количество водяного пара, используемого в топке для дутья или распыления (или содержащегося в газообразном топливе), и энтальпия этого пара соответственно.

Тепло 1 $кг$ топлива ($c_T t_T$) и тепло, вносимое в топку с паром ($W_n i_n$), относительно мало влияют на величину I .

Расчетные формулы для определения величин, входящих в уравнения (XV,45) и (XV,46): L_0 , $G_{с.г}$, G_n , Q_b^p , η_T и α — приводятся в курсах котельных установок и в специальной литературе по сушке.

При обычных значениях коэффициентов избытка воздуха $\alpha \geq 3-5$ плотности и теплоемкости топочных газов и воздуха очень близки. Поэтому при графоаналитическом расчете газовых сушилок можно пользоваться $I-x$ -диаграммой для влажного воздуха, но построенной для более высоких температур.

Для сушки топочными газами применяются главным образом сушилки, работающие по основной схеме, а также сушилки с частичной рециркуля-

цией газов. Построение процесса в сушилке основной схемы показано на рис. XV-13.

После определения (исходя из принятых значений α и к. п. д. топки) влагосодержания и энтальпии топочных газов по уравнениям (XV,45) и (XV,46) находят по диаграмме положение точки Γ , характеризующей состояние газов по выходе из топки. Соединяя прямой точку Γ с точкой A , выражающей состояние наружного воздуха, определяют, в зависимости от принятого соотношения количеств газов и воздуха [см. уравнение (XV,41)], положение точки M на прямой AG . Эта точка характеризует состояние смеси газов и воздуха, т. е. сушильного агента, перед входом в сушилку; наклонная прямая AM изображает процесс смещения газов с воздухом. Наклон прямой AM тем меньше, чем больше влажность топлива и чем меньше его теплотворная способность. Дальнейшее построение процесса проводят так же, как для действительной воздушной сушилки (см. стр. 598 сл.).

Расход смеси топочных газов с воздухом определяется по уравнению

$$l_x = \frac{l}{x_2 - x_1} = \frac{l}{CDm_x} \quad (\text{XV,47})$$

Расход топлива на сушку

$$B = \frac{l_m W}{G_{с.г}} \quad (\text{XV,48})$$

где W — масса испаряемой из материала влаги.

Увеличение влагосодержания смеси топочных газов и воздуха по сравнению с влагосодержанием наружного воздуха, равное $x_1 - x_0$, обусловлено испарением влаги при сжигании топлива, а также окислением водорода топлива и содержащихся в нем углеводородов (особенно при сжигании в топке газообразного топлива). Таким образом, увеличение влагосодержания смеси происходит вне камеры сушилки. Состояние газов без учета тепла испарения влаги и окисления некоторых компонентов топлива в топке изобразится на диаграмме точкой K (см. рис. XV-13), лежащей на пересечении линий $t_1 = \text{const}$ и $x_0 = \text{const}$. Соответственно расход тепла на 1 кг испаренной влаги без учета тепла, затрачиваемого на испарение всей влаги топлива при его сжигании, а также без учета потерь тепла топкой определяется следующим образом

$$q_1 = \frac{AK}{CD} M \quad (\text{XV,49})$$

Сравнивая значение q_1 с удельным расходом тепла q в воздушной сушилке, работающей при одинаковых начальных и конечных параметрах сушильного агента, можно установить, что удельный расход тепла на 1 кг испаренной влаги больше в газовых сушилках, чем в воздушных ($q_1 > q$). Однако критерием сравнения указанных сушилок должен быть не удельный расход тепла, а расход топлива на 1 кг испаренной влаги, который ниже для сушилок, работающих на топочных газах. Экономия топлива, а также меньшие капитальные затраты (в связи с отсутствием воздухонагревательных устройств) относятся к числу преимуществ сушки топочными газами по сравнению с сушкой горячим воздухом.

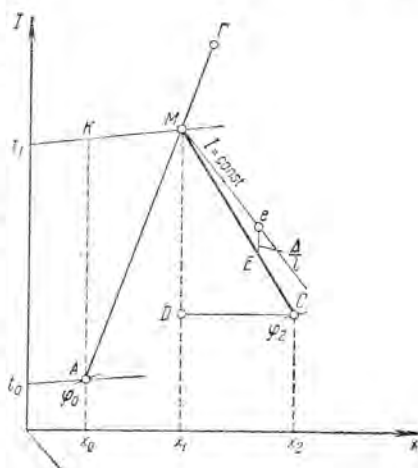


Рис. XV-13. Построение на $I-x$ -диаграмме процесса сушки топочными газами (основной вариант процесса сушки).

8. Скорость сушки

Скорость сушки определяется с целью расчета продолжительности сушки.

Скорость и периоды сушки. Процесс сушки протекает со скоростью, зависящей от формы связи влаги с материалом и механизма перемещения в нем влаги. Кинетика сушки характеризуется изменением во времени средней влажности материала, отнесенной к количеству абсолютно сухого материала w^c . Зависимость между влажностью w^c материала и временем τ изображается кривой сушки (рис. XV-14), которую строят по опытным данным.

В общем случае кривая сушки состоит из нескольких участков, соответствующих различным периодам сушки. Как видно из рисунка, после очень небольшого промежутка времени, периода прогрева материала, в течение которого влажность снижается незначительно

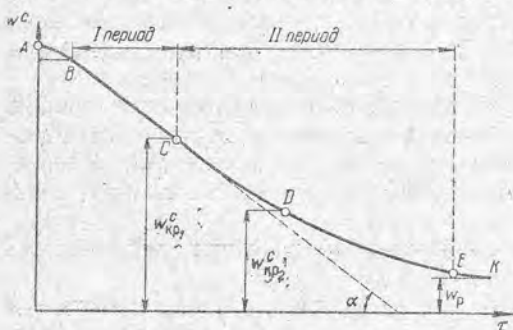


Рис. XV-14. Кривая сушки материала.

по кривой AB), наступает период постоянной скорости сушки (I период). При этом влажность материала интенсивно уменьшается по прямолинейному закону (прямая BC). Такое уменьшение влажности наблюдается до достижения первой критической влажности $w_{кр1}^c$, после чего начинается период падающей скорости сушки (II период). В этом периоде уменьшение влажности материала выражается некоторой кривой (кривая CE), которая в общем случае состоит из двух участков различной кривизны (отрезки CD и DE). Точка перегиба D соответствует второй критической влажности $w_{кр2}^c$. В конце второго периода сушки влажность материала асимптотически приближается к равновесной. Достижение равновесной влажности w_p означает полное прекращение дальнейшего испарения влаги из материала (точка K).

Скорость сушки определяется уменьшением влажности материала dw^c за некоторый бесконечно малый промежуток времени $d\tau$, т. е. выражается отношением

$$v = \frac{dw^c}{d\tau} \quad (\text{XV}, 50)$$

Влажность материала w^c обычно выражается в %, хотя по смыслу она должна выражаться в $кг/кг$ ($кг$ влаги на $кг$ сухого материала). Поэтому скорость сушки выражается в $сек^{-1}$ или $ч^{-1}$, в зависимости от того, в каких единицах измеряется время сушки.

Скорость сушки может быть определена с помощью кривой сушки путем графического дифференцирования. Для материала данной влажности скорость сушки будет выражаться тангенсом угла наклона касательной, проведенной к точке кривой, отвечающей влажности материала. В частности, для I периода скорость сушки будет соответствовать $tg \alpha = \text{const}$ (рис. XV-14).

В каждом конкретном случае вид функции $w^c = f(\tau)$ может отличаться от приведенной на рис. XV-14 в зависимости от формы и структуры материала, а также вида связи с ним влаги. Данные о скорости сушки, полученные с помощью кривых сушки, изображаются в виде кривых скорости сушки, которые строят в координатах скорость сушки — влажность материала.

На рис. XV-15 показана кривая скорости сушки, соответствующая кривой сушки на рис. XV-14. Горизонтальный отрезок BC отвечает периоду постоянной скорости (I период), а отрезок CE — периоду падающей скорости (II период). В первый период происходит интенсивное поверхностное испарение свободной влаги. В точке C (при первой критической влажности $\omega_{кр1}^c$) влажность на поверхности материала становится равной гигроскопической. С этого момента начинается испарение связанной влаги. Точка D (вторая критическая влажность) соответствует достижению равновесной влажности на поверхности материала (внутри материала влажность превышает равновесную). Начиная с этого момента и вплоть до установления равновесной влажности по всей толще материала, скорость сушки определяется скоростью внутренней диффузии влаги из глубины материала к его поверхности. Одновременно вследствие высыхания все меньшая поверхность материала остается доступной для испарения влаги в окружающую среду и скорость сушки падает непропорционально уменьшению влажности ω^c материала.

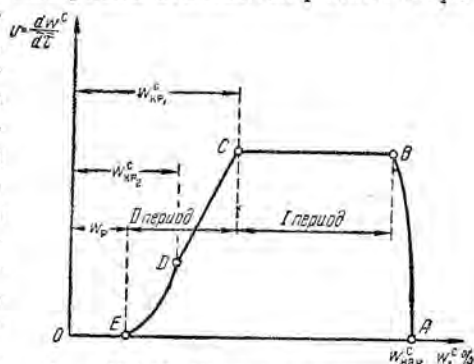


Рис. XV-15. Кривая скорости сушки.

Вид кривых скорости сушки во втором периоде весьма разнообразен (рис. XV-16). Кривая 1 типична для капиллярно-пористых материалов сложной структуры, для которых верхний участок кривой соответствует удалению капиллярной влаги, а нижний — адсорбционной. Линии 2 и 3 характерны для тонколистковых материалов с большой удельной поверхностью испарения влаги (бумага, ткань и т. п.), кривая 4 — для керамических изделий, обладающих меньшей удельной поверхностью испарения и теряющих в процессе сушки в основном капиллярную влагу. Точка перегиба, соответствующая $\omega_{кр2}^c$ (кривая 1), может быть выражена нечетко или отсутствовать совсем (линии 2, 3, 4).

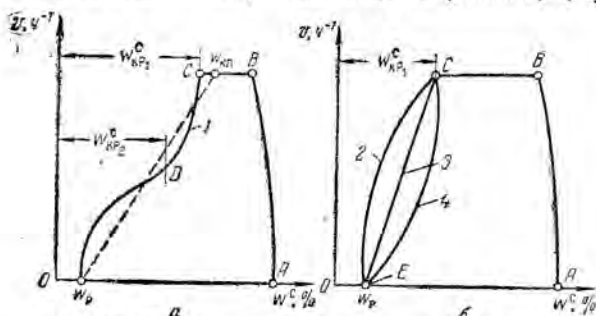


Рис. XV-16. Вид кривых скорости сушки для различных материалов.

Изменение температуры материала в процессе сушки. Для анализа процесса сушки, помимо кривых скорости, важно знать также характер изменения температуры материала θ в зависимости от его влажности ω^c (рис. XV-17), так как с изменением θ могут изменяться свойства материала.

За кратковременный период прогрева материала его температура быстро повышается и достигает постоянного значения — температуры мокрого термометра t_m . В период постоянной скорости сушки (I период) все тепло, подводимое к материалу, затрачивается на интенсивное поверхностное испарение влаги и температура материала остается постоянной, равной температуре испарения жидкости со свободной поверхности ($\theta = t_m$). В период падающей скорости (II период) испарение влаги с поверхности материала замедляется и его температура начинает повы-

шаться ($\theta > t_m$). Когда влажность материала уменьшается до равновесной и скорость испарения влаги падает до нуля, температура материала достигает наибольшего значения — становится равной температуре окружающей среды ($\theta = t_b$).

Температурная кривая на рис. XV-17 (сплошная линия) характерна для материалов, высушиваемых в виде тонких слоев. Для материалов, высушиваемых в толстом слое, при конвективной сушке температура во внутренних частях в течение почти всего процесса ниже, чем на поверхности (см. пунктирную линию на рис. XV-17). При сушке тонких пластин это «отставание» температуры проявляется значительно слабее и может возникать только во II период, в пределах от $w_{кр1}^c$ и $w_{кр2}^c$, когда происходит углубление поверхности испарения материала.

Интенсивность испарения влаги. Скорость сушки определяет один из важнейших технологических параметров — интенсивность испарения влаги из материала

m , которая выражается количеством влаги, испаряемой с единицы поверхности материала F в единицу времени:

$$m = \frac{W}{F\tau} \quad (XV,51)$$

где τ — общая продолжительность сушки,

Интенсивность испарения влаги связана с механизмом тепло- и массообмена влажного материала с окружающей средой. Как отмечалось, этот механизм является достаточно сложным, так как

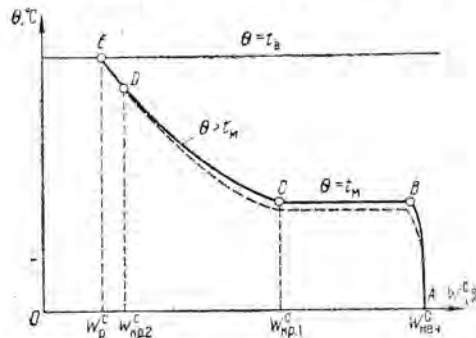


Рис. XV-17. Температурная кривая материала.

включает процессы перемещения влаги из глубины материала к его поверхности и перемещения влаги (в виде пара) с поверхности материала в окружающую среду. Каждый из этих процессов подчиняется собственным закономерностям и протекает с различной интенсивностью в разные периоды сушки.

Испарение влаги с поверхности материала. Этот процесс происходит главным образом вследствие диффузии пара через пограничный слой воздуха у поверхности материала (внешняя диффузия). Таким путем осуществляется перенос до 90% всей влаги; он обуславливается движущей силой — разностью концентраций или разностью парциальных давлений пара у поверхности материала p_m и в окружающей среде p_n . Помимо диффузионного потока перенос влаги будет происходить также за счет термодиффузии вследствие перепада температур в пограничном слое. В условиях конвективной сушки, при относительно низких температурах, перенос влаги за счет термодиффузии пренебрежимо мал.

В период постоянной скорости влажность материала больше гигроскопической, пар у его поверхности является насыщенным ($p_m = p_n$) и соответствует температуре мокрого термометра t_m . В этот период происходит интенсивное поступление влаги из внутренних слоев материала к его поверхности. Скорость поверхностного испарения влаги из материала может быть принята равной скорости испарения ее со свободной поверхности жидкости и определена, согласно закону Дальтона. Поэтому уравнение влагоотдачи с поверхности материала имеет вид

$$m = \beta (p_n - p_n) \frac{760}{B} \quad (XV,52)$$

где β — коэффициент массоотдачи (влагоотдачи).

В уравнении (XV,52) парциальные давления пара p_n и p_n , а также барометрическое давление B выражены в мм рт. ст.

Выражая коэффициент массоотдачи через диффузионный критерий Нуссельта [см. уравнение (X)], представим уравнение (XV,52) в форме

$$m = \frac{Nu' D_p}{L} (\rho_n - \rho_n) \frac{760}{B} \quad (XV,53)$$

В этом уравнении D_p — коэффициент влагопроводности (для влаги, находящейся в парообразном состоянии); D_p — аналог коэффициента теплопроводности (находится опытным путем); L — определяющий геометрический размер по направлению движения воздуха вдоль поверхности испарения влаги из материала.

Трудность практического использования уравнений (XV,52) и (XV,53) заключается в том, что β и соответственно Nu' зависят не только от основного фактора — скорости воздуха (газа), но и от многих других: условий обтекания сушильным агентом поверхности материала, ее формы и размеров, температуры сушки и т. п.

Имеется ряд эмпирических зависимостей, с помощью которых можно в первом приближении рассчитать величину β . Так, например, коэффициент влагоотдачи может быть определен (в $kg/(m^2 \cdot ч \cdot мм \text{ вод. ст.})$) только в виде функции скорости движения воздуха u в направлении, параллельном поверхности испарения:

$$\beta = 0,00168 + 0,00128u \quad (XV,54)$$

К числу более поздних приближенных зависимостей относится обобщенное уравнение

$$Nu' = 2 + A Re^n (Pr')^{0,33} Gu^{0,133} \quad (XV,55)$$

где $Gu = (T_b - T_m)/T_b$ — критерий Гухмана, представляющий собой отношение потенциала сушки $T_b - T_m$ (в $^{\circ}K$) к температуре среды T_b (в $^{\circ}K$) и отражающий влияние массообмена на теплообмен. Величины A и n определяются в зависимости от Re :

Re	A	n
200—25 000	0,385	0,57
25 000—70 000	0,102	0,73
70 000—315 000	0,025	0,90

Критерии Nu' , Re и Pr' определяются при средней температуре воздуха. Однако из уравнения (XV,55) следует, что при испарении жидкости со свободной поверхности массообмен интенсифицирует теплообмен и приближенная аналогия между тепло- и массообменом (см. главу X) не соблюдается. Этот вывод, а следовательно, и уравнение (XV,55) требуют дальнейшей проверки и уточнения в связи с трудностью надежного измерения температуры поверхности испарения и концентрации пара непосредственно у этой поверхности.

Перемещение влаги внутри материала. При испарении влаги с поверхности материала внутри него возникает градиент влажности, что и обеспечивает дальнейшее перемещение влаги из внутренних слоев материала к его поверхности (внутреннюю диффузию влаги). В *I* период сушки перепад влажности внутри материала столь велик, что лимитирующее влияние на скорость сушки имеет скорость поверхностного испарения (внешняя диффузия). Однако, после того как влажность на поверхности снижается до гигроскопической и продолжает уменьшаться, т. е. во *II* период сушки, определяющее значение для скорости процесса приобретает внутренняя диффузия влаги.

В *I* период сушки влага внутри материала перемещается в виде жидкости (капиллярная и осмотически связанная влага). С началом *II* периода начинается неравномерная усадка материала. На стадии равномерно падающей скорости наблюдаются местные углубления поверхности испарения и начинается испарение внутри материала. При этом капиллярная влага и некоторая часть адсорбционно связанной влаги перемещаются внутри материала уже в виде пара.

В дальнейшем поверхностный слой материала постепенно полностью высыхает, внешняя поверхность испарения становится все меньше геометрической поверхности материала и соответственно возрастает значение внутренней диффузии влаги. На стадии неравномерно падающей скорости

II периода наиболее прочно связанная с материалом адсорбционная влага перемещается внутри него только в виде пара.

Явление переноса влаги внутри материала носит название в л а г о - п р о в о д н о с т и. Интенсивность, или плотность, потока влаги, перемещающейся внутри материала, пропорциональна градиенту концентрации влаги ($\partial C/\partial n$):

$$m = -D_m \frac{\partial C}{\partial n} \quad (\text{XV}, 56)$$

Знак минус в правой части этого выражения показывает, что влага движется от слоя с большей к слою с меньшей концентрацией влаги, т. е. в направлении, противоположном градиенту концентрации.

Концентрация влаги равна произведению влажности материала, отнесенной к количеству абсолютно сухого вещества w^c , на плотность ρ_s абсолютно сухого вещества:

$$C = w^c \rho_s$$

Подставляя значение C в выражение (XV,56) и учитывая, что ρ_s является величиной постоянной, получим

$$m = -D_m \rho_s \frac{\partial w^c}{\partial n} \quad (\text{XV}, 57)$$

Коэффициент пропорциональности D_m называется ко э ф ф и ц и е н - т о м в л а г о п р о в о д н о с т и. По физическому смыслу он представляет собой коэффициент внутренней диффузии влаги в материале и выражается в $m^2/ч$. Коэффициент влагопроводности является аналогом коэффициента температуропроводности в процессах теплопередачи (см. главу VII). Коэффициент влагопроводности зависит от формы связи влаги с материалом, влажности материала и температуры сушки, т. е. различен на разных стадиях процесса и может быть определен только опытным путем.

При некоторых видах сушки, например контактной, радиационной или диэлектрической (см. ниже), в толще материала, помимо градиента влажности, возникает также значительный температурный градиент, влияющий на перемещение влаги внутри материала. Это явление, которое носит название т е р м о в л а г о п р о в о д н о с т и, создает поток влаги, параллельный потоку тепла. Интенсивность переноса влаги за счет термовлагопроводности пропорциональна ко э ф ф и ц и е н т у т е р м о в л а г о п р о в о д н о с т и (δ), который характеризует градиент влажности, возникающий в материале при температурном градиенте $dt/dn = \text{град}/м$ и выражается в процентах на 1°C . Соответственно плотность потока влаги внутри материала, обусловленного перепадом температуры

$$m_t = -D_m \rho_s \delta \frac{\partial t}{\partial n} \quad (\text{XV}, 58)$$

В условиях конвективной сушки явление термовлагопроводности может оказывать некоторое противодействие перемещению влаги из глубины к поверхности материала (где температура выше, чем во внутренних слоях) только в период падающей скорости при удалении влаги из толщи материала.

В настоящее время накоплено еще недостаточно экспериментальных данных о численных значениях коэффициентов термо- и влагопроводности для продуктов, подвергаемых сушке в химической промышленности. Поэтому интенсивность испарения влаги (особенно во II период сушки) не может быть определена расчетом. Однако ценность уравнений (XV,53), (XV,57) и (XV,58) заключается в том, что они позволяют качественно оценить влияние различных факторов на перенос влаги и правильно учесть их значение при интенсификации процессов сушки и проектировании сушилок. Так, из анализа этих зависимостей следует, что такие внешние факторы, как повышение температуры и увеличение скорости сушильного агента, понижение его относительной влажности и барометрического

давления, должны благоприятно влиять на повышение интенсивности поверхностного испарения и внутренней диффузии влаги в материале при конвективной сушке. Естественное, что изменение этих параметров в каждом конкретном случае возможно в допустимых и экономически целесообразных пределах.

Продолжительность процесса сушки. В сушилках периодического действия сушка является нестационарным процессом: влажность материала в процессе сушки изменяется в пространстве (по сечению и толщине материала) и во времени. Соответственно скорость уменьшения влажности материала ($\partial\omega^c/\partial\tau$) может быть выражена наиболее общим дифференциальным уравнением влагообмена

$$\frac{\partial\omega^c}{\partial\tau} = D_m \nabla^2(\omega^c) + D_m \delta \nabla^2(t) \quad (\text{XV},59)$$

где $\nabla^2(\omega^c)$ и $\nabla^2(t)$ — операторы Лапласа соответственно для влажности и температуры, выражающие сумму вторых производных данной переменной (влажности или температуры) по осям координат.

Для материала в виде плоских пластин можно принять, что влага перемещается в нем только в одном направлении (например, по оси x), т. е. свести уравнение к одномерной задаче. С целью дальнейшего упрощения решения можно принять также, что коэффициент влагопроводности не зависит от влажности материала ($D_m = \text{const}$) и пренебречь термовлагопроводностью для конвективной сушки. Тогда уравнение (XV,59) значительно упростится:

$$\frac{\partial\omega^c}{\partial\tau} = D_m \frac{\partial^2\omega^c}{\partial x^2} \quad (\text{XV},60)$$

Дифференциальное уравнение (XV,60) можно решить, зная закон распределения влажности в материале в начале сушки (начальное условие) и выражение для плотности потока влаги с поверхности материала в окружающую среду (граничное условие). При задании указанных краевых условий (для каждого из двух периодов сушки) уравнение (XV,60) может быть проинтегрировано.

В периоде постоянной скорости сушки влагу можно считать равномерно распределенной по сечению материала, т. е. при $\tau = 0$ величина $\omega^c = \text{const}$. Кроме того, для этого периода коэффициент влагопроводности D_m и интенсивность испарения влаги с поверхности материала m также являются постоянными. Интегрируя уравнение (XV,60) для этих условий и заменяя влажность ω^c , выраженную в кг/кг сухого вещества, влажностью ω , выраженной в %, получают следующее выражение для скорости сушки в первый период:

$$N = - \frac{\partial\omega}{\partial\tau} = \frac{100m}{G_{с.в}} F = \frac{\omega_1 - \omega_{кр1}}{\tau_{к1}} \quad (\text{XV},61)$$

где m — интенсивность сушки, которая может быть определена по уравнению (XV,51); $G_{с.в}$ — масса абсолютно сухого материала; F — поверхность испарения; ω_1 и $\omega_{кр1}$ начальная влажность и первая критическая влажность соответственно; $\tau_{к1}$ — продолжительность сушки за весь первый период при изменении влажности от ω_1 до $\omega_{кр1}$.

Полученное уравнение является уравнением прямой BC на кривой сушки (см. рис. XV-14). Из него определяется продолжительность сушки за первый период

$$\tau_{к1} = \frac{\omega_1 - \omega_{кр1}}{N} \quad (\text{XV},62)$$

или при сушке до некоторой конечной влажности $\omega_2 \ll \omega_{кр1}$ имеем

$$\tau_1 = \frac{\omega_1 - \omega_2}{N} \quad (\text{XV},62a)$$

Для периода падающей скорости расчет скорости сушки значительно усложняется вследствие сложной и различной конфигурации кривых скорости сушки (см. рис. XV-16). Продолжительность сушки в этот период может быть определена приближенно с помощью коэффициента скорости сушки K_c .

Для расчета K_c используют экспериментальную кривую скорости сушки данного материала, заменяя в ней криволинейный отрезок (соответствующий второму периоду сушки) наклонной прямой, проводимой из точки ω_p до горизонтального прямолинейного участка, отвечающего периоду постоянной скорости (пунктирная линия на рис. XV-16, а). Верхний конец этой прямой соответствует приведенной критической влажности $\omega_{к.п.}$, которой заменяют в первом приближении истинную первую критическую влажность $\omega'_{кр1}$.

При этом уравнение кривой скорости сушки для второго периода может быть представлено в виде

$$N = -\frac{d\omega}{d\tau} = K_c (\omega_{к.п.} - \omega_p)$$

где $K_c = N/\omega_{к.п.} - \omega_p$ — коэффициент скорости сушки (N — скорость сушки в первый период).

В результате интегрирования этого уравнения в пределах от $\omega_{к.п.}$ до ω_2 (конечная влажность материала после сушки) получаем

$$\frac{\omega_2 - \omega_p}{\omega_{к.п.} - \omega_p} = e^{-K_c \tau_2}$$

откуда продолжительность сушки за второй период определяется так:

$$\tau_2 = \frac{1}{K_c} 2,3 \lg \frac{\omega_{к.п.} - \omega_p}{\omega_2 - \omega_p} = \frac{1}{N} 2,3 (\omega_{к.п.} - \omega_p) \lg \frac{\omega_{к.п.} - \omega_p}{\omega_2 - \omega_p} \quad (XV,63)$$

Общая продолжительность сушки составляет:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 = \frac{1}{N} \left[\omega_1 - \omega_{к.п.} + 2,3 (\omega_{к.п.} - \omega_p) \lg \frac{\omega_{к.п.} - \omega_p}{\omega_2 - \omega_p} \right] \quad (XV,64)$$

Метод расчета продолжительности сушки с использованием коэффициента скорости сушки K_c , предложенный А. В. Лыковым, наиболее распространен. Его достоинство состоит в том, что этим методом приближенно учитываются реальные условия сушки, протекающей во втором периоде при переменном режиме. Более точно изменение состояния сушильного агента в процессе сушки и изменение коэффициента теплопроводности с изменением влажности материала можно учесть, разбивая второй период сушки на несколько этапов и суммируя их продолжительности (рассчитанные тем же методом) для определения времени сушки за весь период.

Предложены также другие приближенные эмпирические уравнения, которые позволяют с той или иной степенью точности рассчитать продолжительность сушки. Их общий недостаток состоит в том, что эти уравнения пригодны только для тех материалов и условий, для которых они были получены. Следует учитывать также, что использование для расчета процесса сушки экспериментальных данных, полученных для лабораторных образцов, также должно привести к значительным погрешностям при определении продолжительности сушки того же материала в промышленных сушилках. В связи с этим для расчета продолжительности процесса сушки наиболее надежно использовать нормативы, разрабатываемые на основе статистических опытных данных для конкретных материалов и режимов сушки.

Во многих случаях, учитывая сложность определения скорости и продолжительности сушки в различные периоды процесса, рабочий объем конвективных сушилок V_p находят приближенно, пользуясь средней

опытной величиной напряжения объема сушилки по влаге A [в $кг/м^3 \cdot ч$] — параметром, выражающим количество влаги, удаляемой при подобных условиях в единице объема сушильной камеры. При этом рабочий объем сушилки определяется простой зависимостью

$$V_p = \frac{W}{A} \quad (XV,65)$$

где W — масса влаги, удаляемой за весь процесс сушки.

Для некоторых конвективных сушилок (например, ленточных) при расчете размеров рабочей части, на которой располагается материал (например, ленты или другого транспортирующего устройства), часто используют напряжение соответствующей поверхности по влаге A или напряжение по высушиваемому материалу A' . Для определения поверхности нагрева контактных сушилок также применяют величину A .

9. Устройство сушилок

Конструкции сушилок очень разнообразны и отличаются по ряду признаков: по способу подвода тепла (конвективные, контактные и др.), по виду используемого теплоносителя (воздушные, газовые, паровые), по величине давления в сушильной камере (атмосферные и вакуумные), по способу организации процесса (периодические и непрерывные), а также по взаимному направлению движения материала и сушильного агента в конвективных сушилках (прямоток, противоток, перекрестный ток). Это крайне затрудняет обобщающую классификацию сушилок. Ниже мы ограничимся рассмотрением групп сушилок, которые находят применение (или перспективны для применения) в химической технологии, объединенных по способу подвода тепла и состоянию слоя высушиваемого материала (неподвижный, перемешиваемый и т. д.).

Конвективные сушилки с неподвижным или движущимся плотным слоем материала

Камерные сушилки. Эти сушилки являются аппаратами периодического действия, работающими при атмосферном давлении. Они используются в производстве небольшого масштаба для материалов, допускающих невысокую температуру сушки, например красителей. Материал в этих сушилках сушится на лотках (противнях), установленных на стеллажах или вагонетках, находящихся внутри сушильной камеры 1 (рис. XV-18). На каркасе камеры между вагонетками 2 установлены козырьки 3, которые как бы делят пространство камеры на три расположенные друг над другом зоны, вдоль которых последовательно движется сушильный агент. Свежий воздух, нагретый в наружном калорифере 4, засасывается вентилятором 5 и подается вниз камеры сушилки. Здесь он движется (путь воздуха показан на рисунке стрелками), два раза меняя направление и дважды нагреваясь в промежуточных калориферах 6 и 7. Часть отработанного воздуха

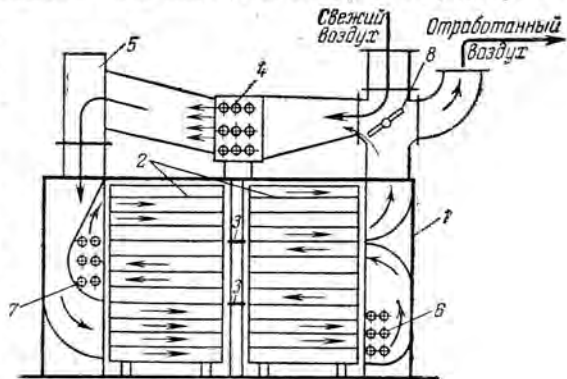


Рис. XV-18. Камерная сушилка:

1 — сушильная камера; 2 — вагонетки; 3 — козырьки; 4, 6, 7 — калориферы; 5 — вентилятор; 8 — шибер.

с помощью шиберов направляется на смешение со свежим. Таким образом, сушилка работает с промежуточным подогревом и частичной рециркуляцией воздуха, т. е. по варианту, обеспечивающему низкую температуру и более мягкие условия сушки.

Однако, вследствие сушки в неподвижном толстом слое, сушилки этого типа обладают низкой производительностью и продолжительность сушки в них велика. Кроме того, сушка в них неравномерна из-за неравномерности температур в камере, возникающей за счет частичного прохода воздуха в вышерасположенные зоны кратчайшим путем (через зазоры). Для создания более равномерной циркуляции воздуха в некоторых современных конструкциях камерных сушилок наружный вентилятор заменяют внутренними реверсивными осевыми вентиляторами или применяют эжекторы. В эжекционных камерных сушилках рециркулирующий отработанный воздух подсасывается свежим, что позволяет уменьшить расход

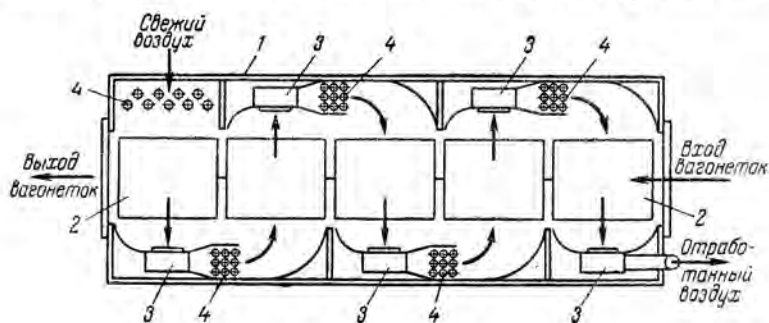


Рис. XV-19. Туннельная сушилка:

1 — камера; 2 — вагонетки; 3 — вентиляторы; 4 — калориферы.

электроэнергии на циркуляцию. Обслуживание камерных сушилок требует больших затрат ручного труда, что также является существенным недостатком.

Туннельные сушилки. Эти сушилки (рис. XV-19) отличаются от камерных тем, что в них соединенные друг с другом вагонетки медленно перемещаются на рельсах вдоль очень длинной камеры прямоугольного сечения (коридора). На входе и выходе коридор имеет герметичные двери, которые одновременно периодически открываются для загрузки и выгрузки материала: вагонетка с высушенным материалом удаляется из камеры, а с противоположного конца в нее поступает новая вагонетка с влажным материалом. Перемещение вагонеток производится с помощью троса и механической лебедки. Сушильный агент движется прямотоком или противотоком к высушиваемому материалу.

Туннельные сушилки обычно работают с частичной рециркуляцией сушильного агента, и они используются для сушки больших количеств штучных материалов, например керамических изделий. По интенсивности сушки туннельные сушилки мало отличаются от камерных: им присущи основные недостатки последних (длительная и неравномерная сушка, ручное обслуживание).

Ленточные сушилки. В этих сушилках сушка материалов производится непрерывно при атмосферном давлении. В камере 1 сушилки (рис. XV-20) слой высушиваемого материала движется на бесконечной ленте 2, натянутой между ведущим 3 и ведомым 4 барабанами. Влажный материал подается на один конец ленты, а подсушенный удаляется с другого конца. Сушка осуществляется горячим воздухом или топочными газами, которые движутся противотоком или перекрестным током к направлению движения материала.

В одноленточных сушилках со сплошной лентой обычно наблюдается неравномерное высушивание материала: во внутренней

части слоя, обращенной к ленте, конечная влажность выше, чем в его наружной части, омываемой газами или воздухом.

Более эффективно применение многоленточных сушилок с лентами из металлической сетки. В них сушильный агент движется перпендикулярно плоскости ленты сквозь находящийся на ней слой материала (перекрестный ток). При пересыпании материала с ленты на ленту

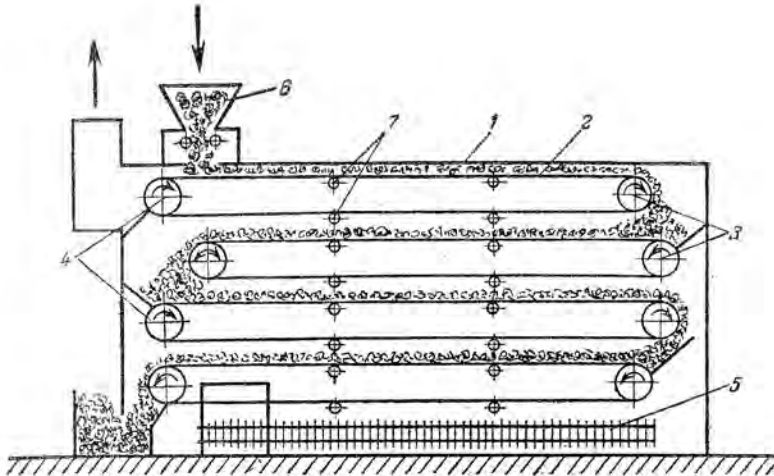


Рис. XV-20. Ленточная сушилка:

1 — камера сушилки; 2 — бесконечная лента; 3 — ведущие барабаны; 4 — ведомые барабаны; 5 — калорифер; 6 — питатель; 7 — опорные ролики.

увеличивается поверхность его соприкосновения с сушильным агентом, что способствует возрастанию скорости и равномерности сушки. Ленточные сушилки могут работать по различным вариантам сушильного процесса.

Ленточные сушилки громоздки (подобно туннельным сушилкам) и сложны в обслуживании главным образом из-за перекосов и растяжения лент; их удельная производительность (на 1 м^2 поверхности ленты) невелика, а удельные расходы тепла (на 1 кг испаренной влаги) довольно высоки. Кроме того, они непригодны для сушки пастообразных материалов, поэтому для этой цели их используют в комбинации с вальцовыми сушилками (см. ниже).

В некоторых современных конструкциях ленточных сушилок применяется в качестве сушильного агента перегретый пар, иногда — в смеси с горячими инертными газами. Сушка перегретым паром (при отсутствии или очень малом содержании кислорода) представляет интерес для материалов, окисляющихся или загорающихся при повышенных температурах в присутствии кислорода воздуха. В конструктивном отношении эти сушилки сложны, так как во избежание попадания в них воздуха необходимо обеспечивать их герметичность.

Петлевые сушилки. Сушку пастообразных материалов, а также тонких листовых (например, бумаги) производят в непрерывно действующих петлевых сушилках, работающих при атмосферном давлении. В сушилке для паст (рис. XV-21) питатель 1 подает материал на бесконечную гибкую

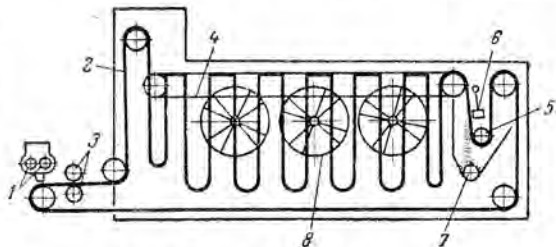


Рис. XV-21. Петлевая сушилка:

1 — питатель; 2 — бесконечная сетчатая лента; 3 — прижимные вальцы; 4 — цепной конвейер; 5 — направляющий ролик; 6 — автоматическое ударное устройство; 7 — разгрузочный шнек; 8 — вентилятор.

сетчатую ленту 2, которая проходит между обогреваемыми паром вальцами 3, вдавливающими пасту 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. С помощью направляющего ролика 5 лента отводится к автоматическому ударному устройству 6, посредством которого высушенный материал сбрасывается с ленты и выводится из сушилки разгрузочным шнеком 7.

Циркуляция воздуха (или газов) осуществляется с помощью осевых вентиляторов 8, часть которых (на одной стороне камеры) показана на рис. XV-21, причем горячий воздух или газ движется поперек ленты 2. Сушилка обычно работает по варианту с промежуточным подогревом воздуха и частичной рециркуляцией его по зонам.

В петлевых сушилках сушка производится в слое небольшой толщины (равной толщине звеньев ленты, составляющей 5—20 мм) при двустороннем обмывании ленты горячим воздухом и прогреве запрессованного материала металлическим каркасом (сеткой), нагретым вальцами 3. Это обеспечивает большую скорость сушки по сравнению с камерными сушилками. Вместе с тем петлевые сушилки отличаются сложностью конструкции и требуют значительных эксплуатационных расходов.

Конвективные сушилки с перемешиванием слоя материала

Барабанные сушилки. Эти сушилки широко применяются для непрерывной сушки при атмосферном давлении кусковых, зернистых и сыпучих материалов (минеральных солей, фосфоритов и др.).

Барабанная сушилка (рис. XV-22) имеет цилиндрический барабан 1, установленный с небольшим наклоном к горизонту (1/15—1/50) и опирающийся с помощью бандажей 2 на ролики 3.

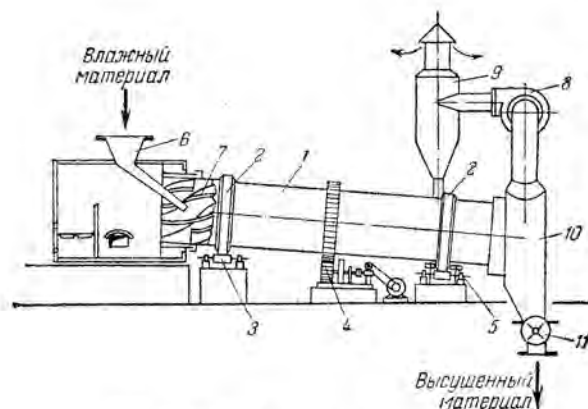


Рис. XV-22. Барабанная сушилка:

1 — барабан; 2 — бандажи; 3 — опорные ролики; 4 — передача; 5 — опорно-упорные ролики; 6 — питатель; 7 — лопасти; 8 — вентилятор; 9 — циклон; 10 — разгрузочная камера; 11 — разгрузочное устройство.

Барабан приводится во вращение электродвигателем через зубчатую передачу 4 и редуктор. Число оборотов барабана обычно не превышает $5-8 \text{ мин}^{-1}$; положение его в осевом направлении фиксируется упорными роликами 5. Материал подается в барабан питателем 6, предварительно подсушивается, перемешиваясь лопастями 7 приемно-винтовой насадки, а затем поступает на внутреннюю насадку, расположенную вдоль почти всей длины барабана.

Насадка обеспечивает равномерное распределение и хорошее перемешивание материала по сечению барабана, а также его тесное соприкосновение при пересыпании с сушильным агентом — топочными газами. Газы и материал особенно часто движутся прямоютоком, что помогает избежать перегрева материала, так как в этом случае наиболее горячие газы соприкасаются с материалом, имеющим наибольшую влажность. Чтобы избежать усиленного уноса пыли с газами последние просасываются через барабан вентилятором 8 со средней скоростью, не превышающей 2—

3 м/сек. Перед выбросом в атмосферу отработанные газы очищаются от пыли в циклоне 9. На концах барабана часто устанавливают уплотнительные устройства (например, лабиринтные), затрудняющие утечку сушильного агента.

У разгрузочного конца барабана имеется подпорное устройство в виде сплошного кольца или кольца, образованного кольцеобразно расположенными поворотными лопатками (в виде жалюзи). Назначение этого кольца — поддерживать определенную степень заполнения барабана материалом; как правило, степень заполнения не превышает 20%. Время пребывания обычно регулируется скоростью вращения барабана и реже — изменением угла его наклона. Высушенный материал удаляется из камеры 10 через разгрузочное устройство 11, с помощью которого герметизируется камера 10 и предотвращается поступление в нее воздуха извне. Подсосы воздуха привели бы к бесполезному увеличению производительности и энергии, потребляемой вентилятором 8.

Устройство внутренней насадки (рис. XV-23) барабана зависит от размера кусков и свойств высушиваемого материала.

Подъемно-лопастная насадка используется для сушки крупнокусковых и склонных к налипанию материалов, а секторная насадка — для мелкокусковых и крупнокусковых материалов с большой плотностью. Для мелкокусковых, сильно сыпучих материалов широко применяются распределительные насадки. Сушка тонкоизмельченных, пылящих материалов производится в барабанах, имеющих перевалочную насадку, например подъемно-лопастную (в передней части аппарата) и распределительную.

Типы промышленных барабанных сушилок разнообразны: сушилки, работающие при противотоке сушильного агента и материала, с использованием воздуха в качестве сушильного агента, контактные барабанные сушилки (см. ниже) и др.

Диаметр барабана D_6 обычно находится с помощью значения напряжения барабана сушилки по влаге A , определяемого по опытным данным. Объем барабана

$$V_6 = \frac{\pi D_6^2}{4} L = \frac{W}{A} \quad (\text{XV}, 66)$$

причем длина барабана L принимается в пределах (3,5—7) D_6 . Зная массу влаги W , испаряемой из материала, по уравнению (XV,66) определяют D_6 .

В определенных условиях значения A для барабанных сушилок достигают 100—120 кг/(м³·ч). При подборе диаметра барабана следует руководствоваться нормализованными размерами НИИХиммаша: 1200—2400 мм (через 200 мм) и 2800 мм.

Более точно рабочий объем барабана сушилки может быть определен с помощью объемного коэффициента теплоотдачи от сушильного агента к материалу α_v [в вт/(м³·град)] по уравнению

$$V_6 = 1,2 \frac{Q}{\alpha_v \Delta t} \quad (\text{XV}, 67)$$

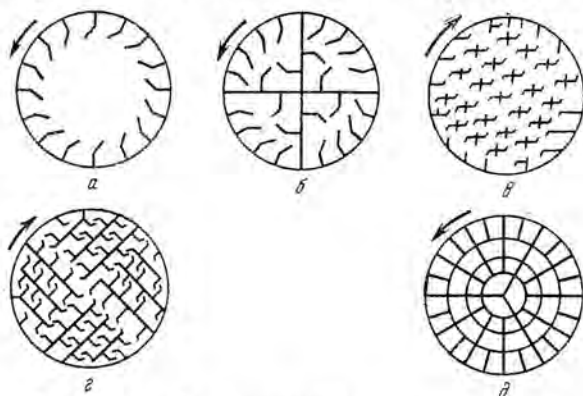


Рис. XV-23. Типы насадок барабанных сушилок: а — подъемно-лопастная; б — секторная; в, г — распределительная; д — перевалочная.

где Q — тепловая нагрузка, $вт$; Δt — среднелогарифмическая разность температур между материалом и сушильным агентом, $^{\circ}C$.

Методика расчета α_V приводится в специальной литературе. Коэффициентом 1,2 учитывается, что материалом занята только часть барабана.

Конвективные сушилки со взвешенным слоем материала

Сушилки с кипящим (псевдооживленным) слоем. Эти сушилки являются одним из прогрессивных типов аппарата для сушки. Процесс в кипящем слое позволяет значительно увеличить поверхность контакта между частицами материала и сушильным агентом, интенсифицировать испарение влаги из материала и сократить (до нескольких минут) продолжительность сушки. Сушилки с кипящим слоем в настоящее время успешно применяются в химической технологии не только для сушки сильносыпучих

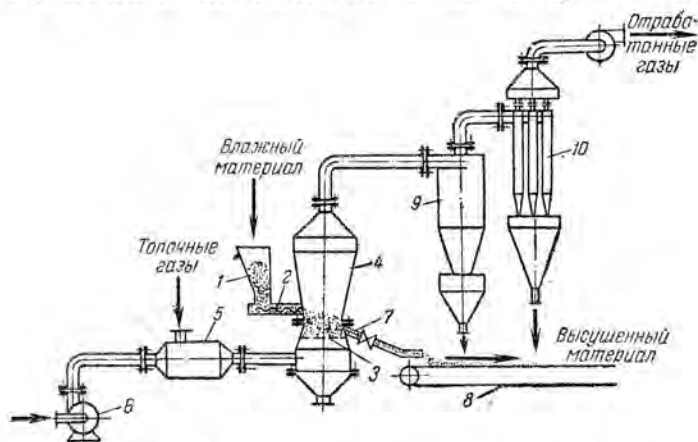


Рис. XV-24. Однокамерная сушилка с кипящим слоем:

- 1 — бункер; 2 — питатель; 3 — газораспределительная решетка; 4 — камера сушилки; 5 — смешивательная камера; 6 — вентилятор; 7 — штуцер для выгрузки высушенного материала; 8 — транспортер; 9 — циклон; 10 — батарейный пылеуловитель.

зернистых материалов (например минеральных и органических солей), но и материалов, подверженных комкованию, например для сульфата аммония, поливинилхлорида, полиэтилена и некоторых других полимеров, а также пастообразных материалов (пигментов, анилиновых красителей), растворов, расплавов и суспензий.

Наиболее распространены **о д н о к а м е р н ы е** сушилки непрерывного действия (рис. XV-24). Высушиваемый материал подается из бункера 1 питателем 2 в слой материала, «кипящего» на газораспределительной решетке 3 в камере 4 сушилки. Сушильный агент — горячий воздух или топочные газы, разбавленные воздухом, который подается в смешивательную камеру 5 вентилятором 6, — проходит с заданной скоростью через отверстия решетки 3 и поддерживает на ней материал в кипящем (псевдооживленном) состоянии. Высушенный материал ссыпается через штуцер 7 несколько выше решетки 3 и удаляется транспортером 8. Отработанные газы очищаются от унесенной пыли в циклоне 9 и батарейном пылеуловителе 10, после чего выбрасываются в атмосферу.

В сушилках этого типа с цилиндрическим корпусом наблюдается значительная неравномерность сушки, обусловленная тем, что при интенсивном перемешивании в слое время пребывания отдельных частиц существенно отличается от его среднего значения. Поэтому применяют сушилки с расширяющимися кверху сечением, например коническим, как показано на рис. XV-24. Скорость газа внизу камеры должна превышать скорость

осаждения самых крупных частиц, а сверху — быть меньше скорости осаждения самых мелких частиц. При такой форме камеры достигается более организованная циркуляция твердых частиц, которые поднимаются в центре и опускаются (в виде менее разреженной фазы) у периферии аппарата. Благодаря снижению скорости газов по мере их подъема улучшается распределение частиц по крупности и уменьшается унос пыли. Это, в свою очередь, повышает равномерность нагрева (более мелкие частицы, поднимающиеся выше, находятся в области более низких температур) и позволяет уменьшить высоту камеры.

Многокамерные сушилки состоят из двух и более камер, через которые последовательно движется высушиваемый материал. Камеры располагаются либо рядом, либо одна над другой (рис. XV-25).

На рис. XV-25 показана двухкамерная сушилка НИИхиммаша, применяемая для высушивания полимерных материалов. Горячий воздух с большой скоростью (60—70 м/сек) подается через отверстия решетки, расположенной в нижней части каждой камеры. Материал поступает в верхнюю камеру 1, подсушивается в ней и пересыпается в нижнюю камеру 2, из которой удаляется высушенный материал. Воздух подается в каждую камеру отдельно и отводится из камер в общий коллектор для очистки от пыли, после чего выбрасывается в атмосферу. Над решеткой верхней камеры установлен механический разрыхлитель 3 для комкующегося высушиваемого материала.

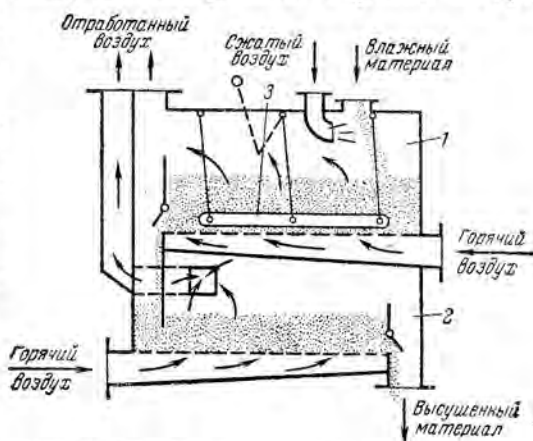


Рис. XV-25. Двухкамерная сушилка с кипящим слоем:

1 — верхняя камера; 2 — нижняя камера; 3 — разрыхлитель.

Многокамерные сушилки более сложны по конструкции (и соответственно в эксплуатации), чем однокамерные, требуют больших удельных расходов сушильного агента и электроэнергии. Кроме того, процесс в них труднее поддается автоматизации. Применение многокамерных сушилок целесообразно лишь для материалов со значительным сопротивлением внутренней диффузии влаги, требующих длительной сушки, а также для материалов, нуждающихся в регулировании температурного режима сушки (во избежание перегрева). В них удобно совмещать процессы сушки и охлаждения материала.

Для материалов, мало чувствительных к нагреву, применяют двух- и трехсекционные ступенчатые противоточные сушилки с кипящим слоем (рис. XV-26). За счет противотока материала и сушильного агента достигается более высокая степень насыщения газа влагой, но высушенный материал соприкасается с наиболее горячим теплоносителем. Для регулирования температуры нагрева в слой материала в секциях помещают змеевики. В таких сушилках выгрузка высушенного материала производится над слоем через переточные патрубки.

Чтобы избежать чрезмерного увеличения гидравлического сопротивления, высоту кипящего слоя в сушилках непрерывного действия поддерживают в пределах 400—700 мм (в зависимости от свойств высушиваемого материала).

Для сушки небольших количеств различных продуктов применяют периодически действующие сушилки с кипящим слоем. В этих аппаратах эффективно используют подачу сушильного агента импульсами, вызывающими кратковременное псевдооживление материала. Таким способом

удается достичь равномерной сушки материалов, склоненных к слипанию, и кристаллических материалов без значительного истирания их частиц.

В определенных условиях значения A при сушке некоторых продуктов в промышленных непрерывно действующих сушилках с кипящим слоем достигают $1250 \text{ кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{ч})$.

С помощью сушилок с кипящим слоем при рациональном аппаратурном оформлении процесса достигается экономичная сушка с высоким влагосъемом с единицы объема сушильной камеры. Поэтому при сушке некоторых продуктов (например, солей) сушилки с кипящим слоем вытесняют барабанные и менее эффективные сушилки других типов.

Методика расчета сушилок с кипящим слоем зависит от свойств материала и формы связи с ним влаги. Подробное изложение этих методик

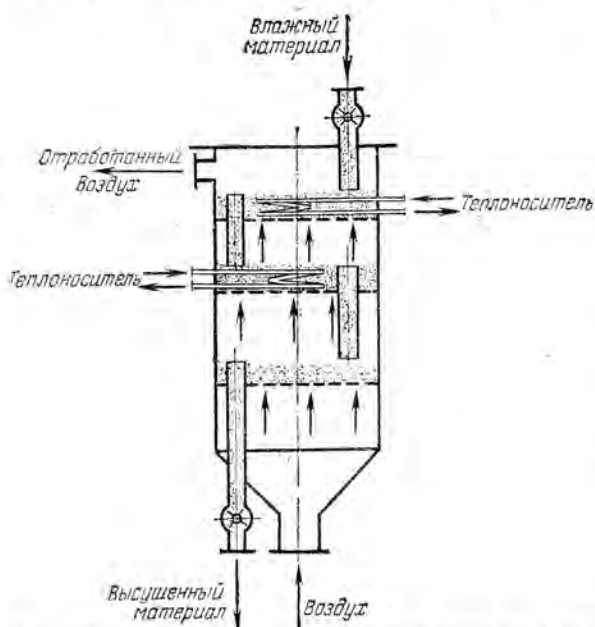


Рис. XV-26. Ступенчато-противоточная сушилка с кипящим слоем.

превышает температуру адиабатического испарения чистой жидкости. Таким образом, достигается быстрая сушка в мягких температурных условиях, позволяющая получить качественный порошкообразный продукт, хорошо растворимый и не требующий дальнейшего измельчения. Возможна сушка и холодным теплоносителем, когда распыливаемый материал предварительно нагрет.

Распыление осуществляется механическими и пневматическими форсунками, а также с помощью центробежных дисков, скорость вращения которых составляет 4000—20 000 оборотов в 1 мин.

В распылительной сушилке (рис. XV-27) материал подается в камеру 1 через форсунку 2. Сушильный агент движется параллельным током с материалом. Мелкие твердые частицы высушенного материала (размером до нескольких микрон) осаждаются на дно камеры и отводятся шнеком 3. Отработанный сушильный агент после очистки от пыли в циклоне 4 и рукавном фильтре 5 выбрасывается в атмосферу.

Распыление центробежными дисками (без давления) пригодно для диспергирования суспензий и вязких жидкостей, но требует значительно

приводится в специальной литературе*.

Распылительные сушилки. В этих сушилках достигается высокая интенсивность испарения влаги за счет тонкого распыления высушиваемого материала в сушильной камере, через которую движется сушильный агент (нагретый воздух или топочные газы). При сушке в распыленном состоянии удельная поверхность испарения становится столь большой, что процесс высушивания завершается чрезвычайно быстро (примерно за 15—30 сек).

В условиях почти мгновенной сушки температура поверхности частиц материала, несмотря на высокую температуру сушильного агента, лишь немного

* Романков П. Г., Рашковская Н. Б. Сушка во взвешенном состоянии. Изд. 2-е. Л., «Химия», 1968. 360 с.

большого расхода энергии, чем механическое распыливание. Распыливание механическими форсунками, в которые жидкость подается насосом под давлением 30—200 ат, более экономично, но применяется только для жидкостей, не содержащих твердых взвесей, вследствие чувствительности этих форсунок к засорению. Распыление пневматическими форсунками, работающими с помощью сжатого воздуха под давлением около 6 ат, хотя и пригодно для загрязненных жидкостей, но наиболее дорого из-за большого расхода энергии; кроме того, его недостатком является неоднородность распыления.

Распылительные сушилки работают также по принципам противотока и смешанного тока. Однако прямоток особенно распространен, так как позволяет производить сушку при высоких температурах без перегрева материала, причем скорость осаждения частиц складывается в этом случае из скорости их витания и скорости сушильного агента ($v_{\text{вит}} + v_{\text{с.а}}$).

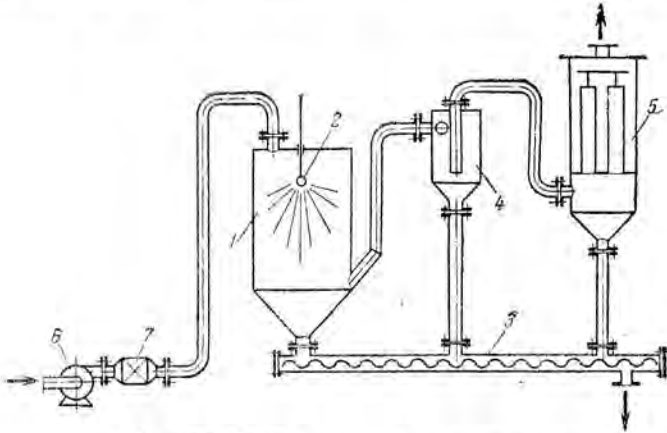


Рис. XV-27. Распылительная сушилка:

1 — камера сушилки; 2 — форсунка; 3 — шнек для выгрузки высушенного материала; 4 — циклон; 5 — рукавный фильтр; 6 — вентилятор; 7 — калорифер.

При противотоке скорость осаждения меньше ($v_{\text{вит}} - v_{\text{с.а}}$) и соответственно больше время пребывания частиц в камере. Это позволяет получать высушенный материал с большей плотностью.

Для осаждения мелких частиц (средний размер капель обычно составляет 20—60 мкм) и уменьшения уноса скорость газов в камере, считая на ее полное сечение, обычно не превышает 0,3—0,5 м/сек. Но даже при таких скоростях унос значителен и требуется хорошее обеспыливание отработанных газов. Для более равномерного распределения сушильного агента по сечению камеры и хорошего смешивания с каплями высушиваемой жидкости используют ввод газа через штуцер, расположенный касательно к корпусу камеры, или через ряд щелей, по ее окружности.

Значения A для распылительных сушилок невелики. В определенных условиях они достигают 10—14 кг/(м³·ч). Вследствие относительно низкого напряжения камеры по влаге распылительные сушилки представляют собой довольно громоздкие аппараты. Кроме того, оборудование сушилок (распыливающие и пылеулавливающие устройства) является довольно сложным и дорогим в эксплуатации.

Конвективные сушилки с пневмотранспортом материала

Пневматические сушилки. Для сушки во взвешенном состоянии зернистых (неслипающихся) и кристаллических материалов применяют также пневматические сушилки. Сушка осуществляется в вертикальной трубе

длиной до 20 м. Частицы материала движутся в потоке нагретого воздуха (или топочных газов), скорость которого превышает скорость витания частиц и составляет 10—30 м/сек. В подобных трубах-сушилках процесс сушки длится секунды и за такое короткое время из материала удаётся испарить только часть свободной влаги.

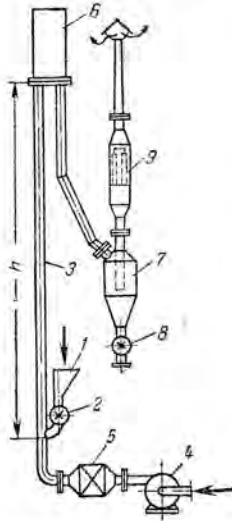


Рис. XV-28. Пневматическая сушилка:

1 — бункер; 2 — питатель; 3 — труба; 4 — вентилятор; 5 — калорифер; 6 — сборник-амортизатор; 7 — циклон; 8 — разгрузочное устройство; 9 — фильтр.

В пневматической сушилке (рис. XV-28) материал из бункера 1 подается питателем 2 в трубу 3 и увлекается потоком воздуха, который нагнетается вентилятором 4 и нагревается в калорифере 5. Воздух выносит высохший материал в сборник-амортизатор 6 и затем в циклон 7, где отделяется от частиц материала. Высушенный материал удаляется с помощью разгрузочного устройства 8. Оработанный воздух для окончательной очистки от пыли проходит через фильтр 9, после чего удаляется в атмосферу.

Расход энергии в пневматических сушилках значителен, причем он снижается с уменьшением размера частиц материала, который не должен превышать 8—10 мм. Для сушки материалов с крупными частицами, а также для удаления из материала связанной влаги пневматические сушилки комбинируют с сушилками других типов. Таким образом, область применения пневматических сушилок ограничена условиями, указанными выше.

Контактные сушилки

Вакуум-сушильные шкафы. Простейшими контактными сушилками периодического действия являются вакуум-сушильные шкафы, которые в настоящее время используются для сушки малотоннажных продуктов в производствах с разнообразным ассортиментом продукции, где применение высокопроизводительных механизированных сушилок непрерывного действия экономически не оправдано.

Вакуум-сушильный шкаф (рис. XV-29) представляет собой цилиндрическую (реже прямоугольную) камеру 1, в которой размещены полые плиты 2, обогреваемые изнутри паром или горячей водой. Высушиваемый материал находится в лотках (противнях), установленных на плитах. Во время работы камера герметически закрыта и соединена с установкой для создания вакуума, например с поверхностным конденсатором и вакуум-насосом. Загрузка и выгрузка материала производятся вручную.

Как и другие вакуум-сушилки, вакуум-сушильные шкафы пригодны для сушки легкоокисляющихся, взрывоопасных и выделяющих вредные или ценные пары веществ. Однако они малопродуктивны и малоэффективны, поскольку сушка в них происходит в неподвижном слое при наличии плохо проводящих тепло зазоров между противнями и греющими плитами. Напряжение рабочей поверхности плит (со стороны материала) обычно не превышает 0,5—3,5 кг/(м²·ч) влаги.

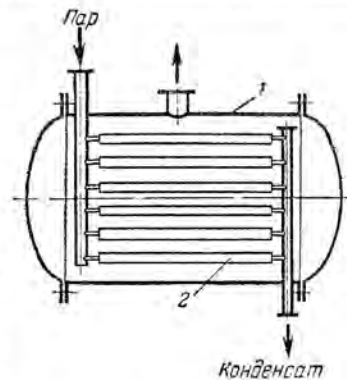


Рис. XV-29. Вакуум-сушильный шкаф:

1 — камера сушилки; 2 — полые плиты.

Гребковые вакуум-сушилки. В этих контактных сушилках периодического действия скорость сушки несколько увеличивается за счет перемешивания материала медленно вращающейся горизонтальной мешалкой с гребками; вместе с тем, они не требуют ручной загрузки и выгрузки материала подобно вакуум-сушильным шкафам.

Гребковая сушилка (рис. XV-30) состоит из цилиндрического корпуса 1 с паровой рубашкой 2 и мешалки 3. Гребки мешалки закреплены на валу взаимно перпендикулярно; на одной половине длины барабана гребки мешалки изогнуты в одну сторону, на другой половине — в противоположную. Кроме того, мешалка имеет реверсивный привод, автоматически меняющий каждые 5—8 мин направление ее вращения. Поэтому при работе мешалки материал (загруженный через люк 4) периодически перемещается от периферии к середине барабана и в обратном направлении. Вал мешалки может быть полым и через него можно также осуществлять нагрев высушиваемого материала. Свободно перекатывающиеся

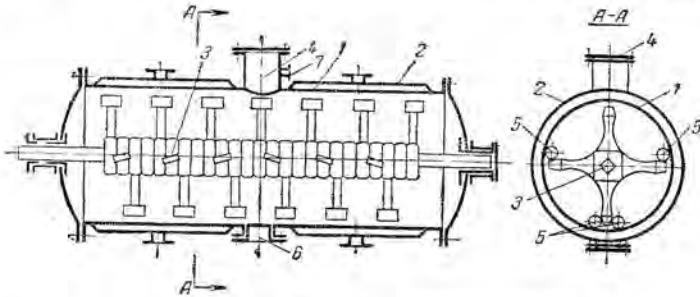


Рис. XV-30. Гребковая вакуум-сушилка:

1 — корпус сушилки; 2 — паровая рубашка; 3 — мешалка; 4 — загрузочный люк; 5 — трубы, способствующие перемешиванию материала; 6 — разгрузочный люк; 7 — штуцер для присоединения к вакууму.

между гребками трубы 5 способствуют разрушению комков и дополнительно перемешивают материал. Разгрузка высушенного материала производится через люк 6. Корпус сушилки соединен с поверхностным или барометрическим конденсатором и вакуум-насосом.

Производительность сушилки зависит от температуры греющего пара, величины разрежения и начальной влажности материала. В анилинокрасочной промышленности, где главным образом применяются эти сушилки, напряжение их поверхности по влаге колеблется в пределах 6—8 кг/(м²·ч), т. е. выше, чем для вакуум-сушильных шкафов, но сушильный агрегат более сложен и требует больших эксплуатационных расходов.

Следует отметить, что применение вакуумных сушилок в химической промышленности, несмотря на их более высокую стоимость и сложность по сравнению с атмосферными сушилками, диктуется технологическими соображениями: они пригодны для сушки чувствительных к высоким температурам, а также токсичных и взрывоопасных веществ, для получения высушенных продуктов повышенной чистоты, а также в тех случаях, когда необходимо улавливание (конденсация) паров неводных растворителей, удаляемых из материалов.

Вальцовые сушилки. В этих сушилках осуществляется непрерывная сушка жидкости и текучих пастообразных материалов при атмосферном давлении или при разрежении. Основной частью двухвалцовых сушилок (рис. XV-31), наиболее часто применяемых в химических производствах, являются вальцы — 2 и 3, медленно вращающиеся ($n = 2—10$ об/мин) в кожухе 1 навстречу друг другу. Сверху между вальцами непрерывно подается высушиваемый материал. Греющий пар поступает через полую цапфу внутрь каждого из вальцов, паровой конденсат отводится через сифонную трубку 4. Ввод пара и вывод конденсата про-

изводится со стороны, противоположной приводу 5. Вальцы могут также обогреваться горячей водой или высокотемпературными органическими теплоносителями.

Материал покрывает поверхность вальцов тонкой пленкой, толщина которой определяется величиной зазора между вальцами. Обычно ширина

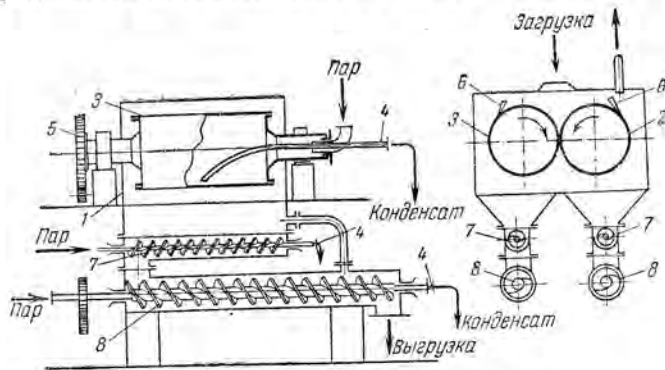


Рис. XV-31. Двухвальцовая сушилка:

1 — кожух; 2 — ведомый полый валец на подвижных подшипниках; 3 — ведущий полый валец (установленный неподвижно); 4 — сифонные трубки для отвода конденсата; 5 — привод; 6 — ножи, расположенные вдоль образующей каждого вальца; 7 — верхние досушиватели; 8 — нижние досушиватели.

зазора не превышает 0,5—1 мм и регулируется путем перемещения ведомого вальца 2, имеющего подвижные подшипники, относительно неподвижно установленного ведущего вальца 3. Высушивание материала происходит интенсивно в тонком слое в течение одного неполного оборота вальцов. Пленка подсушенного материала снимается ножами 6, расположенными вдоль образующей каждого вальца. Чем тоньше слой материала на вальцах, тем быстрее и равномернее он сушится. Однако вследствие малой продолжительности сушки часто требуется досушка материала, осуществляемая в горизонтальных лотках с паровым обогревом (досушивателях), в которых вращаются вали с гребками. В сушилке на рис. XV-31 материал после вальцов последовательно проходит сначала верхний досушиватель 7, затем нижний досушиватель 8.

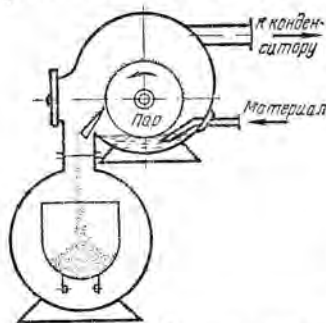


Рис. XV-32. Одновальцовая сушилка.

В одновальцовых сушилках (рис. XV-32) в корыте вращается один полый обогреваемый изнутри барабан (валец). Под ним имеется питающее устройство с мешалкой (на рисунке не показана). Материал тщательно перемешивается в ванне питающего устройства и наносится тонким слоем (толщиной 1—2 мм) на валец. В остальном работа сушилки не отличается от работы двухвальцовой сушилки.

Вакуумные вальцовые сушилки работают по тому же принципу, что и описанные выше, атмосферные, но в них все рабочие части находятся внутри герметичного кожуха, соединенного с установкой для создания вакуума. В вальцовых сушилках возможна эффективная сушка в тонком слое (пленке) материалов, не выдерживающих длительного воздействия высоких температур, например красителей. Продолжительность сушки регулируется числом оборотов вальцов. Однако в сушилках без досушивателей часто не достигается требуемая низкая конечная влажность материала.

В двухвальцовых сушилках напряжение поверхности вальцов по влаге колеблется (при сушке красителей) от 13—15 кг/(м²·ч) (атмосферные

сушилки) до 20—30 кг/(м²·ч) (вакуумные сушилки). Напряжение по влаге зависит от свойств высушиваемого материала и может достигать приблизительно 70 кг/(м²·ч).

Процесс контактной сушки нельзя интенсифицировать при применении топочных газов вследствие низких коэффициентов теплоотдачи от газов к стенкам вальцов. Однако повышение температуры греющей поверхности (без чрезмерного утолщения стенок вальцов) возможно в случае использования для нагрева высокотемпературных теплоносителей, например дифенильной смеси. При низких температурах сушки для обогрева может быть применена горячая вода.

Для сушки пастообразных материалов получили распространение одновальцовые формующие сушилки (рис. XV-33), работающие при атмосферном давлении. Барабан (валец) 1 сушилки имеет рифленую поверхность с кольцевыми канавками глубиной 6—10 мм. Паста из загрузочной воронки 2 вмазывается в канавки с помощью прижимного валика 3. За один оборот вальца в его канавках образуются отформованные палочки пористой структуры, которые легко выламываются небольшими кусочками посредством гребенчатого ножа 4. Досушка материала производится в барабанной или ленточной сушилке, в которую палочки отформованного материала поступают по транспортной ленте 5. Такие комбинированные сушилки называются соответственно вальцово-барабанными или вальцово-ленточными (см. рис. XV-33).

Барабанные контактные сушилки. В барабанной сушилке с передачей тепла через стенку (рис. XV-34) топочные газы, получаемые в топке 1, омывают барабан 2 снаружи, а затем проходят через внутренний цилиндр 3 и отсасываются вентилятором 4. Высушиваемый материал движется слева направо по кольцевому пространству между стенками барабана 2 и цилиндра 3 (направление движения материала на рисунке стрелками не указано).

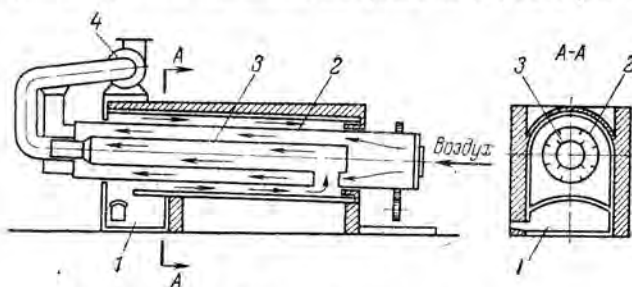


Рис. XV-34. Барабанная контактная сушилка:

1 — топка; 2 — барабан; 3 — внутренний цилиндр; 4 — вентилятор.

Наружный воздух без предварительного подогрева вводится в кольцевое пространство и движется противотоком по отношению к материалу. Подогрев воздуха осуществляется только внутри самого барабана. Такие сушилки применяются в тех случаях, когда, во избежание загрязнения высушиваемого материала, его соприкосновение с топочными газами недопустимо.

10. Специальные виды сушки и типы сушилок

К специальным видам сушки, как указывалось ранее (см. стр. 583) относятся: радиационная, диэлектрическая и сублимационная. Соответственно этим видам различают терморрадиационные, высокочастотные и сублимационные сушилки.

Терморрадиационные сушилки. В этих сушилках необходимое для сушки тепло сообщается инфракрасными лучами. Таким способом к материалу можно подводить удельные потоки тепла (приходящиеся на 1 м^2 его поверхности), в десятки раз превышающие соответствующие потоки при конвективной или контактной сушке. Поэтому при сушке инфракрасными лучами значительно увеличивается интенсивность испарения влаги из материала.

Однако при высушивании толстослойных материалов скорость сушки может определяться не скоростью подвода тепла, а скоростью внутренней диффузии влаги или требованиями, предъявляемыми к качеству высушиваемого материала (недопустимость коробления, нарушения структуры

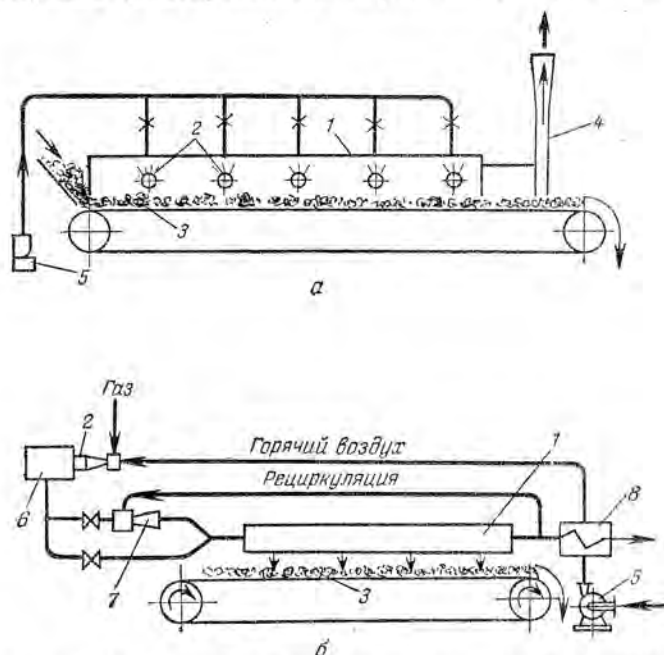


Рис. XV-35. Терморрадиационные сушилки с газовым обогревом:

а — открытым пламенем; б — продуктами сгорания газов; 1 — излучающая панель; 2 — газовая горелка; 3 — транспортер, на котором находится высушиваемый материал; 4 — выхлопная труба; 5 — вентилятор; 6 — камера сгорания; 7 — эжектор; 8 — воздухонагреватель.

и т. п.). Кроме того, в начальный период радиационной сушки под действием высокого температурного градиента влага может перемещаться вглубь материала до тех пор, пока под действием большей, противоположно направленной движущей силы (за счет градиента влажности) не начнется испарение влаги из материала. В связи с этим терморрадиационная сушка эффективна в основном для высушивания тонколистовых материалов или лакокрасочных покрытий.

Применяются терморрадиационные сушилки с электрическим и газовым обогревом.

В качестве электрических излучателей используют зеркальные лампы или элементы сопротивления (панельные или трубчатые), а также керамические нагреватели — электрические спирали, запрессованные в керамической массе. Все эти нагреватели более сложны и инерционны, чем лампы, но обеспечивают большую равномерность сушки.

Газовый обогрев обычно проще и экономичнее электрического. При газовом обогреве излучателями являются металлические или керамические плиты, которые нагреваются либо открытым пламенем, либо продуктами сгорания газов. По первой схеме обогрева излучающей панели 1

(рис. XV-35, а) открытым пламенем газовых горелок 2 производится со стороны, обращенной к материалу, который перемещается на транспортере 3. Бóльший к. п. д. и лучшие условия труда достигаются при применении второй схемы — с нагревом продуктами сгорания газов, движущимися внутри излучателя 1 (рис. XV-35, б). Газ и горячий воздух поступают в горелку 2. Продукты сгорания из камеры 6 направляются на обогрев излучающей поверхности. На пути они подсасывают в эжекторе 7 часть отработанных (рециркулирующих) газов для увеличения скорости потока теплоносителя и повышения коэффициента теплоотдачи от газов к поверхности излучения. Тепло отходящих газов используют для нагрева воздуха, поступающего в горелку 2, и в некоторых случаях — для предварительной подсушки материала.

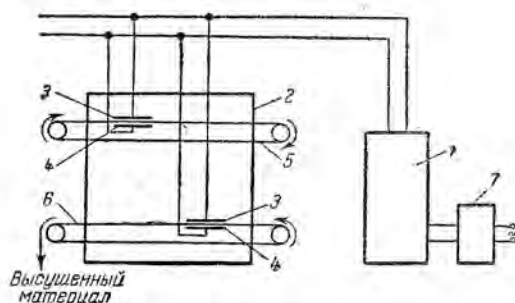


Рис. XV-36. Высокочастотная (диэлектрическая) сушилка:

1 — ламповый высокочастотный генератор; 2 — сушильная камера; 3, 4 — пластины конденсаторов; 5, 6 — бесконечные ленты, на которых находится высушиваемый материал; 7 — выпрямитель.

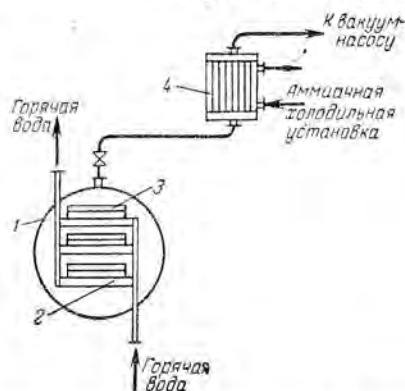


Рис. XV-37. Принципиальная схема сублимационной сушилки:

1 — сушильная камера (сублиматор); 2 — пустотелая плита; 3 — противень; 4 — конденсатор-вымораживатель.

В современных радиационных сушилках с газовым обогревом эффективно используют также излучающие насадки с беспламенным горением. Сущность этого способа нагрева заключается в пропускании смеси газов с воздухом через пористую плиту из огнеупорного материала со скоростью, превышающей скорость воспламенения смеси. При этом горение сосредоточивается на внешней поверхности раскаленной плиты, испускающей мощные потоки тепловой радиации.

Терморadiационные сушилки компактны и эффективны (для сушки тонколистовых материалов), но отличаются относительно высоким расходом энергии: 1,5—2,5 квт·ч на 1 кг испаренной влаги, что ограничивает область их применения.

Высокочастотные (диэлектрические) сушилки. Для высушивания толстослойных материалов, когда необходимо регулировать температуру и влажность не только на поверхности, но и в глубине материала, в ряде случаев эффективно применение сушки в поле токов высокой частоты. Таким способом можно, в частности, сушить пластические массы и другие материалы, обладающие диэлектрическими свойствами.

Высокочастотная сушилка (рис. XV-36) состоит из лампового высокочастотного генератора 1 и сушильной камеры 2. Переменный ток из сети поступает в выпрямитель 7, затем в генератор, где преобразуется в переменный ток высокой частоты. Этот ток подводится к пластинам конденсаторов 3 и 4, между которыми движется на ленте высушиваемый материал. Данная сушилка имеет две ленты 5 и 6, на которых последовательно высушивается материал. Под действием электрического поля высокой частоты ионы и электроны в материале (содержащего обычно некоторое количество электролита, например раствора солей) меняют направление движения синхронно с изменением знака заряда пластин конденсатора; дипольные молекулы приобретают вращательное движение, а неполярные моле-

кулы поляризуются за счет смещения их зарядов. Эти процессы, сопровождаемые трением, приводят к выделению тепла и нагреванию высушиваемого материала.

Изменяя напряженность электрического поля, можно регулировать температурный градиент между внутренними слоями материала и его поверхностью, т. е. регулировать скорость сушки, а также избирательно нагревать лишь одну из составных частей неоднородного материала.

В поле токов высокой частоты возможна быстрая (за счет усиленной термодиффузии влаги) и равномерная сушка толстослойных материалов. Однако сушка этим способом требует таких удельных расходов энергии, которые в несколько раз превышают соответствующие расходы при конвективной и контактной сушке (2,5—5 квт·ч на 1 кг испаренной влаги). Кроме того, оборудование сушилок является более сложным и дорогим в эксплуатации. Поэтому применение высокочастотной сушки рентабельно только в определенных условиях (например, для сушки дорогостоящих диэлектрических материалов) и требует технико-экономического обоснования в каждом конкретном случае. Методика расчета сушки токами высокой частоты подробно рассмотрена в специальной литературе*.

Сублимационные сушилки. Сушка материалов в замороженном состоянии, при которой находящая в них в виде льда влага переходит в пар, минуя жидкое состояние, называется сублимационной, или молекулярной. Сублимационная сушка проводится в глубоком вакууме (остаточное давление 1,0—0,1 мм рт. ст. или 133,3—13,3 н/м²) и соответственно — при низких температурах.

Принципиальная схема устройства сублимационной сушилки показана на рис. XV-37. В сушильной камере 1, называемой сублиматором, находятся пустотелые плиты 2, внутри которых циркулирует горячая вода. На плитах устанавливаются противни 3 с высушиваемым материалом, имеющие снизу небольшие бортики. Поэтому противни не соприкасаются поверхностью днища с плитами 2 и тепло от последних передается материалу преимущественно радиацией. Паро-воздушная смесь из сублиматора 1 поступает в трубы конденсатора-вымораживателя 4, в межтрубном пространстве которого циркулирует хладагент, например аммиак. Конденсатор включается в один циркуляционный контур с испарителем аммиачной холодильной установки и соединяется с вакуум-насосом, предназначенным для отсасывания неконденсирующихся газов и воздуха. В трубах конденсатора происходят конденсация и замораживание водяных паров. Для более удобного удаления льда обычно используют два конденсатора (на рис. XV-37 условно показан один), которые попеременно работают и размораживаются.

Процесс удаления влаги из материала протекает в три стадии: при снижении давления в сушильной камере происходит быстрое самозамораживание влаги и сублимация льда за счет тепла, отдаваемого самим материалом (при этом удаляется до 15% всей влаги), удаление основной части влаги сублимацией, что соответствует периоду постоянной скорости сушки, и удаление остаточной влаги тепловой сушкой.

Механизм переноса влаги (в виде пара) от поверхности испарения при сублимационной, или молекулярной, сушке специфичен: он происходит путем эффузии, т. е. свободного движения молекул пара без взаимных столкновений их друг с другом.

Сушка проводится при осторожном и мягком обогреве замороженного материала водой, потому что количество передаваемого тепла не должно превышать его расхода на сублимацию льда без его плавления. Непосред-

* Лебедев П. Д. Расчет и проектирование сушильных установок. М.—Л., Госэнергоиздат, 1963. 320 с.

ственно на сушку сублимацией расходуется умеренное количество тепла низкого потенциала (при температуре 40—50 °С), но суммарный расход энергии и эксплуатационные расходы больше, чем при любом другом способе сушки, исключая сушку в поле токов высокой частоты.

Применение этого дорогостоящего способа сушки целесообразно лишь в тех случаях, когда к высушенному продукту предъявляются высокие требования в отношении сохранения его свойств при длительном хранении. В настоящее время путем сублимации сушат главным образом ценные продукты, не выдерживающие обычно тепловой сушки и требующие продолжительного сохранения их биологических свойств (пенициллин и некоторые другие медицинские препараты, плазма крови, высококачественные пищевые продукты).