

Испарение жидкости из твердого материала может происходить при различных температурах, однако если парциальное давление паров жидкости в порах материала выше равновесного давления в окружающей среде, то для ускорения процесса сушки подводится тепло. В зависимости от способа подвода тепла для испарения жидкости и способа удаления образовавшихся паров различают следующие методы сушки:

контактная (кондуктивная) сушка, при которой тепло сообщается высушиваемому материалу каким-либо теплоносителем, действующим через поверхность нагрева, чаще всего используется насыщенный водяной пар, который при этом конденсируется. При контакте с поверхностью теплообмена (плоская стенка, трубный пучок и т.п.) высушиваемый материал нагревается. Испарившаяся жидкость уходит из материала в виде паров (например, пары растворителя), которые удаляются из сушилки и могут быть направлены на конденсацию и затем возвращены в технологический цикл. В контактных сушилках часто создают вакуум, что позволяет ускорить процесс сушки и проводить его при меньшей температуре высушиваемого материала, т.е. при увеличенной разности температур между теплоносителем и высушиваемым материалом;

дизлектрическая сушка, при которой материал высушивается в поле тока высокой частоты. Такой способ применяется для сушки толстолистных материалов, он позволяет регулировать температуру не только на его поверхности, но и в глубине материала;

В процессах нефтегазопереработки наиболее часто приходится иметь дело с газовой сушкой влажных материалов нагретым воздухом или горячими дымовыми газами и контактной сушкой, поэтому дальнейшее изложение материала ведется применительно к этим случаям сушки. Рассмотренные далее основные закономерности могут быть применены и при удалении других жидкостей из твердых материалов.

ОБЪЕМЫ ВОЗДУХА И ВОДЯНОГО ПАРА

Для расчета воздушных сушилок необходимо знать основные характеристики влажного воздуха (смесь воздуха с водяными парами): температуру, относительную влажность, влагосодержание, энтальпию. Температура воздуха или дымовых газов, используемых для сушки, выбирается в зависимости от свойств высушиваемого материала и может изменяться в широких пределах.

Относительной влажностью воздуха φ называется отношение массы водяного пара, фактически находящегося в воздухе, к массе насыщенного водяного пара, который мог бы быть в данном объеме при той же температуре. Эта величина изменяется от нуля для абсолютно сухого воздуха до 100 % (или единицы, если относительная влажность измеряется в долях единицы) для насыщенного.

Масса водяного пара, содержащегося в 1 м³ воздуха, численно равна плотности водяного пара ρ_n , находящегося в перегретом состоянии, а максимально возможное его содержание равно плотности насыщенного пара ρ_n при данной температуре воздуха. Следовательно,

$$\varphi = \rho_n / \rho_n.$$

Из уравнения состояния газов следует, что

$$\rho_n = \frac{p_n}{RT} \quad \text{и} \quad \rho_n = \frac{P_n}{RT},$$

откуда

$$\varphi = p_n / P_n. \quad (X.1)$$

Относительная влажность является показателем работоспособности воздуха при сушке: чем больше величина φ отличается от единицы, тем больше влаги может перейти из высушиваемого материала в воздух. При $\varphi = 100\%$ воздух полностью насыщен и влага больше не может испаряться в воздух. При нагревании и охлаждении воздуха величина φ изменяется вследствие изменения величины P_n при изменении температуры [см. уравнение (X.1)].

Характерным параметром влажного воздуха является его *влагосодержание* x , т.е. масса влаги в килограммах, приходящаяся на один килограмм сухого воздуха (кг/кг сухого воздуха). Эта характеристика не изменяется при нагревании и охлаждении воздуха.

В соответствии с уравнением состояния газов можно записать следующие выражения:

для водяного пара

$$\rho_n V = 47,1 T G_n,$$

для сухого воздуха в том же объеме V

$$\rho_v V = 29,3 T G_v.$$

Отсюда массы водяного пара и воздуха в объеме V будут равны

$$G_{\pi} = \frac{p_{\pi} V}{47,1 T} \quad \text{и} \quad G_{\text{в}} = \frac{p_{\text{в}} V}{29,3 T}.$$

Согласно определению влагосодержания, исходя из вышеприведенных уравнений, получим

$$x = \frac{G_{\pi}}{G_{\text{в}}} = \frac{29,3}{47,1} \cdot \frac{p_{\pi}}{p_{\text{в}}} = 0,622 \frac{p_{\pi}}{p_{\text{в}}}. \quad (\text{X.2})$$

Поскольку общее давление системы π равно сумме парциальных давлений водяного пара $p_{\pi} = \varphi P_{\pi}$ и сухого воздуха $p_{\text{в}}$, уравнение (X.2) можно записать следующим образом:

$$x = 0,622 \frac{p_{\pi}}{\pi - p_{\pi}} = 0,622 \frac{\varphi P_{\pi}}{\pi - \varphi P_{\pi}}. \quad (\text{X.3})$$

Плотность влажного воздуха определяют из выражения

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

Энтальпию влажного воздуха H , отнесенную к 1 кг сухого воздуха при температуре t (за начало отсчета принята температура 0°C), определяют по уравнению

$$H = C_{\text{в}} t + x H', \quad (\text{X.4})$$

где $C_{\text{в}}$ — средняя теплоемкость сухого воздуха в интервале температур от 0 до t ; H' — энтальпия водяного пара.

При температурах до $250-300^{\circ}\text{C}$ средняя теплоемкость воздуха может быть принята равной $C_{\text{в}} = 1 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C})$, или $0,24 \text{ ккал}/(\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C})$. В этих же пределах температур можно с достаточной точностью считать

$$H' = 595 + 0,46 t.$$

С учетом этого энтальпия влажного воздуха (в ккал/кг) может быть определена по следующему уравнению:

$$H = 0,24t + x(595 + 0,46t).$$

ÐÀÄÍ Î ÄÂÑÍ ÄÇ ÄËÄÆÍ Î ÑÒÛ È ÄËÄÛ ÑÂÇÈ ÄËÄËË Ñ Î ÄÒÄÐËÄËÎ Î

Практически любой твердый материал способен поглощать влагу из окружающей среды или отдавать ее окружающей среде. Это зависит от соотношения величин давления водяного пара во влажном материале $p_{\text{м}}$, обусловленного присутствием влаги и температурой, и парциальным давлением водяного пара p_{π} в окружающей среде. Процесс сушки протекает при условии, что $p_{\text{м}} > p_{\pi}$. Если $p_{\pi} > p_{\text{м}}$, то материал будет поглощать влагу.

Давление водяного пара во влажном материале $p_{\text{м}}$ зависит от влажности материала, температуры и вида связи влаги с материалом. При увеличении температуры и влажности материала величина $p_{\text{м}}$ возрастает.

Влажность материала называется равновесной, если этой влажности отвечает условие $p_m = p_n$. В этом случае достигается равновесие процессов испарения и поглощения влаги и процесс сушки прекращается.

По характеру связи влаги с твердым материалом различают следующие виды влаги:

поверхностная — влага, находящаяся на поверхности твердого материала и в порах крупных частиц;

капиллярная — влага, находящаяся в мелких порах, образующих капилляры;

адсорбционно-химическая — влага, связанная с твердым материалом за счет адсорбции или химического взаимодействия;

набухания — влага, поглощенная телами, имеющими клеточную структуру.

Поверхностная влага испаряется с поверхности твердого материала, как со свободной поверхности воды.

Капиллярная влага связана с твердым материалом более прочно, чем поверхностная, и имеет меньшую величину p_m . Адсорбционно-химическая влага и влага набухания характеризуются еще меньшим значением p_m , поэтому они наиболее трудно поддаются удалению.

При сушке влажность материала может быть снижена настолько, что давление водяного пара в материале станет меньше, чем в атмосферном воздухе. Такой материал называется *гигроскопическим*. Он способен поглощать влагу из воздуха и должен храниться в упаковке, исключающей его контакт с атмосферным воздухом.

Ἰ ἈΘΑΡΕἈΕΥΪ ὙΕ Ε ὈΑΪ ΕΪ ἈΪ Ε ἈΑΕΑΪ Ἲ Ἴ ΔΪ ὈΑϸΝἈ ΝΌϺΕἺ

Установка для сушки атмосферным воздухом (рис. X-1) состоит из подогревателя воздуха (калорифера), в котором воздух сообщается тепло $Q_{\text{кал}}$, и сушилки. В калорифере воздух нагревается от температуры t_0 до температуры $t_1 > t_0$. В результате другие параметры воздуха изменяются следующим образом: $\varphi_1 < \varphi_0$, $H_1 > H_0$, а $x_1 = x_0$ согласно определению этих параметров.

В сушилке воздух отдает часть своего тепла на испарение влаги массой W , которая затем удаляется из сушилки вместе с воздухом. Кроме того, тепло воздуха расходуется на нагрев от температуры t_n до температуры t_k высушиваемого материала, поступающего на сушку в количестве G_n и уходящего в количестве G_k , на нагрев транспортных устройств массой G_t (ленты, вагонетки и т.п.), а также на потери в окружающую среду $Q_{\text{пот}}$. В сушилку может вводиться также дополнительно тепло $Q_{\text{доб}}$ через поверхность нагрева.

Параметры уходящего из сушилки воздуха отвечают следующим неравенствам: $x_2 > x_1$, $t_2 < t_1$, $\varphi_2 > \varphi_1$. Обычно $H_2 < H_1$. Хотя могут быть и

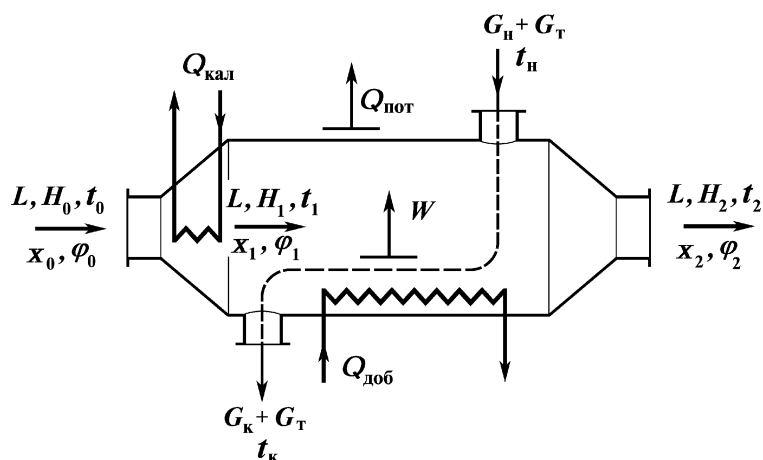


Рис. X-1. Схема к составлению материального и теплового балансов сушки воздухом

случаи, когда $H_2 \geq H_1$, если сообщается большое количество добавочного тепла $Q_{доб}$.

Материальный баланс для влажного материала можно записать в следующем виде:

$$G_H = G_K + W.$$

Если обозначить через ω относительную влажность материала, то массу абсолютно сухого материала G_c можно выразить через начальное и конечное состояния высушиваемого материала:

$$G_H = G_c + W_H$$

или

$$G_c = G_H - W_H = G_H(1 - \omega_H). \quad (X.5)$$

Соответственно

$$G_K = G_c + W_K$$

или

$$G_c = G_K - W_K = G_K(1 - \omega_K). \quad (X.6)$$

Отсюда

$$G_K = \frac{G_c}{1 - \omega_K} = G_H \frac{1 - \omega_H}{1 - \omega_K}. \quad (X.7)$$

Из уравнения (X.7) можно определить выход высушиваемого продукта G_K .

Массу испарившейся влаги W можно найти из следующего выражения:

$$W = G_{\text{н}} \frac{\omega_{\text{н}} - \omega_{\text{к}}}{1 - \omega_{\text{к}}}. \quad (\text{X.8})$$

Кроме того, можно составить баланс влаги в воздухе. Масса влаги, вводимой в сушилку с воздухом, составляет $Lx_1 = Lx_0$; к ней добавляется масса влаги W и тогда масса влаги в уходящем из сушилки воздухе будет равна

$$Lx_2 = Lx_0 + W.$$

Отсюда

$$L = \frac{W}{x_2 - x_0}. \quad (\text{X.9})$$

Разделив обе части уравнения (X.9) на W , получим удельный расход воздуха l , т.е. массу воздуха, необходимую для удаления 1 кг влаги

$$l = \frac{L}{W} = \frac{1}{x_2 - x_0}. \quad (\text{X.10})$$

Рассмотрим тепловой баланс сушилки. Тепло вносится в сушилку нагретым воздухом, влажным материалом, транспортными средствами и в виде добавочного тепла. Из сушилки тепло уносится уходящим воздухом, высушенным материалом, транспортными средствами и теряется в окружающую среду.

Уравнение теплового баланса имеет вид:

$$LH_1 + G_{\text{н}} C_{\text{м.н}} t_{\text{н}} + G_{\text{т}} C_{\text{т}} t_{\text{н}} + Q_{\text{доб}} = LH_2 + G_{\text{к}} C_{\text{м.к}} t_{\text{к}} + G_{\text{т}} C_{\text{т}} t_{\text{к}} + Q_{\text{пот}}, \quad (\text{X.11})$$

где $C_{\text{м}}$ — теплоемкость влажного материала, определяемая по уравнению

$$C_{\text{м}} = (1 - \omega)C_0 + \omega \cdot 1,$$

где C_0 — теплоемкость абсолютно сухого материала.

Приход тепла с поступающим материалом можно представить следующим образом:

$$G_{\text{н}} C_{\text{м.н}} t_{\text{н}} = G_{\text{к}} C_{\text{м.к}} t_{\text{к}} + W \cdot 1 \cdot t_{\text{н}}. \quad (\text{X.12})$$

С учетом уравнений (X.11) и (X.12) тепловой баланс можно записать в следующем виде:

$$L(H_1 - H_2) = G_{\text{к}} C_{\text{м.к}} (t_{\text{к}} - t_{\text{н}}) + G_{\text{т}} C_{\text{т}} (t_{\text{к}} - t_{\text{н}}) + Q_{\text{пот}} - (Q_{\text{доб}} + W t_{\text{н}}). \quad (\text{X.13})$$

В левой части уравнения (X.13) находится тепло, которое отдается нагретым воздухом в сушилке и расходуется на нагрев материала

$$Q_{\text{м}} = G_{\text{к}} C_{\text{м.к}} (t_{\text{к}} - t_{\text{н}}),$$

нагрев транспортных средств

$$Q_T = G_T C_T (t_K - t_H),$$

восполнение потерь тепла в окружающую среду; оно частично компенсируется добавочным теплом $Q_{\text{доб}}$ и начальным теплосодержанием влаги в материале $Q_W = W t_H$.

Уравнение (X.13) запишется в следующем виде:

$$L(H_1 - H_2) = Q_M + Q_T + Q_{\text{пот}} - (Q_{\text{доб}} + Q_W). \quad (\text{X.14})$$

Разделим левую и правую части уравнения (X.14) на W и обозначим стоящие в правой части величины через q с соответствующим индексом:

$$l = \frac{L}{W}; \quad q_M = \frac{Q_M}{W}; \quad q_T = \frac{Q_T}{W}; \quad q_{\text{пот}} = \frac{Q_{\text{пот}}}{W}; \quad q_{\text{доб}} = \frac{Q_{\text{доб}}}{W}; \quad q_W = \frac{Q_W}{W},$$

тогда уравнение теплового баланса можно записать следующим образом:

$$l(H_1 - H_2) = q_M + q_T + q_{\text{пот}} - (q_{\text{доб}} + q_W) \quad (\text{X.15})$$

или

$$\frac{1}{x_2 - x_0} (H_1 - H_2) = q_M + q_T + q_{\text{пот}} - (q_{\text{доб}} + q_W). \quad (\text{X.16})$$

Начальные параметры воздуха t_0 и φ_0 принимаются по справочным метеорологическим данным, соответствующим данному географическому пункту. Затем по величине t_0 , используя справочные таблицы свойств насыщенного водяного пара, по уравнению (X.3) находят начальное влагосодержание воздуха x_0 , поступающего в сушильную установку. Далее, выбрав наивысшую температуру сушки t_1 и, учитывая, что $x_1 = x_0$, по уравнению (X.4) находят энтальпию H_1 поступающего в сушилку воздуха. Затем по уравнению (X.16) определяют величины x_2 и t_2 , при этом одной из этих величин приходится задаваться. Обычно задаются величиной температуры уходящего воздуха t_2 , используя данные о работе сушилок соответствующего назначения. При известной температуре t_2 из уравнения (X.16) определяют величину x_2 . Если полученное влагосодержание x_2 и соответствующая ему относительная влажность φ_2 имеют желательные величины, то по уравнению (X.10) определяют удельный l и затем полный L расходы воздуха и количество тепла, сообщаемое в калорифере:

$$Q_{\text{кал}} = L(H_1 - H_2).$$

Полученная величина $Q_{\text{кал}}$ служит для определения расхода теплоносителя и теплообменной поверхности калорифера.

Расчет основных параметров процесса сушки может быть выполнен также с использованием H - x диаграммы влажного воздуха.

АЭЛАДАИ Ì À Н - х АЭВ АЭАЕÍ Î Ã Î Ã ÇАООА

Диаграмма $H-x$ (энтальпия — влагосодержание влажного воздуха), предложенная Л.К. Рамзиным, приведена на рис. X-2. Диаграмма построена в косоугольных координатах: на оси ординат отложена энтальпия воздуха H , на оси абсцисс, проведенной под углом 135° к оси ординат, — влагосодержание воздуха x .

Величины x , отложенные на оси абсцисс, спроектированы на вспомогательную горизонтальную ось. Поэтому линии $x = \text{const}$ на диаграмме вертикальные, а линии $H = \text{const}$ наклонены к оси ординат под углом 45° .

Для построения изотерм на диаграмме используется уравнение (X.4), которое при постоянной температуре t представляет собой уравнение прямой линии в координатах $H-x$.

Для построения линий $\varphi = \text{const}$ используется уравнение (X.3). При относительной влажности φ задаются рядом температур, для которых определяют давление насыщенного водяного пара (по таблицам) и соответствующие влагосодержания. По полученным данным для соответствующих x и t строят линии $\varphi = \text{const}$, которые на диаграмме представляют расходящийся пучок выпуклых кривых, проходящих через начало координат.

На диаграмме $H-x$, приведенной на рис. X-2 для случая, когда общее давление в системе равно атмосферному, кривые $\varphi = \text{const}$ заканчиваются при пересечении с изотермой $99,4^\circ\text{C}$ и далее проведены вертикально вверх.

Указанная изотерма соответствует температуре кипения воды при атмосферном давлении; при этой и более высокой температуре параметр "относительная влажность" теряет смысл, так как при таком давлении смеси воздуха с водяным паром могут существовать в любых соотношениях.

При помощи диаграммы $H-x$ можно по любым двум заданным параметрам влажного воздуха найти точку, соответствующую данному состоянию воздуха, и определить остальные два параметра. Например, при температуре воздуха $t = 50^\circ\text{C}$ и относительной влажности $\varphi = 70\%$ определяют точку A (рис. X-3), для которой находят влагосодержание $x = 0,0608$ кг влаги/кг сухого воздуха и энтальпию $H = 207,25$ кДж/кг сухого воздуха.

Рабочим полем диаграммы является область, лежащая выше кривой $\varphi = 100\%$ (насыщенный влагой воздух).

С помощью диаграммы $H-x$ легко графическим путем определить точку росы и предел охлаждения воздуха в изоэнтальпийных условиях.

Точкой росы называют ту температуру, охлаждаясь до которой при постоянном влагосодержании воздух достигнет полного насыщения водяными парами и происходит конденсация водяных паров, содержащихся в газе или воздухе.

На рис. X-4 приведено графическое построение точки росы B для воздуха с начальными параметрами, отвечающими точке A . Точка росы определяется как изотерма t_p , проходящая через точку пересечения B линии $\varphi = 100\%$ и влагосодержания x_1 .

Температура мокрого термометра. При изотермическом взаимодействии воздуха с влажным материалом воздух будет охлаждаться, отдавая свое тепло материалу и одновременно пополняя свою энтальпию за счет энтальпии водяных паров, переходящих из влажного материала в воздух. В этих

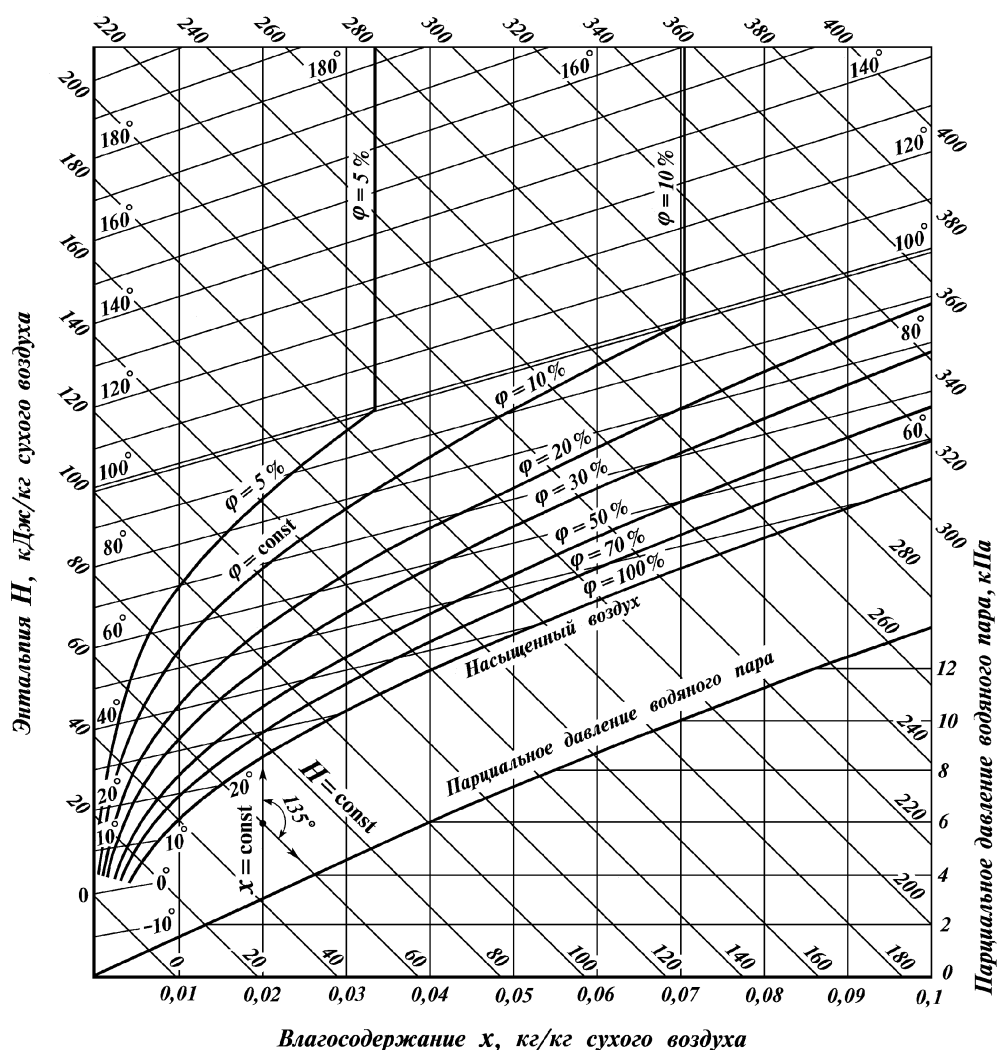


Рис. X-2. Диаграмма $H - x$ для влажного воздуха

условиях температура понижается, а энтальпия остается постоянной. Этот изоэнтальпийный процесс будет протекать до полного насыщения воздуха водяными парами, т.е. до температуры, при которой $\varphi = 100\%$. На диаграмме $H-x$ (рис. X-5) из точки А проводят линию $H = \text{const}$ до пересечения в точке В с линией $\varphi = 100\%$. Изотерма $t_{\text{м.т.}}$, проходящая через точку В, соответствует пределу охлаждения воздуха в изоэнтальпийных условиях и называется *температурой мокрого термометра*.

Потенциалом сушки ε называется разность между температурой воздуха $t_{\text{в}}$ и температурой мокрого термометра $t_{\text{м.т.}}$

$$\varepsilon = t_{\text{в}} - t_{\text{м.т.}}$$

Рис. X-3. Определение параметров влажного воздуха с помощью диаграммы $H - x$ по двум заданным параметрам

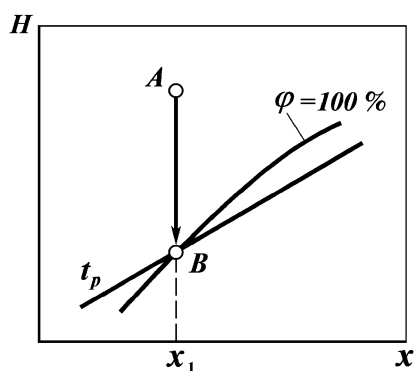
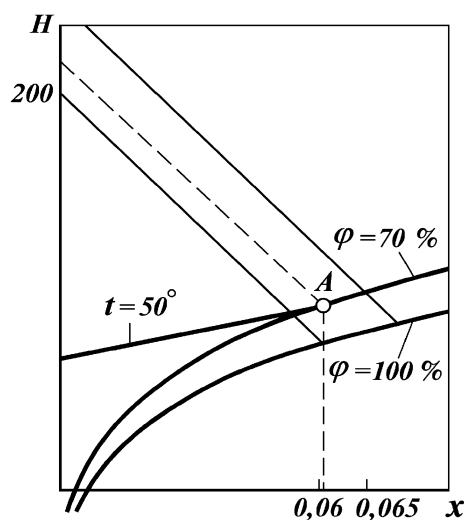


Рис. X-4. Определение точки росы на диаграмме $H - x$

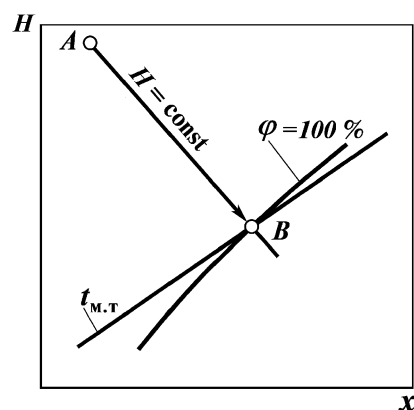


Рис. X-5. Определение температуры мокрого термометра на диаграмме $H - x$

Потенциал сушки характеризует способность воздуха поглощать влагу из материала. Чем больше потенциал сушки, тем выше скорость испарения влаги из материала. При полном насыщении воздуха влагой $t_B = t_{м.т}$ потенциал сушки ϵ становится равным нулю.

ΐ ΐ ÐÄÄÄËÁÍ ÈÄ ÐÄÑÕÎ ÄÄ ÄÎ ÇÄÓÕÀ È ÕÄÎ ÈÄ
Í Ä ÑÓØËÓ ΐ ΐ ÄËÄÐÄÎ ì Ä H - x

На диаграмме $H-x$ процесс сушки представляется следующим образом (рис. X-6). Воспользовавшись справочными данными, наносим на диаграмму точку A, характеризующую состояние поступающего в калорифер воздуха — его температуру t_0 и относительную

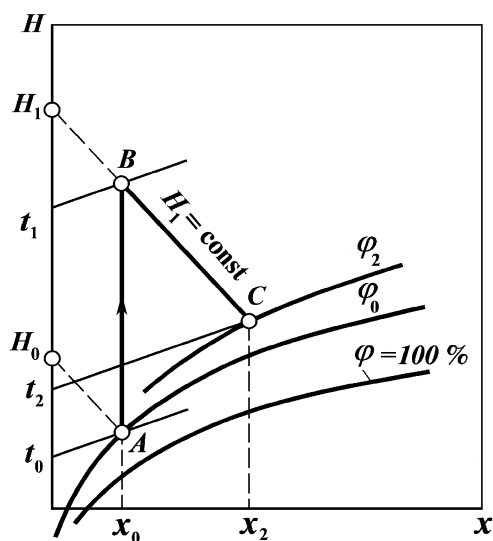


Рис. X-6. Графическое представление процесса теоретической сушки на диаграмме $H - x$

влажность φ_0 . Этим параметрам соответствует влагосодержание воздуха x_0 .

Процесс подогрева воздуха в калорифере от температуры t_0 до температуры t_1 характеризуется неизменным влагосодержанием воздуха $x_0 = x_1$ и изображается на диаграмме вертикальной прямой AB , точка B которой отвечает изотерме t_1 .

Чтобы представить дальнейшее изменение состояния воздуха в процессе прямой сушки, обратимся к уравнению (X.15), записав его сокращенно в следующем виде:

$$l(H_1 - H_2) = \Delta, \quad (\text{X.17})$$

где Δ — удельные затраты тепла.

При отсутствии подвода дополнительного тепла в сушилку, когда $Q_{\text{доб}} = 0$, обычно имеем $q_m + q_t + q_{\text{пот}} > q_w$, т.е. $\Delta > 0$, а энтальпия уходящего из сушилки воздуха меньше энтальпии поступающего воздуха ($H_2 < H_1$).

Если в сушилку подводится дополнительное тепло $Q_{\text{доб}}$, то может оказаться, что $q_m + q_t + q_{\text{пот}} < q_{\text{доб}} + q_w$, т.е. $\Delta < 0$, а энтальпия воздуха, уходящего из сушилки, повышается ($H_2 > H_1$).

Можно подобрать такие условия сушки, при которых $q_m + q_t + q_{\text{пот}} = q_{\text{доб}} + q_w$, т.е. $\Delta = 0$ и $H_1 = H_2 = \text{const}$.

Сушка, при которой энтальпия воздуха в сушилке не меняется, называется *теоретической*.

Возможность осуществления такого процесса сушки заключается в том, что тепло, отдаваемое при охлаждении воздуха от температуры t_1 до температуры t_2 и обеспечивающее испарение влаги, вновь возвращается к нему с парами влаги, которые смешиваются с воздухом.

На диаграмме $H-x$ процесс теоретической сушки представляется прямой $H = \text{const}$, идущей из точки B (см. рис. X-6) направо вниз, в сторону больших влагосодержаний воздуха. Заканчивается эта линия в точке C на изотерме t_2 или на линии φ_2 в зависимости от заданного параметра уходящего из сушилки воздуха. Абсцисса точки C определяет влагосодержание уходящего воздуха x_2 . Зная x_2 и x_0 , по уравнению (X.10) определяют удельный расход воздуха l , его расход $L = lW$ и количество подводимого в калорифер тепла $Q_{\text{кал}} = L(H_1 - H_0)$. Все используемые при расчетах величины (x_0 , x_2 , H_0 , H_1) определяются по диаграмме $H-x$.

В тех случаях, когда $\Delta \neq 0$, точка C должна лежать выше или ниже линии $H = \text{const}$, отвечающей теоретической сушке.

Предположим (рис. X-7), что точка C соответствует состоянию уходящего из сушилки воздуха при $\Delta > 0$, т.е. $H_1 < H_2$. Соединим точку C с точкой B и на линии BC возьмем произвольную точку C_1 . Проведем горизонтальные и вертикальные прямые, получим точки D , D_1 и E , E_1 . Из подобия соответствующих треугольников получим:

$$\frac{CE}{CD} = \frac{C_1 E_1}{C_1 D_1}.$$

Так как в точке E энтальпия воздуха равна H_1 , а в точке C — H_2 , то соответствующие отрезки будут равны $CE = H_1 - H_2$ и $DC = x_2 - x_0$. Следовательно,

$$\frac{CE}{CD} = \frac{H_1 - H_2}{x_2 - x_0}.$$

С другой стороны, из уравнений (X.10) и (X.17) имеем

$$\frac{H_1 - H_2}{x_2 - x_0} = \Delta,$$

т.е.

$$\frac{CE}{CD} = \Delta = \frac{H_1 - H_2}{x_2 - x_0}.$$

Если координаты точки C_1 обозначим через x и H , то отрезки $C_1 E_1 = H_1 - H$ и $C_1 D_1 = x - x_0$. Отсюда получим следующее соотношение:

$$\frac{CE}{CD} = \frac{C_1 E_1}{C_1 D_1} = \Delta = \frac{H_1 - H_2}{x_2 - x_0} = \frac{H_1 - H}{x - x_0}$$

или

$$H_1 - H = \Delta(x - x_0).$$

Следовательно, линия сушки BC связывает величину Δ с начальными параметрами воздуха H_1 и x_0 и текущими координатами H и x .

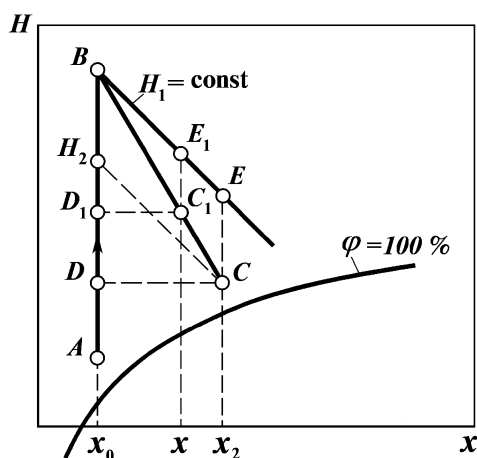


Рис. X-7. Построение рабочей линии сушки на диаграмме $H-x$

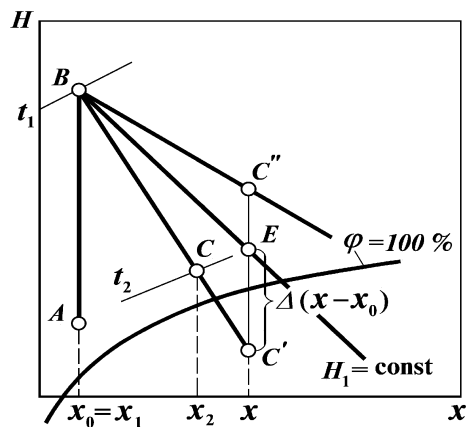


Рис. X-8. Определение линии сушки на диаграмме $H-x$

Основываясь на этом, можно найти направление линии сушки для любого случая.

Для этого (рис. X-8) из произвольной точки E , лежащей на линии $H_1 = \text{const}$ и проходящей через точку B , находящуюся на изотерме t_1 , откладываем вниз (при $\Delta > 0$) отрезок EC' , равный $\Delta(x - x_0)$. Соединив точку C' с точкой B , получим направление линии сушки. Точка C , находящаяся на линии сушки, отвечает действительному состоянию уходящего воздуха и определяется одним из его параметров, обычно, t_2 или ϕ_2 . Абсцисса точки C соответствует влагосодержанию уходящего воздуха x_2 .

Если $\Delta < 0$, то вверх от точки E откладываем отрезок EC'' , равный $\Delta(x_2 - x_0)$. Тогда линией сушки будет прямая BC'' .

При расчете газовых сушилок, работающих на дымовых газах, можно пользоваться диаграммой $H-x$, построенной для высоких температур, поскольку разница энтальпий дымовых газов и нагретого до высоких температур воздуха невелика и, как правило, не превышает 1 %. В этом случае на диаграмме $H-x$ будет отсутствовать линия подогрева дымовых газов AB . Построение начинают с точки B , положение которой определяется температурой дымовых газов t_1 и их влагосодержанием x_1 (или энтальпией H_1) на входе в сушилку.

Сравнивая газовые и воздушные сушилки, необходимо учитывать, что вследствие более высокой температуры дымовых газов их влагоемкость значительно больше влагоемкости воздуха и расход топлива в воздушных сушилках больше, чем при работе на дымовых газах. Кроме того, воздушная сушилка нуждается в установке калорифера, что удорожает стоимость установки. Поэтому сушка дымовыми газами оказывается обычно экономичнее воздушной, особенно в случае использования отходящих дымовых газов котельных, трубчатых печей и т.п.

Однако при сушке топочными газами есть опасность загрязнения высушиваемого материала золой, сажей, сернистым ангидридом.

Если материал может окисляться кислородом воздуха, то сушку осуществляют в нейтральной среде, используя азот, двуокись углерода и другие газы.

ΕΞΕΙΛΑΘΕΝΑ ΛΑÇÎ ÂÎ Ε ΝÓØÊÈ

Сушка представляет собой нестационарный массообменный процесс, скорость которого меняется в ходе процесса. Типичная кривая зависимости относительного влагосодержания материала (отношение массы влаги к массе сухого материала) от продолжительности сушки приведена на рис. X-9.

При построении такой кривой образцы высушиваемого материала, влажность которых известна, взвешивают через короткие промежутки времени. Режим сушки поддерживают постоянным, сохраняя скорость подачи, температуру и влажность нагретого воздуха. На основании полученных данных строят кривую зависимости влагосодержания материала от продолжительности сушки. Обычно влагосодержание материала понижается сначала равномерно (участок AB), а затем замедленно.

Чтобы характеризовать интенсивность сушки, пользуются показателем скорости сушки C [кг/(м²·с)], под которым понимают массу влаги, удаляемой с единицы поверхности высушиваемого материала в единицу времени, т.е.

$$C = \frac{dW}{Fdt}.$$

Имея кинетическую кривую сушки (см. рис. X-9), величину dW/dt можно найти графическим дифференцированием, проводя касательные к кривой в различных точках и измеряя их наклон, например, $m = 0a/0b$ для точки B'. При известных значениях поверхности образца F и его массе G_c можно вычислить значение $C = mG_c/(F \cdot 60)$.

Типичная кривая скорости сушки представлена на рис. X-10. Общую продолжительность сушки можно разделить на четыре периода. Начальный, обозначенный через τ_1 , соответствует разогреву материала. Затем наступает период постоянной скорости сушки продолжительностью τ_2 , который сменяется периодом равномерно падающей скорости сушки, обозначенным через τ_3 . В конце обычно наблюдается период τ_4

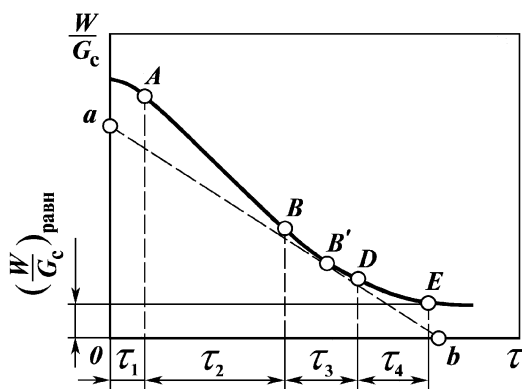


Рис. X-9. Кинетическая кривая сушки материала

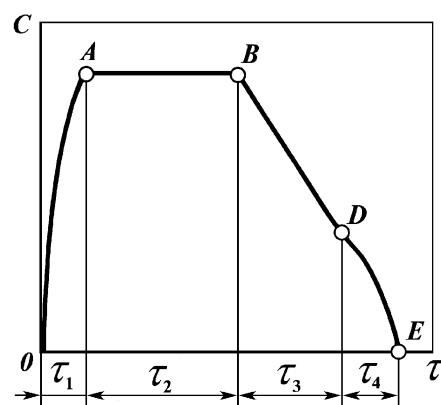


Рис. X-10. Кривая скорости сушки

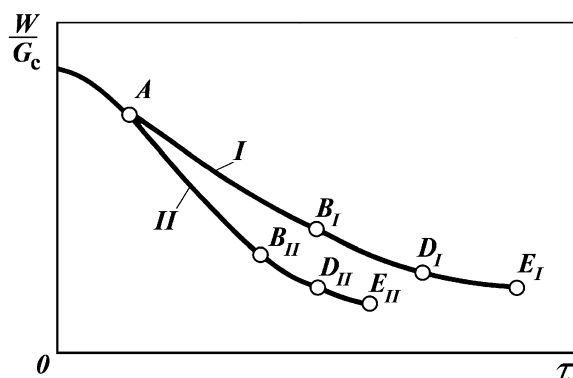


Рис. X-11. Варианты (I, II) кривых сушки одного и того же материала

неравномерно падающей скорости сушки. Для некоторых материалов те или иные периоды могут отсутствовать.

Постоянная скорость сушки наблюдается в тех случаях, когда убыль влаги с поверхности материала успевает компенсироваться поступлением ее из внутренних слоев материала. В этом случае скорость сушки лимитируется процессом массоотдачи — переходом влаги с поверхности материала в поток газа.

При дальнейшем снижении содержания влаги в материале скорость сушки будет лимитироваться скоростью передачи влаги к поверхности материала за счет массопроводности. При достижении равновесной с газовой фазой влажности скорость сушки уменьшится до нуля.

При использовании кривых сушки, полученных в лабораторных условиях, следует иметь в виду, что даже для одного и того же материала они справедливы лишь в узких пределах условий проведения опыта. Так, например, при сушке одного и того же материала можно получить различные кривые сушки I и II (рис. X-11), если будут различаться ее температуры, скорости подачи и влагосодержание воздуха, а также размеры образцов.

ЕІ І ÑÒÐÓÊÖÈÈ ÅÀÇĲ ÂÛÕ ÑÓØÈÈĲ Ê

В нефтегазопереработке встречаются разнообразные конструкции сушилок, многие из которых предназначены для сушки конкретных материалов и встречаются лишь в виде единичных установок. Вместе с тем ряд конструкций получил широкое применение, некоторые из которых рассмотрены ниже.

Ленточные сушилки (рис. X-12) предназначены для непрерывной сушки горячим воздухом сыпучих (зернистых, гранулированных, волокнистых) взрыво- и пожаробезопасных нетоксичных продуктов с начальной влажностью до 75 %.

Типовая конструкция сушилок этого вида представляет собой прямоугольный короб, разделенный по длине на секции (от 3 до 10), а по ширине на два коридора. В правом (по ходу продукта) коридоре размещен непрерывный транспортный конвейер (лента), на котором перемещается продукт, подлежащий сушке. В левом коридоре расположены паровые калориферы, циркуляционные вентиляторы и газоходы.

Высушиваемый материал подается на горизонтальную бесконечную перфорированную ленту 1, которая изготавливается из металлической плетеной сетки или перфорированных пластин. Лента может быть и сплошной, выполненной из полотна или прорезиненной ткани.

Для перемещения и натяжения ленты сушилка оснащается приводной и натяжной станциями, между которыми установлены промежуточные секции с вентиляторами 3 и калориферами 5. Для выравнивания влажности материала по высоте слоя установлены ворошители 2, выполненные в виде валков с пальцами.

В ленточных сушилках всех типоразмеров и моделей воздух, нагреваемый калориферами промежуточных секций, циркуляционными вентиляторами через воздухораспределительную решетку 4, расположенную над лентой, подается сверху вниз на слой продукта, продувает его и затем частично поступает через калорифер на вентилятор, а частично — по каналу отработанного воздуха выводится из аппарата. При помощи заслонок, установленных на каналах подачи свежего и отвода отработанного воздуха, легко осуществляется прямоточная, противоточная или смешанная схема движения воздуха и продукта.

Привод ленты, состоящий из мотора-вариатора, редуктора и цепной передачи, размещен в приводной станции; здесь же установлено разгрузочное устройство шнекового типа 6. Скорость движения ленты выбирается с таким расчетом, чтобы за время пребывания в сушилке материал успел высохнуть. Величину скорости можно изменять с помощью вариатора. Ширина ленты составляет 1,2 или 2 м, а рабочая площадь поверхности ленты изменяется от 7,2 до 40 м², потребляемая мощность — от 22 до 137 кВт. Производительность по испаренной влаге для ленточных сушилок различных типов изменяется от 35 до 600 кг/ч.

На рис. X-13 показана схема ленточной сушильной установки для сушки гранулированных токсичных взрыво- и пожароопасных продуктов. Особенностью конструкции является повышенная герметичность, которая обеспечивается корпусом 2 цилиндрической формы.

Исходный продукт подается на транспортную ленту сушилки 1, где продувается горячим теплоносителем сверху вниз и высушивается до требуемой влажности. Теплоноситель, получаемый в выносных калориферах 9, подается воздуходувкой 10 в каждую секцию сушилки, а отработанный теплоноситель отбирается также из каждой секции и, пройдя очистку в рукавном фильтре 3, выбрасывается вентилятором 6 в атмосферу.

Готовый продукт через двойной пылевой затвор 8 удаляется из сушилки. Просыпавшиеся через транспортную ленту средние частицы готового продукта собираются скребковым конвейером 7 и через шлюзовый питатель 5 удаляются из сушилки. Мелкие частицы готового продукта, уловленные в рукавном фильтре 3, собираются шнековым питателем 4 и удаляются из сушилки через шлюзовый питатель 5.

Установка оснащена системой автоматического управления, парового пожаротушения и взрывными предохранительными мембранами.

Барабанная сушилка (рис. X-14). Барабанная сушилка применяется для сушки сыпучих, зернистых и мелкокусковых материалов. В сушилках этого типа тепло сушильного агента непосредственно передается высушиваемому материалу во вращающемся сушильном барабане. В качестве сушильного агента используется нагретый воздух или дымовые газы.

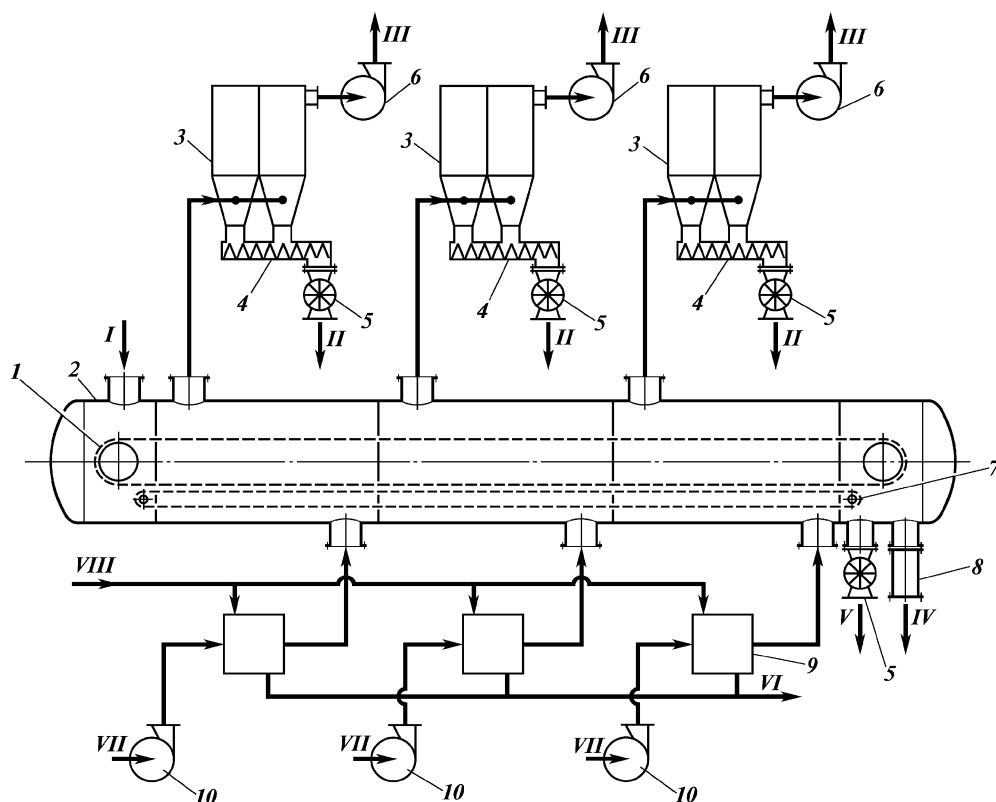


Рис. X-13. Схема сушильной установки с герметичной сушилкой:

1 – ленточная сушилка; 2 – цилиндрический корпус; 3 – рукавный фильтр; 4 – шнековый питатель; 5 – шлюзовый питатель; 6 – вентилятор; 7 – скребковый конвейер; 8 – двойной пылевой затвор; 9 – калорифер; 10 – воздуходувка. Потoki: I – исходный материал; II – мелкие частицы готового продукта; III – смесь теплоносителя и паров влаги; IV – готовый продукт; V – средние частицы готового продукта; VI – конденсат; VII – воздух; VIII – водяной пар

Основным узлом сушилки является цилиндрический сварной барабан 4, опирающийся бандажми 3 на опорные ролики 10. Для предотвращения продольного перемещения барабана служат упорные ролики 8. Барабан устанавливают с наклоном к горизонту ($1\div4^\circ$) в сторону выгрузки продукта. Привод барабана осуществляется через зубчатый венец 5. Внутренняя полость барабана заполнена секторной перевалочной насадкой 11, обеспечивающей перераспределение материала по сечению барабана и лучший его контакт с сушильным агентом. Во избежание сплющивания барабана он снабжен несколькими кольцевыми накладками 6, толщина которых в $1,5\div2$ раза превышает толщину барабана.

На одном конце барабана установлена загрузочная камера 1 для ввода исходного продукта и теплоносителя, а на другом – разгрузочная 7 для вывода из аппарата готового продукта и отработанного теплоносителя. Для загрузки вращающихся барабанов предназначены питатели, установленные над загрузочной камерой.

Материал подается из питателя в барабан по наклонному лотку 2. Благодаря наклону и вращению барабана высушиваемый материал передвигается вдоль барабана, пересыпаясь и перераспределяясь на насадке 11. Между камерами и барабаном устанавливают уплотнения для исключения подсоса наружного воздуха. Подсос воздуха в барабанной сушилке особенно нежелателен со стороны подачи горячего теплоносителя, так как при этом снижается температура теплоносителя и возрастает его скорость.

Теплоноситель может двигаться прямотоком или противотоком по отношению к обрабатываемому материалу. Пройдя барабан, отработанный теплоноситель удаляется дымососом через циклон для улавливания мелких частиц твердого материала.

Барабаны сушилок имеют диаметры от 0,5 до 3,5 м при длине от 2,5 до 16 м. Частота

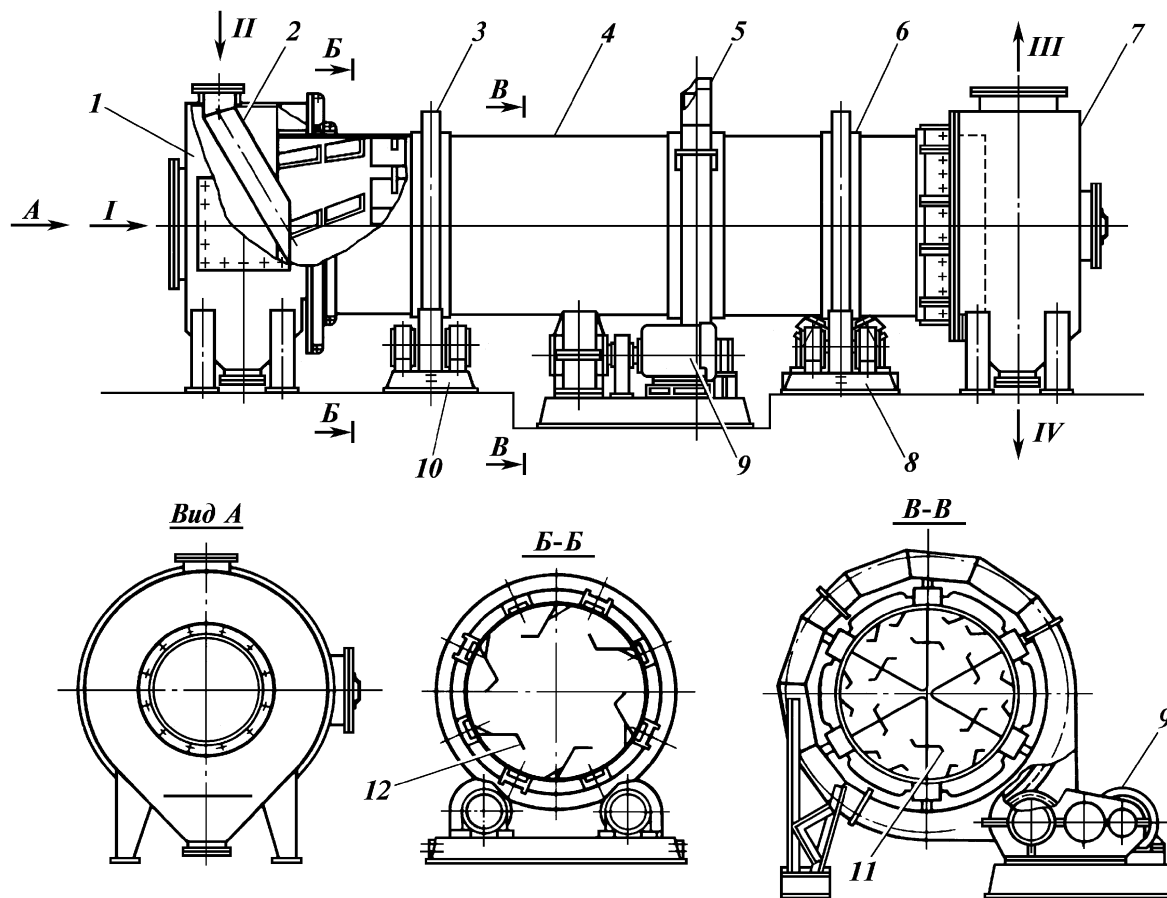


Рис. X-14. Барабанная сушилка:

1 — загрузочная камера; 2 — наклонный лоток; 3 — бандаж; 4 — барабан; 5 — зубчатый венец; 6 — кольцевые накладки; 7 — разгрузочная камера; 8 — упорные ролики; 9 — привод; 10 — опорные ролики; 11 — секторная перевалочная насадка; 12 — лопастная насадка. Потоки: I — теплоноситель; II — исходный продукт; III — смесь теплоносителя и паров воды; IV — готовый продукт

вращения барабанов сушилок обычно составляет от 1 до 8 об/мин. Потребляемая мощность составляет от 0,75 до 200 кВт в зависимости от размеров сушилки. Степень заполнения объема барабана материалом достигает 20 %.

Для перераспределения материала в барабане служат различные насадки, основные типы которых приведены на рис. X-15. Тип применяемой насадки зависит от свойств высушиваемого материала и условий сушики. Для крупнокусковых и склонных к налипанию материалов применяется лопастная насадка (рис. X-15, ‡), для сыпучих материалов с мелкими частицами — распределительная насадка объемного типа (рис. X-15, ·, ·, ·), для материалов средней крупности, плохо сыпучих, легко измельчающихся и пылящих применяют секторные перевалочные насадки (рис. X-15, „), для порошкообразных и сильно пылящих материалов — перевалочная насадка с закрытыми ячейками (рис. X-15, %). Применяются насадки и других типов, что определяется спецификой процесса сушики. Насадки выпускаются секциями длиной 1 м.

Пневматическая сушилка (рис. X-16). Для сушики мелкодисперсных, кристаллических и волокнистых материалов применяются сушилки, обеспечивающие относительно небольшое время пребывания материала в зоне сушики (сушилки мгновенного действия). В аппаратах подобного типа высушиваемый материал подается в трубу, через которую с большой скоростью проходит поток горячего газа (воздуха). Газ подхватывает влажный материал и выносит его из сушилки в циклон. В этих сушилках удаляется в основном поверхностная влага.

Главная часть сушилки — вертикальная труба высотой 10—20 м, в которой зернистый материал сушится во время полета во взвешенном состоянии. Влажный материал из бункера

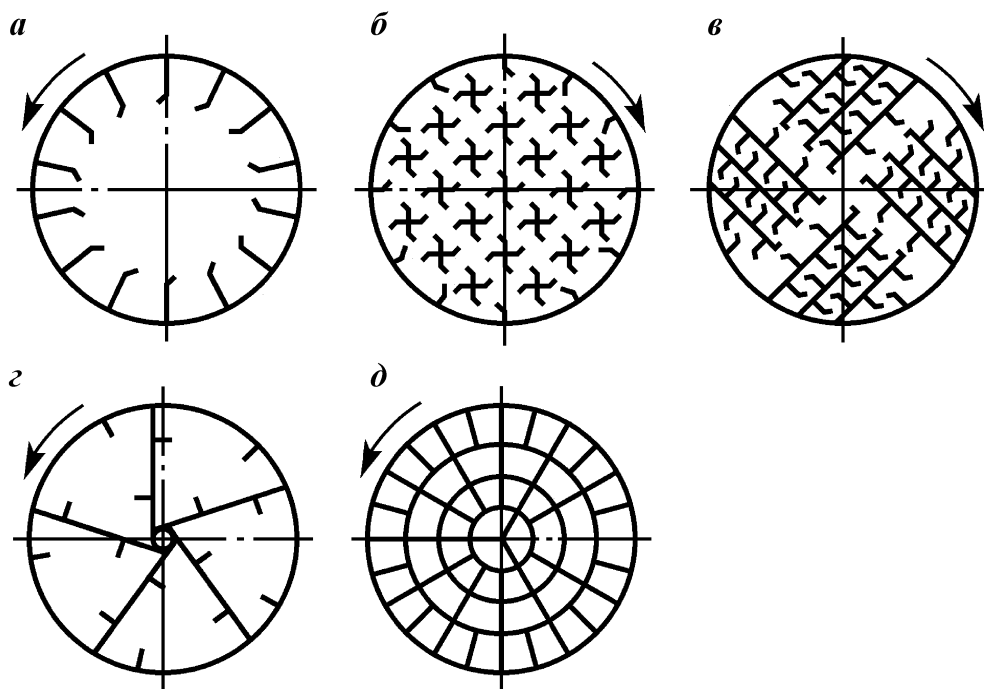


Рис. X-15. Схемы основных типов насадок для барабанных сушилок:

‡ — лопастные; ·, ·, · — распределительные объемного типа; „ — секторные перевалочные; % — перевалочные с закрытыми ячейками

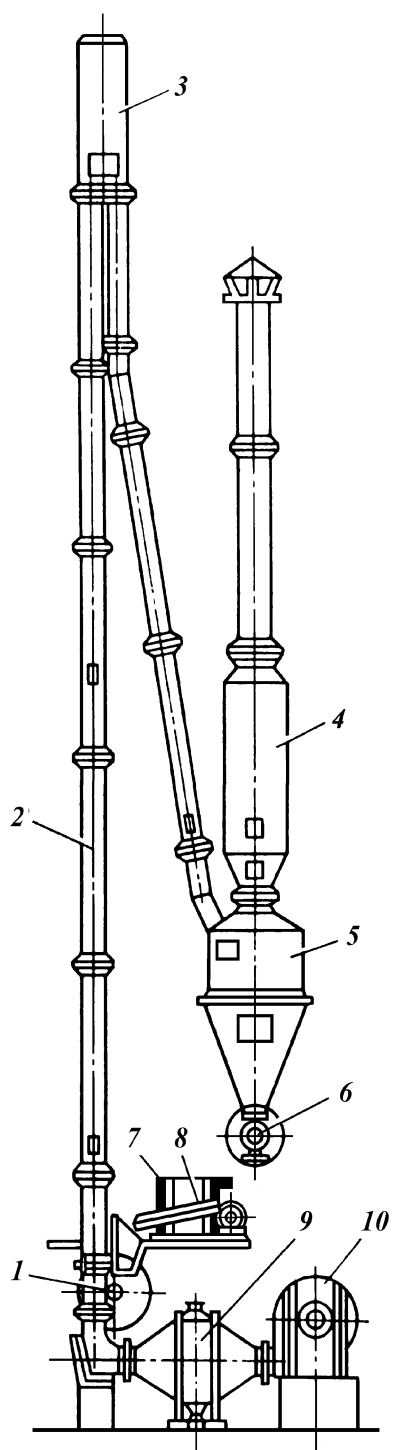


Рис. X-16. Схема пневматической сушилки:
 1 — питатель; 2 — сушильная труба; 3 — сборник;
 4 — фильтр; 5 — циклон; 6 — выгрузатель; 7 —
 бункер влажного материала; 8 — дозатор; 9 —
 воздухоподогреватель; 10 — вентилятор

7 дозатором 8 подается в трубу 2 питателем 1. Снизу в трубу вентилятором 10 через подогреватель 9 нагнетается горячий воздух. Скорость движения воздуха в трубе должна быть выше скорости витания частиц высушиваемого материала (обычно от 10 до 40 м/с). Через несколько секунд материал достигает сборника 3 уже высушенным и затем отделяется от транспортирующего воздуха в циклоне 5. Из бункера циклона высушенный материал выводится из системы с помощью выгрузителя 6. Мелкая пыль улавливается в рукавном фильтре 4.

Напряжение объема трубы по влаге в таких сушилках составляет около $400 \text{ кг}/(\text{м}^3/\text{ч})$, расход тепла — $5000 \text{ кДж}/\text{кг}$ влаги, а относительный расход высушиваемого материала составляет $8\div 20 \text{ кг}$ на 1 кг воздуха.

Распылительные сушильные установки предназначены для сушки растворов и суспензий и обеспечивают интенсивное удаление влаги при кратковременном пребывании продукта в зоне теплового воздействия. Продукт, получаемый из распылительной сушилки, как правило, порошкообразный, не требует дополнительного измельчения, хорошо растворяется на последующих стадиях переработки.

Распылительная сушильная камера представляет собой цилиндрическую камеру с коническим днищем. В верхней части камеры установлен центробежный распылитель (для сушилок типа РЦ) или пневматические форсунки (для сушилок типа РФ). В качестве теплоносителя используется воздух или смесь топочных газов с воздухом.

На рис. X-17 представлена схема установки, оснащенной сушилкой с центробежным распылителем.

Исходный продукт подается винтовым насосом-дозатором 3 на диск центробежного распылителя 4, диспергируется в объем сушильной камеры и высушивается смесью топочных газов с воздухом, поступающим из печи 1. Конструкция дисков центробежного распылителя различна в зависимости от свойств продукта и условий сушки. Для сушки абразивных материалов с целью повышения износостойкости рабочие элементы дисков выполняются с защитными покрытиями из специальных материалов.

Основная часть высушенного продукта выводится из сушильной камеры 5 шлюзовым

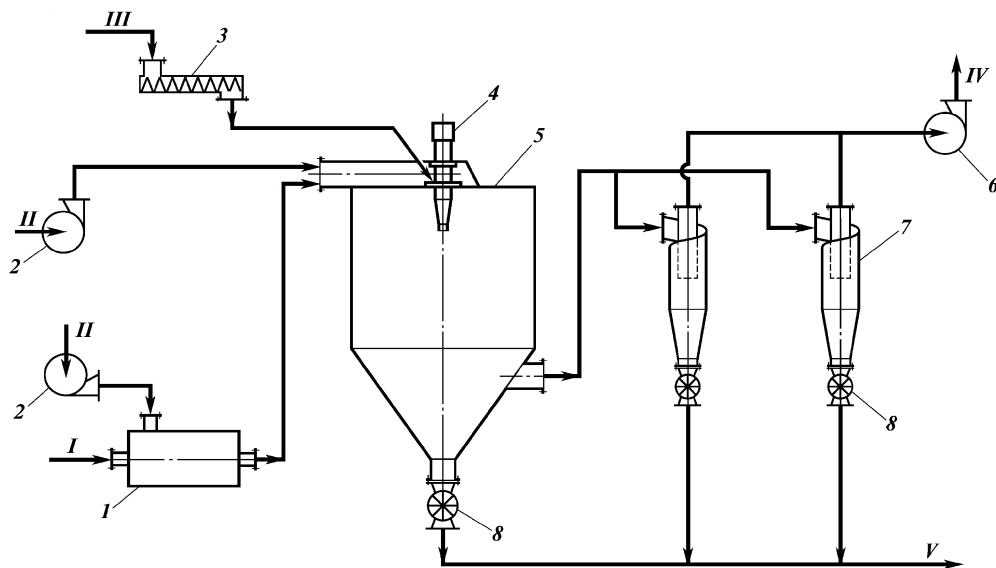


Рис. X-17. Распылительная сушильная установка:

1 — печь; 2 — вентилятор; 3 — винтовой насос-дозатор; 4 — центробежный распылитель; 5 — сушильная камера; 6 — дымосос; 7 — циклон; 8 — шлюзовый питатель. Поток: I — газ; II — воздух; III — исходный продукт; IV — смесь паров влаги и теплоносителя; V — готовый продукт

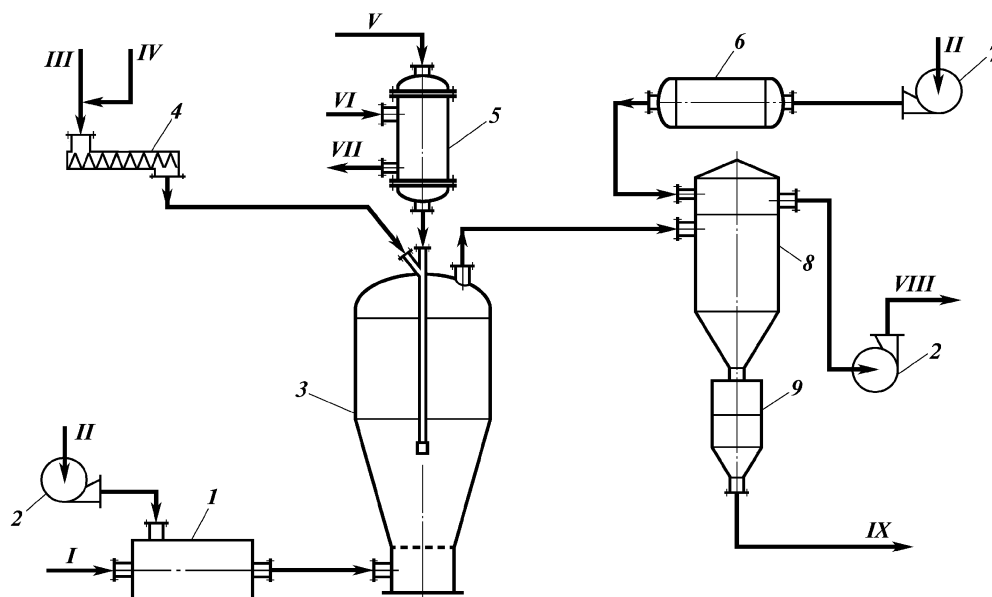


Рис. X-18. Схема сушильной установки с псевдоожиженным слоем инертного носителя:
1 — камера сгорания природного газа; 2 — воздуходувка; 3 — сушилка; 4 — питатель; 5 — теплообменник; 6 — ресивер; 7 — компрессор; 8 — рукавный фильтр; 9 — двойной пылевой затвор. Поток: I — природный газ; II — воздух; III — суспензия; IV — вода; V — сжатый воздух; VI — водяной пар; VII — конденсат; VIII — смесь теплоносителя и паров влаги; IX — готовый продукт

питателем 8, установленным в центре конического днища. Отработанный теплоноситель, содержащий мелкую фракцию готового продукта, отводится из сушилки в группу циклонов 7, где происходит отделение порошка от теплоносителя. Продукт выгружается из циклонов шлюзовым питателем, а теплоноситель дымососом 6 выбрасывается в атмосферу.

Диаметр сушильной камеры достигает 12,5 м, а производительность по исходному продукту — 32000 кг/ч.

Сушилка с псевдоожиженным слоем зернистого материала. При псевдоожижении слоя зернистого материала резко возрастают скорости процессов, связанных с переносом тепла и вещества. Это дает возможность уменьшить продолжительность сушки и обеспечить сушку больших потоков зернистого материала.

В сушилках с кипящим слоем обычно сушат материал, размеры частиц которого не превышают 5 мм. В качестве сушильного агента используются горячий воздух, дымовые газы, горячие инертные газы.

Псевдоожиженный слой может быть создан также за счет другого инертного материала, с которым контактирует высушиваемый материал в токе горячего сушильного агента. В этом случае высушенный материал обычно выводится с сушильным агентом через циклоны.

На рис. X-18 приведена схема аппарата для сушки суспензий и растворов в псевдоожиженном слое инертного носителя.

Исходный продукт питателем 4 подается в пневматическую форсунку, установленную в сушилке. Распыл осуществляется форсункой при помощи сжатого воздуха, предварительно нагретого в теплообменнике 5. Продукт напыляется на инертный теплоноситель (крошка фторопласта или другой материал), предварительно загруженный в сушилку и приведенный в псевдоожиженное состояние топочными газами, получаемыми в камере сгорания природного газа 1.

Высушенный продукт отделяется от гранул в результате соударений и вместе с теплоносителем поступает в рукавный фильтр 8, где отделяется от теплоносителя и через

двойной пылевой затвор 9 выводится с установки. После очистки в фильтрах отработанный теплоноситель выбрасывается в атмосферу.

Для регенерации фильтровальных рукавов применяется обратная продувка воздухом под давлением 0,04÷0,06 МПа, подаваемым компрессором 7 через ресивер 6.

ΕΙ Ι ΔΑΕΘΙ ŪÅ ÑÓØÈÈÈÈ

В контактных сушилках тепло высушиваемому материалу передается через плоскую или цилиндрическую металлическую стенку, которая с другой стороны обогревается теплоносителем (горячая вода, пар и т.д.).

Процесс сушки в контактных сушильных аппаратах может происходить при атмосферном давлении или под вакуумом. Последний вариант используют при сушке материалов, легко окисляющихся под действием кислорода воздуха, а также термонестойких, токсичных, пожаро- и взрывоопасных.

Из периодически действующих контактных сушилок наиболее простыми по конструкции являются полочные вакуумные сушилки, представляющие собой горизонтальный цилиндрический аппарат с откидной крышкой, внутри которого на стойках размещены полые греющие плиты. Внутри плит циркулирует теплоноситель, что обеспечивает подвод тепла, необходимый для сушки. Материал, поступающий на сушку, загружают на противни, которые устанавливают на греющие плиты. Процесс сушки в таких аппаратах может длиться десятки часов. Для предотвращения коркообразования материала аппарат периодически открывают и материал перемешивают.

Барабанные роторные вакуумные сушилки предназначены для сушки сыпучих или пастообразных взрыво- и пожароопасных токсичных продуктов. Широко применяются для сушки термолабильных продуктов в производствах ядохимикатов, гербицидов, полимерных материалов и красителей.

Барабанные роторные вакуумные сушилки — аппараты периодического действия. В горизонтальном цилиндрическом корпусе 1 (барабане) с рубашкой 2, обогреваемой водяным паром, установлен обогреваемый ротор 4 с гребками 5 (рис. X-19). В торцовых крышках аппарата размещены уплотнения вала ротора и подшипники. Привод ротора 7 состоит из электродвигателя и одного или двух редукторов.

Сушилка и привод установлены на общей или отдельных рамах. Аппараты оснащены фильтрами для очистки паровоздушной смеси от пыли продукта. В целях обеспечения безопасности при работе с взрывоопасными продуктами в места возможного проникновения воздуха (уплотнения ротора, люк выгрузки, фильтр) под небольшим давлением подается азот. Кроме того, на барабане установлена разрывная мембрана.

Нагрев и сушка продукта происходят в результате контакта его с обогреваемыми поверхностями барабана и ротора при перемешивании в аппарате. Продолжительность сушки определяется физико-химическими свойствами растворителя, начальной и конечной влажностью, способностью к налипанию и др. Поэтому производительность аппарата для сушки разных продуктов будет различной и определяется при разработке технологического регламента сушки экспериментально или на основе имеющегося опыта при работе с аналогичным продуктом. Номинальный объем корпуса сушилок изменяется от 0,16 до 10 м³ при коэффициенте заполнения до 50 %.

Вакуумная сушилка с вращающимся барабаном (рис. X-20) предназ-

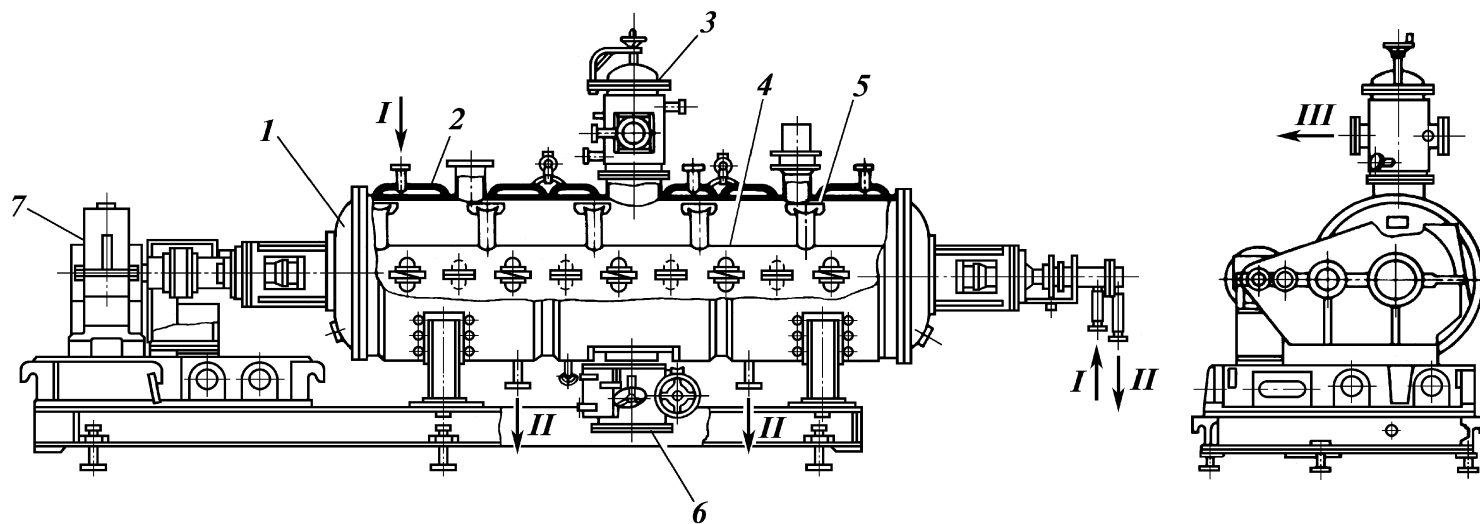


Рис. X-19. Барабанная роторная вакуумная сушилка:
 1 — барабан; 2 — паровая рубашка; 3 — загрузочный люк; 4 — ротор; 5 — гребок; 6 — разгрузочный люк; 7 — привод. Потоки: I — водяной пар; II — конденсат; III — газы

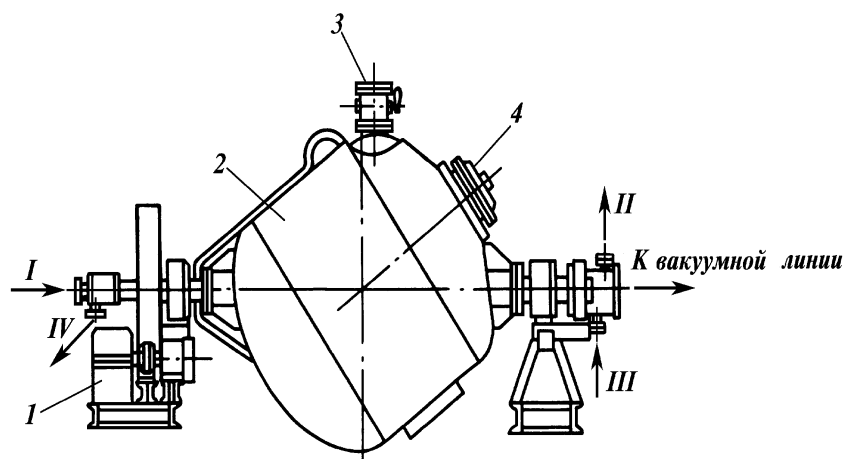


Рис. X-20. Вакуумная сушилка с вращающимся барабаном:
 1 — привод; 2 — барабан; 3 — штуцер загрузки и выгрузки продукта; 4 — люк. Потоки: I — вход пара; II — выход азота; III — вход азота; IV — выход конденсата

начена для глубокой сушки гранулированных полимерных материалов (лавсан, полипропилен и др.). Сушильный аппарат выполнен в виде барабана 2 с эксцентрично расположенными цапфами, установленными на опорах и привод 1 для вращения аппарата. Кроме того в состав установки входят система насосов для создания глубокого вакуума, загрузочный и разгрузочный бункеры и система автоматического управления. Сушильный аппарат имеет рубашку и внутри змеевик для обогрева продукта.

Установка работает в периодическом режиме. Загрузочный и разгрузочный бункеры используются для заполнения и разгрузки сушилки с дозированием. При сушке продуктов, в которых при контакте с воздушной средой происходит окисление или адсорбция влаги, в сушилке создается защитная азотная среда. Процесс сушки производится при вращении барабана в режиме, установленном для конкретного продукта. Эксцентричное расположение оси вращения барабана по отношению к его оси создает условия для комбинированного продольно-поперечного перемешивания продукта и соответствующий контакт с греющей поверхностью.

Загрузка и выгрузка продукта производится через один и тот же штуцер, снабженный шибером и крышкой, с соответствующим поворотом аппарата.

Подача пара в рубашку и змеевик и отвод конденсата осуществляются через подвижный коллектор со стороны привода через цапфу. С противоположной стороны подключается вакуумная система. Соединение загрузочного и разгрузочного бункеров с сушилкой осуществляется при помощи гибких рукавов с быстротъемными фланцами.

В промышленности используют вакуумные сушилки трех типов с объемом сушильного аппарата 6, 10 и 16 м³.

Вальцовые сушилки предназначены для сушки суспензий и пастообразных материалов. Рабочий элемент — цилиндрический валец, обогреваемый водяным паром. Валец установлен на двух опорах и имеет многоскоростной или регулируемый привод. Имеющиеся конструктивные модификации одновальцовых сушилок отличаются главным образом способом подачи исходного материала на валец (смачивание поверхности вальца в корыте, разбрызгивание материала валиком с насечкой, подача материала на поверхность вальца винтовым насосом и др.).

Сушка продукта осуществляется в тонком слое (0,1÷0,4 мм) за один оборот вальца в непрерывном режиме. Сухой продукт снимается (счищается) с поверхности вальца скребковым устройством в виде порошка, пленки или стружки. Сушилки имеют, как правило, открытое исполнение. Испаряемая влага отводится потоком воздуха через вытяжной зонт.

Конструкция одновальцовой сушилки показана на рис. X-21.

Водяной пар поступает в валец через полую цапфу 1; конденсат отводится из вальца через цапфу и сифонную трубку. Нижняя часть вальца 2 погружена в исходный продукт, находящийся в корыте 5 под вальцом. Толщина пленки продукта на горячей поверхности вальца регулируется калибрующим устройством 6. Продукт, высыхающий на вальце, снимается с него скребковым устройством и шнеком 8 выгружается из аппарата. Привод вальца 4 — от четырехскоростного электродвигателя через редуктор и зубчатую пару, закрытую защитным кожухом.

Расчет контактных сушилок. Материальный баланс по высушиваемому материалу и влаге совпадает с материальным балансом газовой сушилки. По заданным исходной массе влажного материала G_n и его начальной ω_n и конечной ω_k относительным влажностям определяем

массу удаляемой из материала влаги W [см. уравнение (X.8)] и выход высушенного продукта G_k [см. уравнение (X.7)], а также массу сухой части материала G_c [см. уравнение (X.5) или (X.6)].

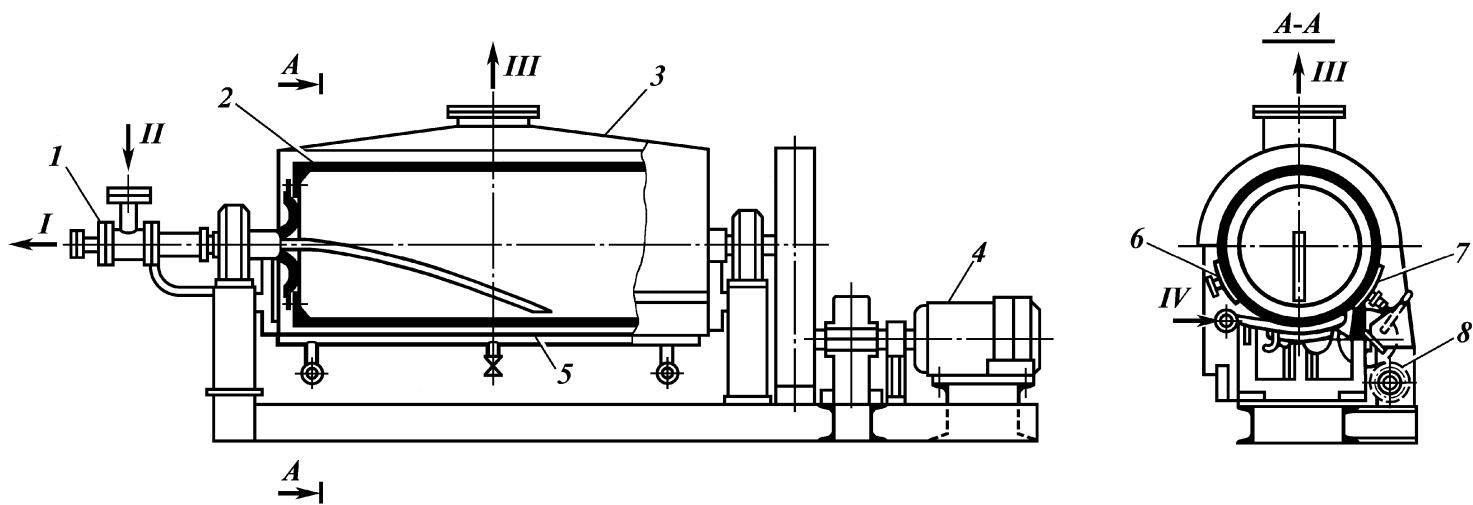


Рис. X-21. Одновальцовая сушилка:

1 — полая цапфа; 2 — валец; 3 — вытяжной зонт; 4 — привод; 5 — корыто; 6 — калибрующее устройство; 7 — скребковое устройство; 8 — шнек. Потоки: I — конденсат; II — водяной пар; III — смесь воздуха и паров влаги; IV — исходный продукт

Тепловой баланс контактной сушилки непрерывного действия записывается следующим образом:

$$D\lambda + G_n C_n t_n = D\theta + WH' + G_k C_k t_k + Q_{\text{пот}}, \quad (\text{X.18})$$

где D — расход греющего пара, кг (или кг/с); λ и H' — энтальпия греющего и вторичного пара соответственно, кДж/кг; θ — энтальпия конденсата греющего пара, кДж/кг; G_n, G_k — масса влажного материала до и после сушки, кг (или кг/с); C_n, C_k — теплоемкость влажного материала до и после сушки, кДж/(кг·°C); t_n, t_k — температура материала при загрузке и выгрузке соответственно, °C; $Q_{\text{пот}}$ — потери тепла в окружающую среду, кДж.

Из уравнения (X.18) обычно определяют расход греющего пара D (в кг) для сушилок периодического действия и (в кг/с или кг/ч) — для сушилок непрерывного действия.

Для контактных сушилок необходимо определить также поверхность нагрева, являющуюся исходной величиной для определения размеров сушилки. Для этой цели служит основное уравнение теплопередачи:

$$F = \frac{Q}{K\Delta t_{\text{cp}}}.$$

Однако применение этого уравнения на практике связано с затруднениями: относительно просто определяется только величина Q , нахождение же Δt_{cp} и особенно K изучено недостаточно. Это обстоятельство усугубляется разнообразием высушиваемых материалов и их физико-химических характеристик.

В этой связи поверхность нагрева контактных сушилок часто приходится определять по чисто эмпирической величине β — съему влаги с 1 м² поверхности нагрева в 1 ч. Тогда для сушилки непрерывного действия

$$F = \frac{W}{\beta};$$

для сушилки периодического действия

$$F = \frac{W}{\beta\tau}.$$

Для большинства конструкций контактных сушилок величина β обычно составляет 0,5÷3,5 кг/(м²·ч), для вальцовых сушилок она доходит до 20÷70 кг/(м²·ч).

По полученной величине поверхности нагрева, пользуясь каталогами, подбирают стандартную конструкцию сушилки, пригодную для данных конкретных условий эксплуатации и переработки соответствующего материала.