

**РАСЧЕТ БАРАБАННОЙ СУШИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ
ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬЮ 20,5 Т/Ч ДЛЯ СУШКИ ОТХОДОВ
ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

Груздев А.В., Чижова Л.А.

*Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича
и Николая Григорьевича Столетовых*

Владимир, Россия

**CALCULATION OF A DRUM DRYER WITH A CAPACITY OF 20.5 T / H
FOR DRYING WASTES FROM THE MINING INDUSTRY**

Gruzdev A.V., Chizhova LA

Vladimir State University named after Alexander G. and Nicholas G. Stoletovs

Vladimir, Russia

АННОТАЦИЯ

В данном курсовом проекте приведен вариант расчета барабанной сушильной установки, а также рассчитано и выбрано вспомогательное оборудование: вентилятор.

К пояснительной записке прилагается технологическая схема барабанной сушильной установки и чертеж общего вида барабанной сушилки.

Стр. 31

Рис.3

Табл. 2

Библ. 8

В технике сушки подвергается множество материалов, различающихся химическим составом, дисперсности и структурой, адгезионными свойствами и термочувствительностью, содержанием и формы связи влаги с материалом и другими свойствами. В химической промышленности процессы массо- и теплопереноса при сушке иногда осложняются протекающими одновременно химическими реакциями.

В связи с этим выбор рационального способа сушки, типа сушильные установки и конструкции сушильного аппарата представляет собой сложную технико-экономическую задачу и пока ещё не может быть включён в студенческий курсовой проект. Поэтому в настоящем пособии приводятся примеры расчёта только конвективных сушилок заданного типа. В примерах не дано обоснование выбора сушильного агента, а также параметров материала и сушильного агента. С этими вопросами проектанты могут ознакомиться в специальной литературе, ссылки на которую приведены в библиографии.

Желание дать общий пример расчета, основана на кинетических закономерностях массо- и теплообмена, определило выбор и высушенного материала, с которым влага связана механическими силами. Процесс в этом случае протекает в первом периоде сушки при постоянной температуре влажного материала, равной температуре мокрого термометра, и скорость сушки определяется внешней диффузией.

Расчет различных вариантов сушильного процесса (с промежуточным подогревом теплоносителя, с дополнительным подводом тепла в сушильную камеру, с частичной рециркуляцией сушильного агента) принципиально не отличается от приведенного в качестве примера расчета сушилки, работающие по основному (нормальному) сушильному варианту.

1. Описание технологической схемы

Принципиальная схема противоточной барабанной сушильной установки показана на рисунке 1.

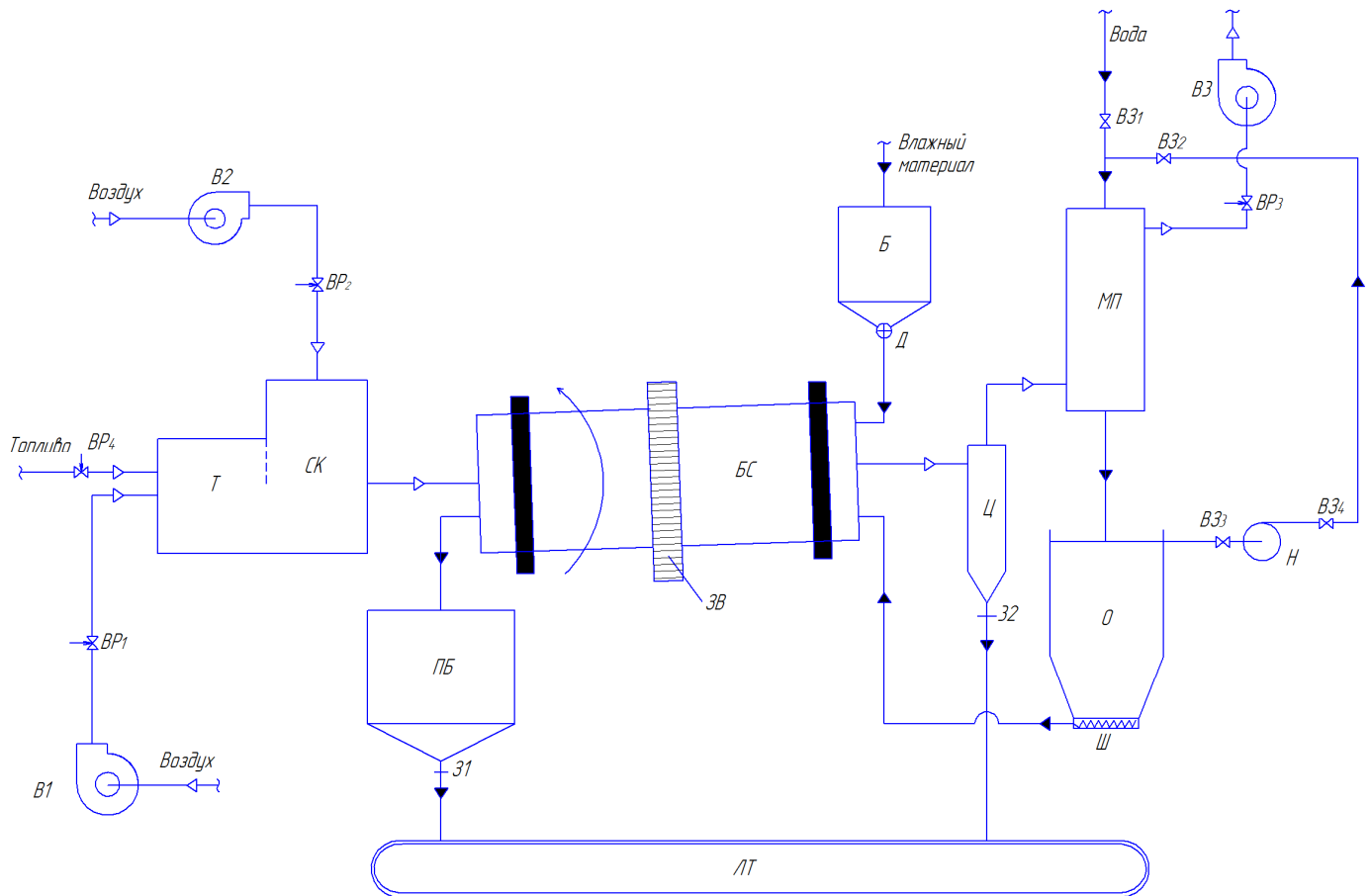


Рис. 1. Принципиальная схема барабанной установки:

Б - бункер; Д - дозатор; БС - барабан сушильный; Т - топка; СК - смесительная камера;
 В1-В3 - вентиляторы; Н - насос; ПБ - промежуточный бункер; ЛТ - ленточный
 транспортер; Ц - циклон; ЗВ - зубчатый венец; ВЗ₁ - ВЗ₆ - вентили запорные; ВР₁ - ВР₃ -
 вентили регулирующие; З1-З2 - затворы; МП - мокрый пылеуловитель

Влажный материал из бункера Б с помощью питателя Д подается во вращающийся сушильный барабан БС. Параллельно материалу в сушилку подается сушильный агент, образующийся от сгорания топлива в топке Т и смешения топочных газов с воздухом в смесительной камере СК. Воздух в топку и смесительную камеру подается вентиляторами В1 и В2. Высушенный материал с противоположного конца сушильного барабана поступает в промежуточный бункер ПБ, а из него на транспортирующее устройство ЛТ.

Отработанный сушильный агент перед выбросом в атмосферу очищается от пыли в циклоне Ц. Дополнительная очистка производится в мокром пылеуловителе МП.

Транспортировка сушильного агента через сушильную установку осуществляется с помощью вентилятора ВЗ. При этом установка находится под небольшим разрежением, что исключает утечку сушильного агента через неплотности установки.

Барабан приводится во вращение электродвигателем через зубчатый венец ЗВ.

2. Расчет барабанной сушилки

2.1. Задание на проектирование

Рассчитать барабанную сушилку с подъемно-лопастными пере-
валочными устройствами для высушивания песка топочными газами при
следующих исходных данных:

- Высушиваемый материал: доломит,
- Производительность сушилки по влажному материалу $G_K = 20,5$ т/ч
- Влагосодержание материала, % от массы сухого материала:
 - начальное $W_{нач} = 19,4$
 - конечное $W_{кон} = 2,2$
- Температура сушильного агента на входе в барабан $t_{нач} = 300^\circ\text{C}$,
- Температура влажного материала начальная $\theta = 18^\circ\text{C}$,
- Размер частиц материала $d = 2,8$ мм.

Принимаем следующие значения незадаанных параметров:

- Конечная температура сушильного агента (на выходе из барабана)
 $t_{кон} = 100^\circ\text{C}$;
- Температура топлива $t_T = 20^\circ\text{C}$;
- Температура свежего воздуха $t_0 = 18^\circ\text{C}$;
- Относительная влажность воздуха $\varphi_0 = 72\%$;
- Давление в сушилке: атмосферное
- Влагосодержание свежего воздуха $x_0 = 0,0092$ кг/кг.

2.2. Параметры топочных газов подаваемых в сушилку

В качестве топлива используем газ следующего состава [в % (об.)]: 94
 CH_4 ; $1,2 C_2H_6$; $0,7 C_3H_8$; $0,4 C_4H_{10}$; $0,2 C_5H_{12}$; $0,2 H_2$; $2,8 CO$; $0,5 N_2$.

Теоретическое количество сухого воздуха L_0 , необходимого на сжига-
ние 1 кг топлива, равно [1]:

$$L_0 = 138 \cdot [0,0179CO + 0,24H_2 + \sum \frac{(m + (n/4)C_mH_n)}{(12m + n)}], \quad (1)$$

Подставив соответствующие значения, получим:

$$L_0 = 138 \cdot [0,0179 \cdot 0,028 + 0,24 \cdot 0,002 + \frac{(1 + 4/4) \cdot 0,94}{(12 \cdot 1 + 4)} + \frac{(2 + 6/4) \cdot 0,012}{(12 \cdot 2 + 6)} + \frac{(3 + 8/4) \cdot 0,007}{(12 \cdot 3 + 8)} + \frac{(4 + 10/4) \cdot 0,004}{(12 \cdot 4 + 10)} + \frac{(5 + 12/4) \cdot 0,002}{(12 \cdot 5 + 12)}] = 16,75 \text{ кДж/кг}.$$

Количество тепла Q_V , выделяющегося при сжигании 1 м^3 газа, равно[1]:

$$Q_v = \sum \text{мас. доля} \cdot Q_i, \quad (2)$$

где Q_i - тепловой эффект реакции горения простого газа, кДж/м³.

$$Q_v = CH_4 \cdot Q_{CH_4} + C_2H_4 \cdot Q_{C_2H_4} + C_3H_6 \cdot Q_{C_3H_6} + C_4H_{10} \cdot Q_{C_4H_{10}} + C_5H_{12} \cdot Q_{C_5H_{12}} + CO \cdot Q_{CO} + H_2 \cdot Q_{H_2}$$

$$Q_V = 0,94 \cdot 35741 + 0,012 \cdot 63797 + 0,002 \cdot 10810 + 0,028 \cdot 12680 + 0,007 \cdot 91321 + 0,004 \cdot 118736 + 0,002 \cdot 146080 = 36145,115 \text{ кДж/м}^3.$$

Плотность газообразного топлива ρ_T [1]:

$$\rho_T = \frac{\sum C_m H_n M_i}{v_0} \cdot \frac{T_0}{T_0 + t_T}, \quad (3)$$

где M_i - мольная масса топлива, кмоль/кг; t_T - температура топлива, равная 20°C ; v_0 - мольный объем, равный $22,4 \text{ м}^3/\text{кмоль}$. Подставив, получим:

$$\rho_T = \frac{0,94 \cdot 16 + 0,012 \cdot 30 + 0,007 \cdot 44 + 0,004 \cdot 58 + 0,002 \cdot 72 + 0,002 \cdot 2 + 0,028 \cdot 28 + 0,005 \cdot 28}{22,4 \cdot (273 + 20)} = 0,708 \text{ кг/м}^3.$$

Количество тепла, выделяющегося при сжигании 1 кг топлива[1]:

$$Q = Q_v / \rho_T = \frac{36145,115}{0,708} = 51052,422 \text{ кДж/кг} \quad (4)$$

Масса сухого газа, подаваемого в сушильный барабан, в расчете на 1 кг сжигаемого топлива определяется общим коэффициентом избытка воздуха α , необходимого для сжигания топлива и разбавления топочных газов до температуры смеси $t_{см} = t_{нач} = 300^\circ \text{C}$.

Значение α находят из уравнений материального и теплового балансов.

Уравнение материального баланса [1]:

$$1 + L_0 = L_{c.r.} + \sum \frac{9n}{12m+n} C_m H_n, \quad (5)$$

где $L_{c.r.}$ - масса сухих газов, образующихся при сгорании 1 кг топлива; $C_m H_n$ - массовая доля компонентов, при сгорании которых образуется вода, кг/кг.

Уравнение теплового баланса [1]

$$Q_\eta + c_T t_T + \alpha L_0 I_0 = [L_{c.r.} + L_0(a - 1)] \cdot i_{c.r.} + \left[\alpha L_0 x_0 + \sum \frac{9n}{12m+n} C_m H_n \right] \cdot i_n, \quad (6)$$

где η - общий коэффициент полезного действия, учитывающий эффективность работ топки и потери тепла топкой в окружающую среду, принимаемый равным 0,95; c_T - теплоемкость газообразного топлива при температуре $t_T = 20^\circ\text{C}$, равная 1,34 кДж/кг · К; I_0 - энтальпия свежего воздуха, кДж/кг; $i_{c.r.} = c_{c.r.} \cdot t_{c.r.}$ - энтальпия сухих газов, кДж/(кг · К) [2]; $c_{c.r.} \cdot t_{c.r.}$ - соответственно теплоемкость и температура сухих газов [2]; $c_{c.r.} = 1,05$ кДж/(кг · К), $t_{c.r.} = 550^\circ\text{C}$; x_0 - начальное влагосодержание воздуха, кг/кг сухого воздуха, при температуре $t_0 = 20^\circ\text{C}$, равное 9 г/кг = 0,009 кг/кг; $i_n = r_0 + c_n \cdot t_n$ - энтальпия водяных паров, кДж/кг [2]; r_0 - теплота испарения воды при температуре 0°C , равная 2500 кДж/кг; c_n - средняя теплоемкость водяных паров, равная 1,97 кДж/(кг · К); t_n - температура водяных паров; $t_n = t_{cr} = t_{cm} = 300^\circ\text{C}$.

Решая совместно уравнения (5) и (6), получим:

$$Q_\eta + c t_T - i_{c.r.} \cdot \left(1 - \sum \frac{9n}{12m+n} C_m H_n \right) - \alpha = \frac{-i_n \sum \frac{9n}{12m+n} C_m H_n}{L_0(i_{c.r.} + i_n x_0 - I_0)}. \quad (7)$$

Пересчитаем кг топлива, при сгорании которых образуется вода, из объемных долей в массовые [1]:

$$C_m H_n = \frac{C_m H_n \cdot M_r \cdot T_0}{V_m \cdot \rho_T \cdot (T_0 + t_T)}, \quad (8)$$

где $C_m H_n$ - объемная доля компонента в смеси; V_m - молярный объем, равный 22,4 моль/л; ρ_T - плотность газообразного топлива; T_0 - термодинамическая температура, равная 273 К; t_T - температура топлива, равная 20°C .

$$CH_4 = \frac{0.94 \cdot 16 \cdot 273}{22.4 \cdot 0.708 \cdot (273 + 20)} = 0,884 ;$$

$$C_2H_6 = \frac{0.012 \cdot 30 \cdot 273}{22.4 \cdot 0.708 \cdot (273 + 20)} = 0,0216 ;$$

$$C_3H_8 = \frac{0.007 \cdot 44 \cdot 273}{22.4 \cdot 0.708 \cdot (273 + 20)} = 0,0181 ;$$

$$C_4H_{10} = \frac{0.004 \cdot 58 \cdot 273}{22.4 \cdot 0.708 \cdot (273 + 20)} = 0,0136 ;$$

$$C_5H_{12} = \frac{0.002 \cdot 72 \cdot 273}{22.4 \cdot 0.708 \cdot (273 + 20)} = 0,00846 ;$$

$$H_2 = \frac{0.002 \cdot 2 \cdot 273}{22.4 \cdot 0.708 \cdot (273 + 20)} = 0,000235 .$$

Количество влаги, выделяющейся при сгорании 1 кг топлива, равно[1]:

$$\sum \frac{9n}{12m+n} C_m H_n = \frac{9 \cdot 4}{12 \cdot 1 + 4} \cdot 0,8841 + \frac{9 \cdot 6}{12 \cdot 2 + 6} \cdot 0,0211 + \frac{9 \cdot 8}{12 \cdot 3 + 8} \cdot 0,0181 + \frac{9 \cdot 10}{12 \cdot 4 + 10} \cdot 0,0136 + \frac{9 \cdot 12}{12 \cdot 5 + 12} \cdot 0,0085 + 0,0002 = 2,09 \text{ кг/кг} .$$

Коэффициент избытка воздуха находим по уравнению (7) [1]:

$$\alpha = \frac{Q_p^B \cdot \eta_T + c_T \cdot t_T - (1 - \sum \frac{9n}{12m+n} C_m H_n) \cdot c_{c.g.} \cdot t_{c.g.} - \sum \frac{9n}{12m+n} C_m H_n \cdot i_{п}}{L_0 (c_{c.g.} \cdot t_T + i_{п} \cdot x_0 - I_0)} \quad (9)$$

Подставив значения, получим:

$$\alpha = \frac{51052,422 \cdot 0,95 + 1,34 \cdot 20 - 1,05 \cdot 300 \cdot (1 - 2,092) - (2500 + 1,97 \cdot 300) \cdot 2,092}{16,75 \cdot [1,05 \cdot 300 + (2500 + 1,97 \cdot 300) \cdot 0,0092 - 4,19]} = 7,462 .$$

Общая удельная масса сухих газов, получаемых при сжигании 1 кг топлива и разбавлении топочных газов воздухом до температуры смеси 300°C, равна[2]:

$$G_{c.g.} = 1 + \alpha \cdot L_0 - \sum \frac{9n \cdot C_m H_n}{12m + n} ; \quad (10)$$

$$G_{c.g.} = 1 + 7,462 \cdot 2,092 \cdot 16,75 - 2,092 = 123,897 \text{ кг/кг} .$$

Удельная масса водяных паров в газовой смеси при сжигании 1 кг топлива[1]:

$$G_n = \sum \frac{9n}{12m+n} C_m H_n + \alpha \cdot x_0 \cdot L_0, \quad (11)$$

$$G_{II} = 2,092 + 7,462 \cdot 0,092 \cdot 16,75 = 3,242 \text{ кг/кг}$$

Влагосодержание газов на входе в сушилку ($x_1 = x_{см}$) на 1 кг сухого воздуха равно [1]:

$$x_1 = \frac{G_{II}}{G_{с.г.}}, \quad (12)$$

$$x_1 = \frac{3,242}{123,897} = 0,0262 \frac{\text{кг}}{\text{кг}},$$

Энтальпия газов на входе в сушилку [1]:

$$I_1 = \frac{(Q\eta_T + c_T \cdot t_T + \alpha \cdot L_0 \cdot I_0)}{G_{с.г.}}, \quad (13)$$

$$I_1 = \frac{51052,422 \cdot 0,95 + 1,34 \cdot 20 \cdot 7,462 \cdot 16,75 \cdot 4,19}{123,897} = 395,896 \text{ кДж/кг}.$$

Поскольку коэффициент избытка воздуха α велик, физические свойства газовой смеси, используемой в качестве сушильного агента, практически не отличаются от физических свойств воздуха. Это дает возможность использовать в расчетах диаграмму состояния влажного воздуха I-х.

2.3. Параметры отработанных газов. Расход сушильного агента.

Определим расход влаги W , удаляемой из высушиваемого материала, при изменении влажности материала от $W_{нач}$ до $W_{кон}$, если влагосодержание задано в процентах от массы сухого вещества [1]:

$$W = G_k \cdot \frac{W_{нач} - W_{кон}}{100 - W_{нач}}, \quad (14)$$

Переведём производительность сушилки по высушенному материалу из т/ч в кг/с:

$$G_k = \frac{20,5 \cdot 1000}{3600} = 5,694 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Полученные значения подставим в выражение (14):

$$W = 5,694 \cdot \frac{(19,4 - 2,2)}{(100 - 19,4)} = 1,215 \text{ кг/с}.$$

Уравнение внутреннего теплового баланса сушилки [1]:

$$\Delta = c\theta_1 + q_{\text{доп}} - (q_1 + q_m + q_n), \quad (15)$$

где Δ - разность между удельным расходом и приходом тепла в сушильной камере, кДж/кг влаги; c - теплоемкость влаги во влажном материале при температуре $\theta_1 = 18^\circ\text{C}$, равная 4,19 кДж/кг·К [2]; $q_{\text{доп}}$ - удельный дополнительный подвод тепла в сушильную камеру, при работе сушилки по нормальному сушильному варианту: $q_{\text{доп}} = 0$ [2]; q_T - удельный подвод тепла в сушилку с транспортными средствами, кДж/кг влаги; в рассматриваемом случае $q_T = 0$ кДж/кг влаги [2]; q_m - удельный подвод тепла в сушильный барабан с высушиваемым материалом, кДж/кг влаги [1]:

$$q_m = \frac{G_k \cdot c_m (\theta_2 - \theta_1)}{W}, \quad (16)$$

где c_m - теплоемкость высушенного материала, равная для доломита 0,92 кДж/кг·К [1]; θ_2 - температура высушенного материала на входе в сушилку, $^\circ\text{C}$. При испарении поверхностей влаги θ_2 принимаем приблизительно равной температуре мокрого термометра t_m при соответствующих параметрах сушильного агента.

Принимая в первом приближении процесс сушки адиабатическим, находим θ_2 по $I - x$ диаграмме (приложение В) по начальным параметрам сушильного агента ($x_1 = 0,0262$ кг/кг; $I_1 = 395,896$ кДж/кг): $\theta_2 = t_m = 58^\circ\text{C}$; q_n - удельные потери тепла в окружающую среду.

Подставив соответствующие значения в уравнение (14) получим:

$$\Delta = 4,19 \cdot 18 + 0 - 0 + \frac{5,694 \cdot 0,92(58 - 18)}{1,215} - 22,6 = -132,986 \text{ кДж/кг влаги}$$

Запишем уравнение рабочей линии сушки [1]:

$$\Delta = \frac{I - I_1}{(x - x_1)} \quad \text{или} \quad I = I_1 + \Delta \cdot (x - x_1). \quad (17)$$

Для построения рабочей линии сушки по диаграмме $I - x$ необходимо знать координаты (x и I) минимум двух точек. Координаты одной точки известны: $x_1 = 0,0239$ кг/кг; $I_1 = 389,049$ кДж/кг. Для нахождения координат второй точки зададимся произвольным значением $x = 0,1$ кг/кг и определим соответствующее значение I , подставив в уравнение (16):

$$I = 395,896 - 132,986 \cdot (0,1 - 0,0262) = 386,055 \text{ кДж/кг.}$$

Через две точки на диаграмме $I - x$ (приложение В) с координатами x_1, I_1 и x, I проводим линию сушки до пересечения с выбранным конечным параметром $t_{\text{кон}} = 100^\circ\text{C}$.

В точке пересечения линии сушки с изотермой $t_{\text{кон}}$ находим параметры отработанного сушильного агента: $x_2 = 0,108$ кг/кг; $I_2 = 380$ кДж/кг. Определяем температуру материала на выходе из сушилки: $t_{\text{МТВвых}} = 54^\circ\text{C}$.

Расход сухого газа [1]:

$$L_{c.r.} = \frac{W}{x_2 - x_1}, \quad (18)$$

$$L_{c.r.} = \frac{1,215}{0,108 - 0,0262} = 14,853 \text{ кг/с.}$$

Расход сухого воздуха [1]:

$$L = \frac{W}{x_2 - x_0}; \quad (19)$$

$$L = \frac{1,215}{0,108 - 0,0092} = 12,298 \text{ кг/с.}$$

Расход тепла на сушку [1]:

$$Q_c = L_{c.r.} \cdot (I_1 - I_0), \quad (20)$$

$$Q_c = 14,853 \cdot (395,896 - 4,19) = 5818,009 \text{ кДж/с}$$

Расход топлива на сушку [1]:

$$G_T = \frac{Q_c}{Q}, \quad (21)$$

$$G_T = \frac{5818,009}{51052,422} = 0,114 \text{ кг/с.}$$

2.4. Определение основных размеров сушильного барабана

Основные размеры барабана выбирают по нормативам и каталогам - справочникам [2, 3] в соответствии с объемом сушильного пространства. Объем сушильного пространства V складывается из объема V_n , необходимого для прогрева влажного материала до температуры, при которой начинается интенсивное испарение влаги (до температуры мокрого термометра сушильного агента), и объема V_c , требуемого для проведения процесса испарения влаги, то есть $V = V_c + V_n$. Объем сушильного пространства барабана вы-

числяем по уравнению массопередачи [1]:

$$V_c = \frac{W}{K_v \cdot \Delta x'_{cp}}, \quad (22)$$

где $\Delta x'_{cp}$ - средняя движущая сила массопередачи, кг влаги/м³; K_v - объёмный коэффициент массопередачи, 1/с.

При сушке кристаллических материалов происходит удаление поверхностной влаги, т.е. процесс протекает в первом периоде сушки, когда скорость процесса определяется только внешним диффузионным сопротивлением. При параллельном движении материала и сушильного агента температура влажного материала равна температуре мокрого термометра. В этом случае коэффициент массопередачи численно равен коэффициенту массоотдачи $K_v = \beta_v$. [1]

Для барабанной сушилки коэффициент массоотдачи β_v вычисляется по эмпирическому уравнению [1]:

$$\beta_v = 1,62 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{(\omega \cdot \rho_{cp})^{0,9} \cdot n^{0,7} \cdot \beta^{0,54} \cdot P_0}{[C \cdot \rho_{cp} \cdot (P_0 - P)]}, \quad (23)$$

где ρ_{cp} - средняя плотность сушильного агента, кг/м³; C - теплоемкость сушильного агента при средней температуре в барабане, равная 1 кДж/кг·К [1]; β - оптимальное заполнение барабана высушиваемым материалом, %; P_0 - давление, при котором осуществляется сушка, Па; P - среднее парциальное давление водяных паров в сушильном барабане, Па.

Уравнение (23) справедливо для значений $\omega_{cp} = 0,6 - 1,8$ кг/ (м² · с), $n = 1,5 - 5,0$ об/мин, $\beta = 10 - 25\%$.

Рабочая скорость сушильного агента в барабане зависит от дисперстности и плотности высушиваемого материала. В данном случае сушке подвергается доломит с размером высушиваемого материала 2,8 мм, насыпная плотность доломита $\rho_m = 1800$ кг/м³[6]. Принимаем скорость газов в барабане $\omega = 2,4$ м/с.

Средняя температура в барабане:

$$t_{\text{ср}} = \frac{t_{\text{кон}} + t_{\text{нач}}}{2} \quad (24)$$

$$t_{\text{ср}} = \frac{300 + 100}{2} = 200^{\circ}\text{C}$$

Плотность сушильного агента при средней температуре в барабане $t_{\text{ср}}$ практически соответствует плотности воздуха при этой температуре:

$$\rho_{\text{ср}} = \frac{M}{v_0} \cdot \frac{T_0}{T_0 + t_{\text{ср}}}, \quad (25)$$

$$\rho_{\text{ср}} = \frac{29}{22,4} \cdot \frac{273}{273 + 200} = 0,747 \text{ кг/м}^3.$$

При этом $\omega \cdot \rho_{\text{ср}} = 2,4 \cdot 0,747 = 1,7928 \text{ кг/м}^3 \cdot \text{с}$, что не нарушает справедливости уравнения (23).

Принимаем частоту вращения барабана $n = 1,5 \text{ об/мин}$.

Оптимальное заполнение барабана высушиваемым материалом β для разных конструкций перевалочных устройств различно. Наиболее распространенные перевалочные устройства показаны на рисунке 2. Для рассматриваемой конструкции сушильного барабана $\beta = 12\%$.

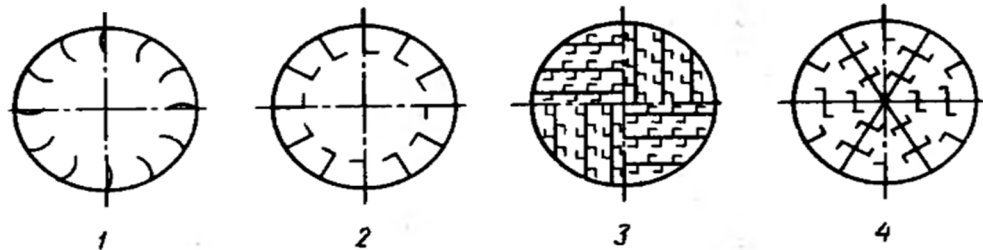


Рис.2. Типы перевалочных устройств, применяемых в барабанных сушилках, и степень заполнения барабана β :

1 – подъемно-лопастного, $\beta = 12\%$; 2 – то же, $\beta = 14\%$; 3 – распределительные, $\beta = 20,6\%$; 4 – распределительные с закрытыми ячейками, $\beta = 27,5\%$.

Для рассматриваемой конструкции сушильного барабана принимаем степень заполнения барабана $\beta = 12\%$. Процесс сушки осуществляется при атмосферном давлении, то есть $P_0 = 10^5 \text{ Па}$. [1]

Парциальное давление водяных паров в газе определим по уравнению:

$$P = \frac{\left(\frac{x}{M_B}\right) \cdot P_0}{\frac{1}{M_{\text{с.в.}}} + \frac{x}{M_B}}, \quad (26)$$

Тогда на входе в сушилку:

$$p_1 = \frac{\left(\frac{0,0262}{18}\right) \cdot 10^5}{\frac{1}{29} + \frac{0,0262}{18}} = 4050,15 \text{ Па} ;$$

на выходе из сушилки:

$$p_2 = \frac{\left(\frac{0,108}{18}\right) \cdot 10^5}{\frac{1}{29} + \frac{0,108}{18}} = 14821,124 \text{ Па.}$$

Парциальное давление водяных паров в сушильном барабане определим, как среднеарифметическую величину между парциальными давлениями на входе газа в сушилку и на выходе из нее:

$$p = \frac{p_1 + p_2}{2}, \quad (27)$$

$$P_{\text{ср}} = \frac{4050,15 + 14821,124}{2} = 9435,637 \text{ Па.}$$

Таким образом, объёмный коэффициент массоотдачи равен [1]:

$$\beta_v = 1,62 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{1,8^{0,9} \cdot 1,5^{0,7} \cdot 12^{0,54} \cdot 10^5}{1 \cdot 0,747(10^5 - 9435,637)} = 0,207 \text{ с}^{-1}$$

Движущую силу массопередачи $\Delta x'_{\text{ср}}$ определим по уравнению [1]:

$$\Delta x'_{\text{ср}} = \frac{\Delta x'_{\text{с}} - \Delta x'_{\text{м}}}{\ln\left(\frac{x'_{\text{с}}}{x'_{\text{м}}}\right)} = \frac{\Delta P_{\text{ср}} - M_B}{P_0 \cdot v_0 \cdot \frac{T_0 + t_{\text{ср}}}{T_0}}, \quad (28)$$

где $\Delta x'_{\text{с}} = x_1^* - x_1'$ — движущая сила в начале процесса сушки, кг/м³; $\Delta x'_{\text{м}} = x_2^* - x_1'$ — движущая сила в конце процесса сушки, кг/м³; x_2^* и x_1^* — равновесное содержание влаги на входе в сушилку и на выходе из нее, кг/м³.

Средняя движущая сила $\Delta P_{\text{ср}}$, выраженная через единицы давления (Па) равна [1]:

$$\Delta P_{\text{ср}} = \frac{\Delta P_{\text{с}} - \Delta P_{\text{м}}}{\ln\left(\frac{\Delta P_{\text{с}}}{\Delta P_{\text{м}}}\right)}, \quad (29)$$

Для противоточного движения сушильного агента и высушиваемого материала имеем: $\Delta P_{\text{с}} = p_1^* - p_1$ - движущая сила в начале процесса сушки, Па; $\Delta P_{\text{м}} = p_2^* - p_2$ - движущая сила в конце процесса сушки, Па; p_1^* и p_2^* - давления насыщенных паров над влажным материалом в начале и в конце процесса сушки, Па.

Значения p_1^* и p_2^* определяем по температуре мокрого термометра

сушильного агента в начале ($t_{MT \text{ вх}}$) и в конце ($t_{MT \text{ вых}}$) процесса сушки по уравнению:

$$p_1^* = \exp \left(23,477 - \frac{3990,67}{233,93 + t_{MT \text{ вх}}} \right) \quad (30)$$

$$p_1^* = \exp \left(23,477 - \frac{3990,67}{233,92 + 58} \right) = 18160,424 \text{ Па}$$

$$p_2^* = \exp \left(23,477 - \frac{3990,67}{233,93 + t_{MT \text{ вых}}} \right) \quad (31)$$

$$p_2^* = \exp \left(23,477 - \frac{3990,67}{233,92 + 57} \right) = 17326,632 \text{ Па}$$

Откуда получаем :

$$\Delta P_{cp} = \frac{(p_1^* - p_1) - (p_2^* - p_2)}{\ln \left(\frac{p_1^* - p_1}{p_2^* - p_2} \right)} \quad (32)$$

$$\Delta P_{cp} = \frac{(18160,424 - 4050,15) - (17326,632 - 14821,124)}{\ln \left(\frac{18160,424 - 4050,15}{17326,632 - 14821,124} \right)} = 6714,12 \text{ Па}.$$

Выразим движущую силу в кг/м³ по уравнению (27):

$$\Delta X_{cp} = \frac{5424 \cdot 18}{10^5 \cdot 22,4 \cdot \left(\frac{273 + 200}{273} \right)} = 0,0252 \text{ кг/м}^3$$

Находим объем сушильного барабана V_c , необходимый для проведения процесса испарения влаги, без учета объема аппарата, требуемого на прогрев влажного материала находим по уравнению (22):

$$V_c = \frac{1,215}{0,207 \cdot 0,0311} = 188,732 \text{ м}^3.$$

Объем сушилки, необходимый для прогрева влажного материала, находим по модифицированному уравнению теплопередачи:

$$V_n = \frac{Q_n}{K_v \cdot \Delta t_{cp}}, \quad (33)$$

где Q_n - расход тепла на нагрев материала до температуры $t_{MT \text{ вх}}$, кВт; K_v — объёмный коэффициент теплопередачи, кВт/м³ · К; Δt_{cp} - средняя разность температур, °С

Расход тепла Q_n равен [1]:

$$Q_n = G_k \cdot c_M \cdot (T_{MT \text{ вх}} - \theta_1) + W \cdot c \cdot (T_{MT \text{ вх}} - \theta_1), \quad (34)$$

$$Q_n = 5,694 \cdot 0,92 \cdot (58 - 18) + 1,215 \cdot 4,19 \cdot (58 - 18) = 413,173 \text{ кВт}.$$

Объемный коэффициент теплопередачи определим по эмпирическому уравнению [1]:

$$k_v = 16 \cdot (\omega \cdot \rho_{cp})^{0,9} \cdot n^{0,7} \cdot \beta^{0,54}, \quad (35)$$

$$k_v = 16 \cdot 1,8^{0,9} \cdot 1,5^{0,7} \cdot 12^{0,54} = 0,138 \text{ кВт/м}^3 \cdot \text{К}$$

Для вычисления Δt_{cp} , необходимо найти температуру сушильного агента t_x , до которой он охладится от $t_{нач}$ до $t_{MT_{вых}}$, отдавая тепло на нагрев высушиваемого материала до $t_{MT_{ex}}$. Эту температуру можно определить из уравнения теплового баланса [1]:

$$Q_n = L_{c.r.} \cdot (1 + x_1) \cdot c_{c.r.} \cdot (t_{нач} - t_x), \quad (36)$$

$$t_x = t_{нач} - \frac{Q_n}{L_{c.r.} \cdot (1 + x_1) \cdot c_{c.r.}}, \quad (37)$$

$$t_x = 400 - \frac{413,173}{14,853 \cdot (1 + 0,0262) \cdot 1,05} = 325^\circ\text{C}$$

Средняя разность температур Δt_{cp} равна [2]:

$$\Delta t_{cp} = \frac{[(t_{нач} - \theta_1) + (t_x - t_{MT_{ВХ}})]}{2},$$

$$\Delta t_{cp} = \frac{(300 - 20) + (325 - 57)}{2} = 274,908^\circ\text{C}$$

Подставляем полученные значения в выражение (33):

$$V_n = \frac{413,173}{0,138 \cdot 274,908} = 10,891 \text{ м}^3$$

Общий объем сушильного барабана равен [1]:

$$V = V_c + V_n \quad (38)$$

$$V = 188.732 + 10.891 = 199.623 \text{ м}^3$$

В соответствии со справочными данными [7] выбираем барабанную сушилку ф 3,2 × 25 выпускаемую Шанхайской компанией с общим объемом $V=219,8 \text{ м}^3$, основные характеристики которой представлены в табл. 1.

Таблица 1

Основные характеристики барабанной сушилки

Показатели	Значения
Внутренний диаметр барабана, м	3,2
Длина барабана, м	25
Толщина стенок наружного цилиндра, мм	22
Объём сушильного пространства, м ³	200,96
Частота вращения барабана, об/мин	1,5
Общая масса, кг	166 · 10 ³
Потребляемая мощность двигателя, кВт/ч	110
Производительность, т/ч	75 - 90

Определим действительную скорость газов в барабане [1]:

$$\omega_d = \frac{v_r}{0,785 \cdot d^2}, \quad (39)$$

Объемный расход влажного сушильного агента на выходе из барабана равен [1]:

$$v_r = L_{c.r.} \cdot v_0 \cdot \frac{T_0 + t_{cp}}{T_0} \cdot \left(\frac{1}{M_{c.r.}} + \frac{x_{cp}}{M_B} \right), \quad (40)$$

где x_{cp} - среднее содержание влаги в сушильном агенте, кг/кг сухого воздуха, равное:

$$x_{cp} = \frac{x_1 + x_2}{2}, \quad (41)$$

$$x_{cp} = \frac{0,0262 + 0,108}{2} = 0,0671$$

Подставим значения в уравнение (39) получим:

$$v_r = 14,853 \cdot 22,4 \cdot \frac{273 + 200}{273} \cdot \left(\frac{1}{29} + \frac{0,0671}{18} \right) = 22,026 \text{ м}^3/\text{с}$$

$$\text{Тогда } \omega_d = 22,026 / (0,785 \cdot 3,2^2) = 2,74 \text{ м}^3/\text{с}$$

Действительная скорость газов ($\omega_d = 2,74 \text{ м}^3/\text{с}$) отличается от принятой в расчёте ($\omega = 2,4 \text{ м}^3/\text{с}$) менее чем на 15%. Некоторое уменьшение интенсивности процесса сушки при снижении скорости газов по сравнению с принятой в расчёте полностью компенсируется избытком

объёма выбранной сушилкой сравнению с расчётным. Если расхождение принятой и действительной скоростями газов более существенно, необходимо повторить расчёт, внося соответствующие коррективы.

Определим среднее время пребывания материала в сушилке [1]:

$$\tau = G_M / (G_K + W/2) \quad (42)$$

Количество находящегося в сушилке материала (в кг) равно:

$$G_M = V \beta \rho_M; \quad (43)$$

$$G_M = 200,96 \cdot 0,12 \cdot 1800 = 43407,36 \text{ кг}$$

$$\text{Отсюда } \tau = \frac{43407,36}{5,694 + \frac{1,215}{2}} = 6888,417 \text{ с.}$$

Зная время пребывания, рассчитаем угол наклона барабана α' [1]:

$$\alpha' = \left(\frac{30 \cdot L}{d \cdot n \cdot \tau} + 0,007 \cdot \omega_d \right) \cdot \left(\frac{180}{\pi} \right), \quad (44)$$

$$\alpha' = \left(\frac{30 \cdot 25}{3,2 \cdot 1,5 \cdot 6888,417} + 0,007 \cdot 2,74 \right) \cdot \left(\frac{180}{3,14} \right) = 2,4^\circ$$

Далее проверяем допустимую скорость газов, исходя из условия, что частицы высушиваемого материала наименьшего диаметра не должны уноситься потоком сушильного агента из барабана. Скорость уноса, равную скорости свободного витания $\omega_{с.в.}$ определим по уравнению:

$$\omega_{с.в.} = \frac{\mu_{cp}}{d \cdot \rho_{cp}} \cdot \left(\frac{Ar}{18 + 0,575 + \sqrt{Ar}} \right), \quad (45)$$

где μ_{cp} и ρ_{cp} - вязкость и плотность сушильного агента при средней температуре $t_{cp} = 200^\circ\text{C}$; Ar - критерий Архимеда.

Средняя плотность сушильного агента равна [1]:

$$\rho_{cp} = [M_{C.B.} \cdot (P_0 - p) + M_B \cdot p] \cdot \frac{T_0}{v_0 p_0 \cdot (T_0 + t_{cp})}, \quad (46)$$

$$\begin{aligned} \rho_{cp} &= [29 \cdot (10^5 - 9435,637) + 18 \cdot 9435,637] \cdot \frac{273}{22,4 \cdot 10^5 \cdot (273 + 200)} \\ &= 0,72 \text{ кг/м}^3. \end{aligned}$$

Определим вязкость сушильного агента μ_{cp} при средней температуре $t_{cp} = 200^\circ\text{C}$ [6]:

$$\mu_t = \mu_0 \frac{273 + C}{T + C} \left(\frac{T}{273} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (47)$$

где μ_0 - динамический коэффициент вязкости при 0°C , равен $17,3 \cdot 10^{-6}$ Па·с [6]; T - температура, равная $T = 200 + 273 = 473$ К; C - постоянная Сатерленда, при данных условиях $C = 124$ [6].

Подставим значения в уравнение (46) получим:

$$\mu_{200} = 17,3 \cdot 10^{-6} \frac{273 + 124}{473 + 124} \left(\frac{473}{273} \right)^{\frac{3}{2}} = 2,624 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

Критерий Архимеда:

$$Ar = \frac{d^3 \cdot \rho_{\text{ч}} \cdot \rho_{\text{ср}} \cdot g}{\mu_{\text{ср}}^2}, \quad (48)$$

где $\rho_{\text{ч}}$ - плотность частиц высушиваемого материала, равная для доломита: 2650 кг/м^3 [1];

$$Ar = \frac{(2,8 \cdot 10^{-3})^3 \cdot 2650 \cdot 0,72 \cdot 9,8}{(2,624 \cdot 10^{-5})^2} = 59,614 \cdot 10^4.$$

Тогда скорость уноса $\omega_{\text{с.в.}}$ находим по уравнению (44):

$$\omega_{\text{с.в.}} = \frac{2,624 \cdot 10^{-5}}{2,8 \cdot 10^{-3} \cdot 0,72} \cdot \frac{59,614 \cdot 10^4}{18 + 0,575 \cdot \sqrt{59,614 \cdot 10^4}} = 16,796 \text{ м/с}.$$

Рабочая скорость сушильного агента в сушилке ($\omega_{\text{д}} = 2,74 \text{ м/с}$) меньше, чем скорость уноса частиц наименьшего размера ($\omega_{\text{с.в.}} = 16,796 \text{ м/с}$), поэтому расчет основных размеров сушильного барабана заканчиваем.

3. Расчет и выбор вентилятора

Для выбора вентилятора, который должен обеспечить отвод требуемого количества сушильного агента $L_{с.г} = 14,853$ кг/с из сушилки, необходимо рассчитать избыточное давление, которое должен обеспечить вентилятор для преодоления гидравлического сопротивления системы сушилка – циклон – вентилятор, в которой фильтр не учитывается так как из-за малого значения скорости движения газов в нём $\Delta P_{\phi} = 0$ Па.

Пересчитаем массовый расход газа в объемный расход:

$$L_{с.г} = \frac{14,853}{\rho_{ср}} = \frac{14,853}{0,72} = 20,629 \text{ м}^3/\text{с}.$$

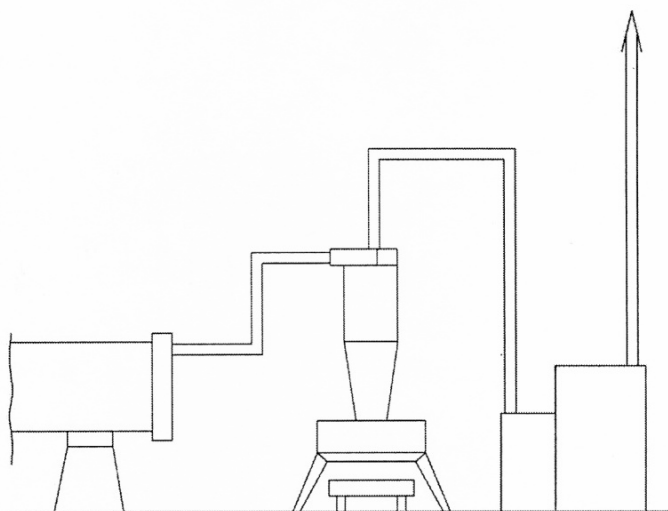


Рис. 3. Схема трубопровода к расчету вентилятора

Определим диаметр трубопровода круглого сечения [1]:

$$d_m = \sqrt{\frac{4L_{с.г}}{\pi\omega}}, \quad (49)$$

где $L_{с.г}$ – расход сухого газа, м³/с;

ω – скорость воздуха в трубопроводе, принимаем равной 10 м/с;

$$d_m = \sqrt{\frac{4 \cdot 20,629}{3,14 \cdot 20}} = 1,146 \text{ м}.$$

Выбираем трубу из углеродистой стали с наружным диаметром $d_m^{нар} = 1200$ мм и толщиной стенки $\delta_{ст} = 20$ мм по ГОСТ 10704 91.

Тогда внутренний диаметр трубы ($d_m^{вн}$) равен [1]:

$$d_m^{6H} = d_m^{нар} - 2\delta_{ст}; \quad (50)$$

$$d_m^{6H} = 1,220 - 2 \cdot 20 = 1,180 \text{ м.}$$

Определяем фактическую скорость воздуха в трубе [1]:

$$\omega_{факт} = \frac{4L_{с.з}}{\pi(d_m^{6H})^2} \quad (51)$$

$$\omega_{факт} = \frac{4 \cdot 20,629}{3,14 \cdot (1,180)^2} = 18,873 \text{ м/с.}$$

Определим критерий Рейнольдса для потока в трубопроводе [1]:

$$Re = \frac{\omega_{факт} \cdot d_m^{6H} \cdot \rho_{ср}}{\mu_{ср}}, \quad (52)$$

где $\mu_{ср}$ – вязкость сушильного агента при температуре $t_{ср} = 60^\circ\text{C}$ [6]:

$$\mu_{ср} = \mu_0 \cdot \frac{273 + C}{T + C} \cdot \left(\frac{T}{273}\right)^{\frac{3}{2}} \quad (53)$$

$$\mu_{ср} = 17,3 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{273 + 124}{20 + 124} \cdot \left(\frac{61 + 273}{273}\right)^{\frac{3}{2}} = 2,029 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с.}$$

Тогда:

$$Re = \frac{18,873 \cdot 1,180 \cdot 0,72}{2,029 \cdot 10^{-5}} = 790266,18$$

$Re > 10000$, следовательно имеем турбулентный режим движения газа.

Примем, что трубы были в эксплуатации, значит имеют незначительную коррозию. Тогда абсолютная шероховатость $\Delta = 0,15 \text{ мм}$ [1].

Определяем относительную шероховатость труб[1]:

$$e = \frac{\Delta}{d_T^{BH}} \quad (54)$$

$$e = \frac{1,5 \cdot 10^{-4}}{1,180} = 1,271 \cdot 10^{-4} \text{ мм.}$$

Определяем зону трения в трубопроводе [1]:

$$\frac{1}{e} = \frac{1}{1,271 \cdot 10^{-4}} = 7867,821;$$

$$\frac{10}{e} = \frac{10}{1,271 \cdot 10^{-4}} = 78678,206;$$

$$\frac{560}{e} = \frac{560}{1,271 \cdot 10^{-4}} = 4405979,544.$$

$$78678,206 < Re = 790266,18 < 4405979,544$$

Следовательно, в трубопроводе имеет место зона смешанного трения [1]. Определяем коэффициент трения в трубах [1]:

$$\lambda = 0,11 \cdot \left(e + \frac{68}{Re} \right)^{0,25} \quad (55)$$

$$\lambda = 0,11 \cdot \left(1,271 \cdot 10^{-4} + \frac{68}{790266,18} \right)^{0,25} = 0,0133.$$

Учитывая, что коррозия труб незначительна, рассчитаем сумму коэффициентов местных сопротивлений в соответствии с технологической схемой:

- вход в трубопровод (принимаем с закругленными краями): $\xi_1 = 0,2$;
- колено с углом 90° С (угольник): $\xi_2 = 1,1$;
- выход из трубопровода: $\xi_3 = 1$.

$$\sum \xi = \xi_1 + n \cdot \xi_2 + \xi_3, \quad (56)$$

где n – количество поворотов (колен) трубопровода, в рассматриваемом случае $n = 2$.

$$\sum \xi = 0,2 + 2 \cdot 1,1 + 1 = 3,4.$$

Определяем гидравлическое сопротивление трубопровода [1]:

$$\Delta P_T = \frac{\left(\frac{\lambda L}{d} + \sum \xi \right) \cdot \rho_{\text{ср}} \cdot \omega_{\text{факт}}^2}{2}, \quad (57)$$

где L – длина трубопровода, принимаем равной 20 м.

$$\Delta P_T = \frac{\left(\frac{0,0133 \cdot 20}{1,180} + 3,4 \right) \cdot 0,72 \cdot 18,873^2}{2} = 464,882 \text{ Па}.$$

Определяем избыточное давление, которое должен обеспечить вентилятор [1]:

$$\Delta P = \Delta P_{\text{сб}} + \Delta P_{\text{ц}} + \Delta P_T, \quad (58)$$

где $\Delta P_{\text{сб}}$ – гидравлическое сопротивление сушилки, которым можно пренебречь из-за малого значения скорости движения газов в сушильном барабане $\Delta P_{\text{сб}} = 0$ Па; $\Delta P_{\text{ц}}$ – гидравлическое сопротивление циклона, равное $\Delta P_{\text{ц}} = 491,388$ Па.

$$\Delta P = 0 + 491,388 + 464,882 = 956,27 \text{ Па}.$$

Таким образом, необходим вентилятор среднего давления. Определим его полезную мощность[1]:

$$N_{\Pi} = L_{c.g} \cdot \Delta P \quad (59)$$

$$N_{\Pi} = 20,629 \cdot 956,27 = 19,718 \text{ кВт.}$$

Мощность, которую должен развивать электродвигатель вентилятора на выходном валу при установившемся режиме работы, равна[1]:

$$N = \frac{N_{\Pi}}{\eta_v \eta_{\text{пер}}}, \quad (60)$$

где η_v – коэффициент полезного действия вентилятора, принимаем равный 0,6; $\eta_{\text{пер}}$ – коэффициент полезного действия передачи от электродвигателя к вентилятору, принимаем равным 1;

$$N = \frac{19,718}{1 \cdot 0,6} = 32,863 \text{ кВт.}$$

По справочным данным [8] выбираем вентилятор ВЦ 4-75 №16 (ВР 89-75-16) , основные характеристики которого приведены в таблице 2.

Таблица 2

Основные характеристики вентилятора ВЦ 4-75 №16 (ВР89-75-16)

Показатели	Значения
Производительность $L_{c.g}$, м ³ /ч	$76,55 \cdot 10^3$
Обеспечиваемое давление ΔP , Па	1288
Число оборотов двигателя n , об/мин	600
К.п.д. вентилятора η_v	0,74
Тип электродвигателя	4АМУ,5АМ
Мощность электродвигателя N , кВт	55
К.п.д. электродвигателя	0,8

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с заданием проведен расчет барабанной сушильной установки с подъемно-лопастными перевалочными устройствами для сушки доломита. По заданной производительности по сухому материалу, начальной и конечной влажности, температуре сушильного агента и температуре влажного материала, а также вида используемого топлива были определены: расход влаги, удаляемой из высушиваемого материала, расход сухого газа, воздуха, тепла, топлива на сушку. Для нахождения выше перечисленных значений был проведен совместный расчет уравнения теплового баланса. Был выбран сушильный барабан $\varnothing 3,2 \times 25$ Шанхайской компании.

Выбран вентилятор типа ВЦ 4-75 №16 (ВР 89-75-16).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Основные процессы и аппараты химической технологии: Пособие по проектированию / Г.С. Борисов, В.П. Брыков, Ю.И. Дытнерский и др. Под ред. Ю.И. Дытнерского, 3-е изд., стереотипное. М.: ООО ИД "Альянс", 2007. – 496 с.
2. Сушильные аппараты и установки. Каталог ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ. Изд. 3-е. – М.: 1988. – 73 с.
3. Аппараты с вращающимися барабанами общего назначения. Основные параметры и размеры. ГОСТ 11875-79
4. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: Химия, 1973. – 754 с.
5. Лыков М. В. Сушка в химической промышленности. – М.: Химия, 1973. – 754 с.
6. К.Ф.Павлов, П.Г, Романков, А.А. Носков Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. Учебное пособие для вузов /Под ред. чл.-корр. АН СССР П.Г. Романкова. - 10-е изд., перераб. и доп. - Л.: Химия, 1987. - 576 с., ил.
7. Оборудование для руды. Сушилка барабанная – URL: www.zgshmg.com (Дата обращения 04.12.17).
8. Центробежные вентиляторы (радиальные вентиляторы) низкого давления. Основные технические характеристики –URL: ventilator.od.ua (Дата обращения 04.12.17).