

10.1. Расчет конвективной сушки карьерного песка в барабанной вращающейся сушилке. Топливо – природный газ.

Исходные данные

Сушке подвергается карьерный песок* для строительных работ средней крупности 2-го класса (ГОСТ 8736-2014), модуль крупности 2,2. Исходная влажность песка 6%. Производительность по высушенному материалу 50 тонн в час. Конечная влажность 0,1%.

Дисперсный состав песка приведен в таблице 10-1.

Гранулометрический состав карьерного песка

Таблица 10-1

Фракция, мм	> 5,0	5,0-2,5-	2,5-1,25	1,25-0,63	0,63-0,315	0,315-0,16	0,16-0,063	< 0,063
Содержание, %	3,19	3,78	6,29	23,37	36,63	16,26	5,32	1,16

- Содержание пылевидных и глинистых частиц менее 0,1%
- Насыпной вес сухого материала 1600 кг/м³
- Кажущаяся (истинная) плотность материала 2100 кг/м³
- Теплоноситель - природный газ, низшая теплота сгорания 33600 кДж/м³
- Запыленность отходящих газов – не более 50 мг/м³.

Необходимо рассчитать расход природного газа на сушку карьерного песка, определить типоразмер сушильного барабана и вспомогательного оборудования (вентиляторы, циклоны, питатели, бункеры и др.).

Расчет выполнить для летнего и зимнего сезона Санкт Петербурга.

Технологическая схема сушки карьерного песка представлена на рис. 1

Влажный песок поступает с карьера предварительно очищенный от посторонних примесей (камней, веток, в зимнее время – от мерзлых кусков грунта). Ленточным конвейером влажный песок подается в промежуточный бункер 1, откуда шнековым питателем загружается в приемную камеру сушильного барабана 2.

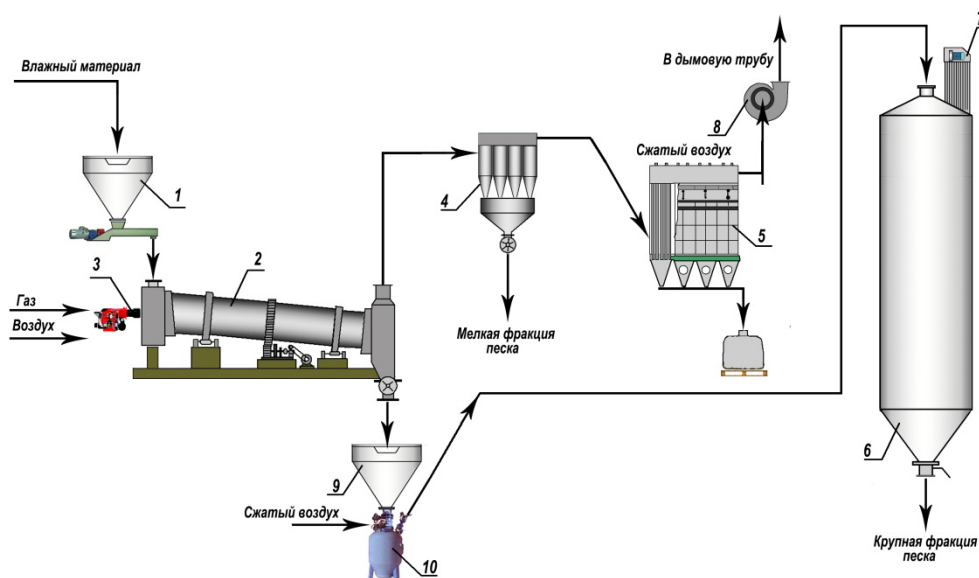


Рис 1. Технологическая схема сушки карьерного песка в барабанной сушилке:

- 1 – бункер, 2 – барабанная сушилка, 3 – горелка, 4 – циклон батарейный, 5 – фильтр рукавный, 6 – силосный бункер, 7 – фильтр картриджный, 8 – вентилятор, 9 – бункер приемный, 10 – пневмокамерный насос

* Карьер Калелово, Ленинградская обл., компания ЛСР

На сушилке установлена газовая горелка без топки. Дымовые газы газовой горелки 3 поступают непосредственно в сушильный барабан, где смешиваются с необходимым количеством воздуха.

Барабан имеет наклон 3° к горизонту, скорость вращения барабана регулируется частотным преобразователем и составляет 1-5 об/мин. Сушилка работает по прямоточной схеме.

Влажный материал пересыпается на лопастях сушилки, контактирует с горячими дымовыми газами, продвигаясь к разгрузочной камере сушилки. Высушенный материал выгружается шлюзовым питателем в приемный бункер 9.

Отработанные дымовые газы проходят последовательно очистку от пыли в циклоне 4, затем в рукавном фильтре 5, и вентилятором сбрасываются в дымовую трубу.

Высушенный материал пневмокамерным насосом направляется в силосный бункер 6.

1.1. Материальный баланс. Расчет количества испаренной влаги

Составим уравнения материального баланса по общей массе

$$G_H = G_K + W \quad (10.1)$$

и по сухому веществу

$$G_H(100 - w_H) = G_K(100 - w_K) \quad (10.2)$$

где w_H, w_K - начальная и конечная влажность материала, %, G_H, G_K - начальный и конечный расход материала (влажного и высушенного), кг/с, W - расход испаренной из материала влаги, кг/с.

Решая эти уравнения относительно неизвестных величин - G_H и W , получаем

$$G_H = G_K \frac{(100 - w_K)}{(100 - w_H)} = 14,761 \text{ кг/с} = 53,14 \text{ т/час} \quad (10.3)$$

$$W = G_H - G_K = 0,872 \text{ кг/с} = 3,138 \text{ т/час} \quad (10.4)$$

Теперь составим материальный баланс по воздуху, из которого определим количество воздуха (в пересчете на абсолютно сухой воздух), необходимого для сушки влажного материала.

Для расчета будем пользоваться диаграммой Рамзина ($I - x$ диаграммой влажного воздуха) и понятием о теоретической и реальной сушилке.

1.2. Диаграмма Рамзина

Пользуясь интернетом и диаграммой Рамзина, найдем характеристики атмосферного воздуха для летнего и зимнего периода Санкт-Петербурга (см. табл. 10-2).

Свойства влажного атмосферного воздуха

Таблица 10-2

№ пп	Наименование параметра	Лето (июль)	Зима (январь)
1	Средняя температура воздуха, °С	17,5	- 7,7
2	Относительная влажность воздуха, %	69	87
3	Влагосодержание воздуха, кг H ₂ O/(кг абс. сухого возд.)	0,009	0,001
4	Энтальпия воздуха, кДж/(кг абс. сухого возд.)	40	- 8

Параметры 3,4 получены из диаграммы Рамзина (см. рис. 2).

Поскольку карьерный песок не разрушается при высоких температурах, для сушки примем максимально возможную начальную температуру дымовых газов 750°C . При более высокой температуре создаётся опасность деформации барабана, при более низкой уменьшается скорость сушки и увеличиваются размеры сушильного барабана. Температуру отработанных дымовых газов примем 110°C , поскольку при более низкой температуре снижается скорость сушки материала, а из отработанных газов и возможна конденсация паров воды.

Для определения степени избытка воздуха и температуры смеси дымовых газов с воздухом составим баланс по воздуху и продуктам горения, исходя из реакции горения.

Состав и свойства природного (горючего) газа, поставляемого в районы Северо-Запада и Ленинградской области, приведен в таблице 10-3.

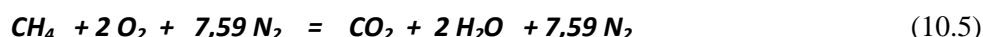
Свойства и состав природного газа

Таблица 10-3

№ пп	Наименование параметра
1	Состав природного газа: $\text{CH}_4 - 98,0 \%$, $\text{C}_2\text{H}_6 - 1,0 \%$, $\text{C}_3\text{H}_8 - 0,2 \%$, $\text{C}_4\text{H}_{10} - 0,3 \%$, $\text{CO} - 0,2 \%$, $\text{H}_2 - 0,3 \%$.
2	Средняя молярная масса, 16,41 кг/кмоль
3	Плотность при 20°C и 760 мм.рт.ст. 0,683 кг/м ³
4	Низшая теплота сгорания, 49195 кДж/кг 33600 кДж/м ³ (20°C, 760 мм.рт.ст.)

Так как основной компонент природного газа метан (98% CH_4), то все расчеты будем вести по метану, поскольку это не повлияет существенно на точность расчетов.

Уравнение реакции горения метана выглядит следующим образом:



$$16 \text{ кг} + 64 \text{ кг} + 212,5 \text{ кг} = 44 \text{ кг} + 36 \text{ кг} + 212,5 \text{ кг} \quad (10.5a)$$

$$1 \text{ кг} + 4,0 \text{ кг} + 13,28 \text{ кг} = 2,75 \text{ кг} + 2,25 \text{ кг} + 13,28 \text{ кг} \quad (10.5b)$$

В уравнение реакции записан азот для удобства расчета. Воздух содержит 23,15% масс. кислорода и 76,85% масс. азота и других инертных газов. Записывая молекулярный вес каждого из компонентов (10.5a), определяем количество продуктов горения (10.5b) на 1 кг природного газа. При сгорании 1 кг метана образуется:

- 2,75 кг углекислого газа,
- 2,25 кг водяного пара,
- 13,28 кг азота

Из строки (10.5b) можно определить массу воздуха $g_{\text{в}}$, теоретически необходимую для сгорания 1 кг метана:

$$g_{\text{в}} = 4,0 \text{ кг} + 13,28 \text{ кг} = 17,28 \text{ кг} \quad (10.6)$$

и количество дымовых газов $g_{\text{дг}}$, образующихся при сгорании 1 кг метана:

$$g_{\text{дг}} = 2,75 + 13,28 \text{ кг} = 16,03 \text{ кг} \text{ (без учета паров воды)} \quad (10.7)$$

Влагосодержание дымовых газов рассчитывается на абсолютно сухое количество дымовых газов:

$$x_{\text{дг}} = 2,25 / 16,03 = 0,140 \text{ кг/кг}, \quad (10.8)$$

где $x_{\text{дг}}$ - влагосодержание дымовых газов, кг H_2O /(кг дым. газов).

Принимая во внимание, что физические свойства разбавленного воздухом дымовых газов близки свойствам чистого воздуха, для расчета сушки будем пользоваться диаграммой Рамзина для влажного воздуха.

Следовательно, принимаем: кг H_2O /(кг сух. дым. газов) \sim кг H_2O /(кг абс. сух. воздуха).

1.3. Определение коэффициента избытка воздуха

Примем температуру разбавленного воздухом дымовых газов, поступающих на сушку, 750°C. Определим коэффициент избытка воздуха, необходимого для получения такой температуры. Коэффициент избытка воздуха – это количество воздуха, отнесенное к количеству воздуха, теоретически необходимого для сгорания метана:

$$\alpha = G_{\text{в}} / g_{\text{в}} \quad (10.9)$$

где $g_{\text{в}}$ - масса воздуха, необходимого для сгорания 1 кг метана, кг/кг, $G_{\text{в}}$ - масса воздуха, поступившего для горения 1 кг метана, кг/кг.

Для этого составим тепловой баланс, который запишем в табл. 10-4.

Тепловой баланс сгорания 1 кг метана, кДж/кг

Таблица 10-4

<i>Приход тепла</i>		<i>Расход тепла</i>	
Теплосодержание исходного метана	$c_m \cdot t_{m0}$	Теплосодержание дымовых газов	$g_{дг} [(c_b + c_{п}(x_0 + x_{дг}))t_{г} + r(x_0 + x_{дг})]$
Теплосодержание исходного воздуха	$\alpha g_b \cdot [(c_b + c_{п}x_0)t_0 + rx_0]$	Теплосодержание нагретого воздуха	$(\alpha - 1)g_b \cdot [(c_b + c_{п}x_0)t_{г} + rx_0]$
Теплота сгорания метана	q_m		

где $c_m, c_b, c_{п}$ – теплоемкость метана и сухого воздуха и водяного пара,

$$c_m = 2,20 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}, c_b = 1,005 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}, c_{п} = 1,97 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)},$$

r – теплота испарения воды при атмосферном давлении, $r = 2493 \text{ кДж/кг}$

$g_{дг}$ – количество дымовых газов, получающихся при сгорании 1 кг метана, $g_{дг} = 16,03 \text{ кг/кг}$,

g_b – количество воздуха, необходимого для сгорания 1 кг метана, $g_b = 17,28 \text{ кг/кг}$,

$x_0, x_{дг}$ – влагосодержание воздуха и дымовых газов, кг/кг, $x_0 = 0,009, x_{дг} = 0,140$.

$t_0, t_{г}$ – исходная температура воздуха и конечная температура смеси дымовых газов с воздухом после сжигания метана, °С, t_m – исходная температура метана, °С,

q_m – низшая* теплота сгорания метана, $q_m = 50042 \text{ кДж/кг}$, однако мы возьмем для расчета низшую теплоту сгорания для природного газа, представляющего собой смесь газов состав которой указан в таблице 10-4, $q_{г} = 49195 \text{ кДж/кг}$.

Здесь также принято, что теплофизические свойства воздуха и дымовых газов близки, поэтому теплоемкость сухих дымовых газов равна теплоемкости сухого воздуха.

Пренебрегая потерями тепла, записываем уравнение теплового баланса:

$$c_m t_{m0} + \alpha g_b [(c_b + c_{п} x_0) t_0 + r x_0] + q_{г} = (\alpha - 1) g_b [(c_b + c_{п} x_0) t_{г} + r x_0] + g_{дг} [(c_b + c_{п}(x_0 + x_{дг})) t_{г} + r(x_0 + x_{дг})] \quad (10.10)$$

Примем температуру метана равной температуре воздуха $t_{m0} = t_0$.

Для упрощения введем обозначения

$$A = c_m t_0 + \alpha g_b (c_b + c_{п} x_0) t_0 + q_{г},$$

$$B = g_b r x_0 - g_{дг} r (x_0 + x_{дг}).$$

Решая уравнение (10-10) относительно $t_{г}$ определяем температуру дымовых газов для конкретного значения коэффициента избытка воздуха:

$$t_{г} = \frac{A + B}{(\alpha - 1) g_b (c_b + c_{п} x_0) + g_{дг} (c_b + c_{п}(x_0 + x_{дг}))} \quad (10.11)$$

В таблице 10-5 дана зависимость температуры смеси дымовых газов с воздухом от коэффициента избытка воздуха при начальной температуре воздуха $t_0 = 17,5^{\circ}\text{C}$.

Коэффициент избытка воздуха α должен быть не менее 1,15, при меньшем значении коэффициента происходит неполное сгорание газа и образование копоти.

Зависимость температуры смеси дымовых газов с воздухом в зависимости от коэффициента избытка воздуха

Таблица 10-5

α	1,15	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
$t_{г}$	1761	1394	1074	873	736	636	560

Формулу (11) можно рассчитать на калькуляторе или в программе *excel* и определить значение коэффициента избытка воздуха для любой температуры. Для расчета примем

** Низшая теплотворная способность (теплота сгорания) – количество теплоты, выделяемой при полном сгорании топлива без конденсации водяного пара. Высшая теплотворная способность – количество теплоты, выделяемой при полном сгорании топлива, охлаждении продуктов сгорания до температуры топлива и конденсации водяного пара, образовавшегося при окислении водорода, входящего в состав топлива. Поскольку дымовые газы после сушки отводятся при температуре выше температуры конденсации паров воды, то мы используем низшую теплоту сгорания.

коэффициент избытка воздуха $\alpha = 2,94$, тогда температура сушильного агента на входе в сушильную камеру составит 750°C .

Таким образом, для получения заданной начальной температуры сушильного агента необходим трехкратный избыток воздуха. Обычно в газовой горелке устанавливается коэффициент избытка воздуха 1,15, а остальное количество воздуха поступает в топку, (сушильный барабан), а также не организованно в виде подсосов через загрузочный люк, неплотности барабана и регулируется дутьевым вентилятором и разряжением, которое создает вытяжной вентилятор на выходе из сушильного барабана.

1.4. Определение параметров процесса сушки и размеров сушильного барабана

На рис. 2 изображен процесс сушки карьерного песка на диаграмме Рамзина. Исходная точка **A** характеризует свойства атмосферного воздуха (для летних условий $x_0=0,009$). При смешении дымовых газов с влажностью $x_{дг}=0,140$ с атмосферным воздухом, в соответствии с коэффициентом избытка $\alpha = 2,94$, получаем влажность дымовых газов на входе в сушильную камеру (сушильный барабан):

$$x_1 = \frac{\alpha g_v x_0 + g_{дг} x_{дг}}{(\alpha - 1)g_v + g_{дг}} = 0,055 \text{ кг/кг} \quad (10.12)$$

Следовательно, точка **B** характеризует параметры влажных дымовых газов на входе в сушильную камеру. Изменение параметров дымовых газов в процессе теоретической сушки идет по линии постоянной энтальпии (линия **BC**). Примем температуру дымовых газов на выходе из сушильного барабана 110°C^* . Тогда для теоретической сушки влажность дымовых газов на выходе из сушильной камеры составит $x_2=0,333$ кг/кг.

Рассчитаем удельный расход тепла и удельный расход сушильного агента:

$$l_T = \frac{1}{x_2 - x_1} = 3,597 \text{ кг/кг}, \quad q_T = l_T \cdot (I_1 - I_0) = 3561 \text{ кДж/кг} \quad (10.13)$$

По диаграмме Рамзина определяем $I_1=1030$ кДж/кг, $I_0=40$ кДж/кг.

Зная расход испаренной влаги 0,872 кг/с (уравнение 10.4), определим расход сушильного агента (дымовых газов) и расход тепла на теоретическую сушку:

$$L_T = W \cdot l_T = 3,137 \text{ кг/с}, \quad Q_T = q_T \cdot W = 3105 \text{ кВт} \quad (10.14)$$

Объемный расход отработанных дымовых газов при температуре 110°C составит:

$$V_T = \frac{L_T(1 + x_2)}{\rho_2} = 4,610 \text{ м}^3/\text{с} = 16595 \text{ м}^3/\text{час}, \quad (10.15)$$

где ρ_2 – плотность дымовых газов при 110°C . $\rho_2 = 0,907$ кг/м³. Для реальной сушки расход дымовых газов будет больше на 20-40%.

По справочным данным средняя допустимая скорость дымовых газов в барабане для кажущейся плотности песка 2100 кг/м³ с размером частиц 0,1- 0,6 мм составляет 3 м/с.

Однако для песка средней крупности рекомендуется брать скорость газов 1,5-2,0 м/с.

Невысокая скорость дымовых газов в барабане позволит уменьшить пылевынос из барабана и снизить нагрузку на пылеочистное оборудование. Примем скорость дымовых газов 1,5 м/с. Диаметр барабана, при его заполнении материалом на 20%, составит:

$$D_T = \sqrt{\frac{V_T}{0,785 \cdot 0,8 \cdot w}} = 2,2 \text{ м}, \quad \text{для реальной сушки } 2,6 \text{ м} \quad (10.16)$$

Для дальнейших расчетов примем диаметр барабана 2600 мм.

* Конечная температура сушильного агента после сушки зависит от скорости сушки и длины барабана, точнее, времени контакта сушильного агента с поверхностью влажного материала. Для барабанной сушки имеются расчетные зависимости скорости сушки, по которым можно определить конечную температуру сушильного агента (см. гл.6.7 с.69 и [51]). Однако чаще всего принимают конечную температуру сушильного агента на $20-30^{\circ}\text{C}$ выше точки росы и исходя из этого рассчитывают длину сушильного барабана по эмпирическим рекомендациям.

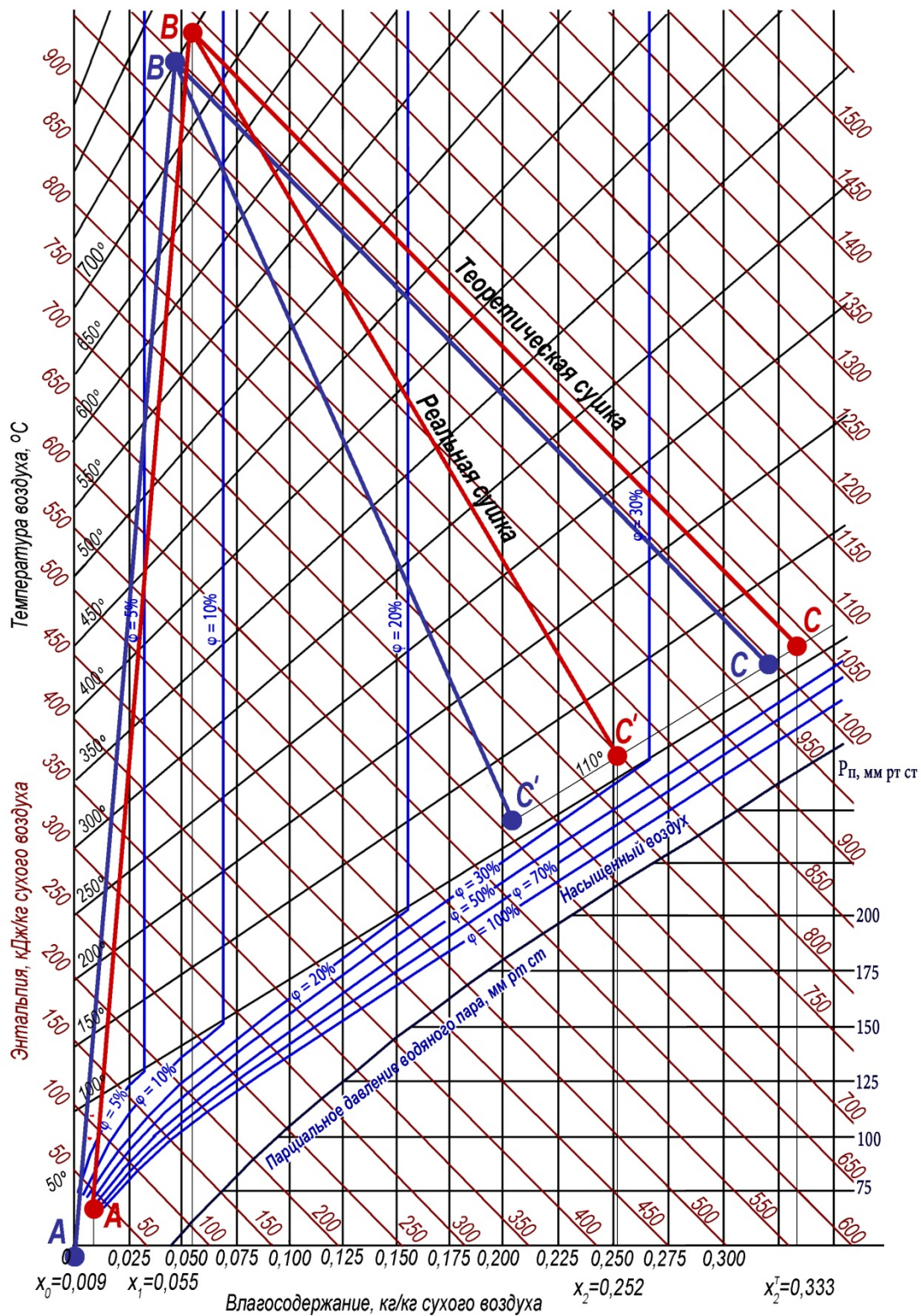


Рис. 1. Изображение процесса сушки карьерного песка на диаграмме Рамзина (летние условия - красные линии, зимние условия – синие линии)

Рекомендуемая длина барабана принимается $(3,5-7) \cdot D_T$. Примем длину барабана 14 м. Боковая поверхность барабана с учетом теплоизоляции 40 мм составит 118 м².

Зная размеры барабана, определим потери тепла $Q_{\text{пот}}$ в окружающую среду. Сушильный барабан для карьерного песка обычно устанавливается на открытой площадке и теплоизолируется слоем минеральной ваты. Расчет теплопотерь для слоя изоляции толщиной 40 мм при средней температуре в сушильном барабане 430°C дает следующие значения:

- для летнего периода (+ 17,5°C) потери тепла 433 Вт/м², температура на стенке 53°C,
 - для зимнего периода (- 7,7°C) потери тепла 460 Вт/м², температура на стенке 30°C,
- Коэффициент теплопроводности теплоизоляции принят равным 0,046 Вт/(м·К).

Для летних условий потери тепла $Q_{\text{пот}}$ составят $433 \cdot 118/1000=51,1$ кВт. Для условий зимы потери тепла через кожух барабана 54,3 кВт.

Примем теплоемкость материала 840 Дж/(кг·К). Температура песка на входе в сушильный аппарат равна температуре окружающей среды 17,5°C, на выходе примем 110°C. Тогда расход тепла на нагрев материала составит $50000/3600 \cdot 840/1000 \cdot (100-17,5)=1079$ кВт для летних условий и 1373 кВт для условий зимы.

Для летних условий удельные потоки тепла равны:

$$q_{\text{пот}} = \frac{Q_{\text{пот}}}{W} = 58,6 \text{ кДж/кг}, \quad q_M = \frac{Q_M}{W} = 1237 \text{ кДж/кг} \quad (10.17)$$

Рассчитаем внутренний баланс сушильной камеры:

$$\Delta = c_B \theta_n - q_M - q_{\text{пот}} = 4,19 \cdot 17,5 - 1237 - 58,6 = -1222 \text{ кДж/кг} \quad (10.17a)$$

Зная значение внутреннего баланса Δ , построим реальную сушилку на диаграмме Рамзина. Для этого уравнение

$$I_2 = I_1 + \Delta \cdot (x_2 - x_1). \quad (10.17b)$$

Представим в виде

$$I = I_1 + \Delta \cdot (x - x_1),$$

Зададимся произвольным значением x , вычислим I и построим прямую линию. Например, при $x=0,250$ кг/кг, $I_1=1030$ кДж/кг, $I=1030-1222 \cdot (0,250-0,055)=792$ кДж/кг.

Проведя прямую линию от I_1 через точку I получаем линию изменения параметров влажного воздуха (дымовых газов) для реальной сушилки – линия BC' . На этой линии при температуре 110°C влагосодержание дымовых газов $x_2=0,252$ кг/кг (точка C').

Рассчитаем удельный расход тепла и удельный расход сушильного агента для реальной сушилки:

$$l = \frac{1}{x_2 - x_1} = 5,07 \text{ кг/кг}, \quad q = l \cdot (I_1 + I_0) = 5019 \text{ кДж/кг} \quad (10.18)$$

Зная расход испаренной влаги, определим расход сушильного агента (дымовых газов) и расход тепла для реальной сушки:

$$L = W \cdot l = 4,42 \frac{\text{кг}}{\text{час}}, \quad Q = q \cdot W = 4377 \text{ кВт} \quad (10.19)$$

Объемный расход отработанных дымовых газов:

$$V = \frac{L(1 + x_2)}{\rho_2} = 6,10 \text{ м}^3/\text{с} = 23465 \text{ м}^3/\text{час}, \quad (10.20)$$

где ρ_2 – плотность дымовых газов при 110°C, $\rho_2 = 0,907$ кг/м³.

Диаметр барабана реальной сушилки составит:

$$D = \sqrt{\frac{V}{0,785 \cdot 0,8 \cdot w}} = 2,54 \text{ м}, \quad (10.21)$$

Примем диаметр барабана 2600 мм. Длина барабана 14000 мм.

Тогда скорость дымовых газов в барабане составит 1,44 м/с.

Для зимних условий получаем следующие значения:

$$l = \frac{1}{x_2 - x_1} = 6,23 \text{ кг/кг}, \quad q = l \cdot (I_1 + I_0) = 5902 \text{ кДж/кг} \quad (10.18a)$$

$$L = W \cdot l = 5,43 \frac{\text{кг}}{\text{час}}, \quad Q = q \cdot W = 5145 \text{ кВт} \quad (10.19a)$$

$$V = \frac{L(1 + x_2)}{\rho_2} = 7,24 \frac{\text{м}^3}{\text{с}} = 26051 \frac{\text{м}^3}{\text{час}}. \quad (10.20)$$

Зимой скорость дымовых газов в барабане будет выше, так как для нагрева холодного воздуха требуется больше газа. Скорость дымовых газов зимой составит 1,7 м/с.

Расход природного горючего газа

$$V_{\text{г}} = \frac{Q}{q_{\text{г}}} = 0,130 \frac{\text{м}^3}{\text{с}} = 469 \text{ м}^3/\text{час}, \quad \text{зимой } 551 \text{ м}^3/\text{час} \quad (10.22)$$

Коэффициент полезного действия сушилки:

$$\eta = \frac{r_0}{Q} = 54,4\%, \quad \text{зимой } 46,3\%. \quad (10.23)$$

Напряженность сушильного барабана по влаге составит:

$$A_v = \frac{W}{0,8 \cdot V_6} = 53 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3 \cdot \text{час}}. \quad (10.23)$$

Практические значения A_v для песка, приведенные в литературе находятся в пределах 80 - 100 кг/(м³·час). Выбранная сушилка будет работать с запасом по производительности, либо сможет сушить песок с большей влажностью.

Таким образом, окончательно принимаем для сушки 50 т/час карьерного песка сушильный барабан БС-2,6x14. Результаты расчета сведены в таблицу 10-6.

Результаты расчета барабанной сушильной установки

Таблица 10-6

Наименование	Значение	
	Лето	Зима
Расход влажного материала с влажностью 6%, т/час	53,14	
Количество испаренной влаги, т/час,	3,14	
Расход высушенного материала с влажностью 0,1%, т/час, в том числе:	50,0	
крупная фракция песка (сушилка)	47,2	
мелкая фракция песка (циклон)	2,6	
пыль (рукавный фильтр)	0,2	
Коэффициент избытка воздуха α	2,94	2,88
Температура дымовых газов, начальная °С	750	
Температура отходящих газов после сушки, °С	110	
Размеры барабана сушилки:		
Диаметр, м	2,6	
Длина, м	14,0	
Расход дымовых газов, тыс. м ³ /час (при 110 °С)	23,47	26,05
Скорость дымовых газов на выходе из барабана, м/с	1,44	1,70
Тепловая мощность, МВт	4,38	5,15
Расход природного газа на горение, м ³ /час	469	551
Напряженность сушильной камеры по испаренной влаге, кг/(м ³ ·час)	53	
Установленная мощность привода барабана, кВт	55	
Масса барабанной сушилки, т	14	

Таким образом, сушка песка характеризуется следующими параметрами:

- удельный расход природного газа 9,4 м³/т (лето), 11,0 м³/т (зима)
- удельный расход электроэнергии 1,1 кВт.час/т

1.5. Определение пылевыноса из сушильного барабана

Мелкая фракция песка и пыль выносятся из барабана вместе с потоком дымовых газов и осаждаются в циклонах и рукавном фильтре (см. рис. 1). Для расчета пылевыноса рассчитаем скорость осаждения $w_{ос}$ частиц песка по формуле

$$Re_{ос} = \frac{Ar}{(18 + 0,575\sqrt{Ar})}, \quad (10.24)$$

$$Re_{ос} = \frac{w_{ос} d \rho}{\mu}, \quad Ar = \frac{g d^3}{\mu^2} \rho_T \rho,$$

где ρ – плотность дымовых газов, кг/м³, μ – динамический коэффициент вязкости газов, Па·с, ρ_T – плотность частиц песка, кг/м³, d – размер частиц песка, м.

Расчет скорости осаждения для фракций песка приведен в таблице 10-7

Расчет скорости осаждения частиц карьерного песка

Таблица 10-7

Фракция, мм	> 5,0	5,0-2,5	2,5-1,25	1,25-0,63	0,63-0,315	0,315-0,16	0,16-0,05	< 0,05
Средний размер, мм	5,0	3,75	1,88	0,94	0,47	0,24	0,11	0,025
Скорость осаждения, м/с	15,7	15,7	10,7	6,82	3,79	1,68	0,46	0,03

В связи с тем, что материал, подвергаемый сушке, является тонкодисперсным, образуется большой пылеунос в систему аспирации. Для снижения пылевыноса корпус барабана разбит на 4 зоны:

1. Зона подъемных лопаток, с большой площадью и высотой. Данная конструкция обеспечивает интенсивную сушку в начале процесса, когда материал влажный и пылевыделение незначительно
2. Зона подъемно-лопастных лопаток
3. Зона секторных насадок, которая обеспечивает минимальное пылеобразование
4. Зона без лопаток, в конце барабана лопасти не устанавливаются, материал сыпается в нижнюю часть барабана и выгружается в приемный бункер.

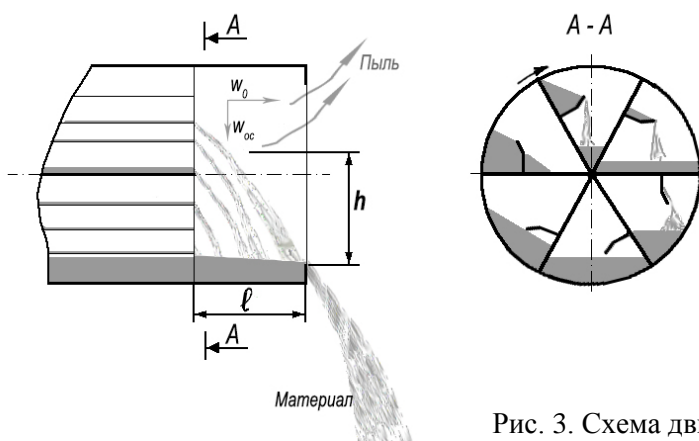


Рис. 3. Схема движения материала в концевой части сушильного барабана

Схема движения материала и воздуха в концевой части барабана дана на рис. 3. Крупные частицы имеют высокую скорость осаждения и успевают упасть вниз и выгрузиться из барабана. Мелкие частицы не успевают достичь нижней части барабана и выносятся потоком дымовых газов в вытяжной газопровод и далее в циклоны и фильтр.

Оценить вероятность выноса частиц можно с помощью отношения времени осаждения частиц к времени движения их в горизонтальном потоке дымовых газов в барабане:

- время осаждения $\tau_{oc} = h/(\varphi w_{oc})$
- время движения в потоке $\tau_0 = l/w_0$,

здесь коэффициент φ характеризует влияние стесненности ссыпаемого с лопаток материала.

При стесненном осаждении частиц более мелкие частицы тормозят движение более крупных, а частицы больших размеров увлекают за собой мелкие частицы, ускоряя их движение. Поэтому для крупных частиц коэффициент $\varphi < 1$, а для мелких частиц коэффициент $\varphi > 1$.

Оценочный коэффициент пылевыноса запишется в виде условия

$$A_w = \frac{\tau_{oc}}{\tau_0} = \frac{h}{l\varphi} \cdot \frac{w_0}{w_{oc}} \sim K_w \frac{w_0}{w_{oc}}. \quad (10.25)$$

Коэффициент стесненности $\varphi \sim 0,5 \div 0,7$ для крупных частиц и $\varphi = 1,3 \div 1,5$ для мелких частиц. Примем для мелких частиц $K_w = 0,9$. Расчет пылевыноса из барабана диаметром 2,6 м представлен в таблице 10-8. Чем больше A_w , тем больше пылевынос.

Пылевынос для каждой фракции G_{wi} (кг/час) определялся из условия:

$$G_{wi} = 0, \text{ если } A_{wi} \leq 1$$

$$G_{wi} = G_{0i} \left(1 - \frac{1}{A_{wi}}\right), \text{ если } A_{wi} > 1 \quad (10.26)$$

где G_{0i} – расход фракции i в исходном высушенном материале, кг/час.

Расчет пылевыноса из сушильного барабана

Таблица 10-8

Диаметр сушилки	2,60	м		Скорость дымов газов на выходе из барабана			1,70	м/с	$K_w = 0,90$	
Лен. обл., ЛСР, карьер Калелово	50 000		кг/час	Пылевынос	5,2%	Запыленность дым газов, $кг/м^3$		0,100		
Фракция, мм	> 5,0	5,0-2,5	2,5-1,25	1,25-0,63	0,63-0,315	0,315-0,16	0,16-0,05	< 0,05	Сумма	
А. Исходный материал										
Содержание фракции, %	3,19	3,78	6,29	27,37	36,63	16,26	5,32	1,16	100,0%	
Исх продукт G_{0i} , кг/час	1 595	1 890	3 145	13 685	18 315	8 130	2 660	580	50 000	
Скорость осаждения, м/с	> 10	> 10	10,67	6,82	3,79	1,68	0,46	0,03		
Кэф пылевыноса A_w , %	0,00	0,00	0,14	0,25	0,45	1,01	3,67	54,79		
Процент пылевыноса, %	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	1,3%	72,7%	98,2%		
Б. Пыль уноса сушилки										
Содержание фракции, %	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	4,2%	74,0%	21,8%	100,0%	
Пыль уноса, кг/час	0	0	0	0	0	109	1 934	569	2 613	
В. Сухой материал на выходе из сушилки										
Содержание фракции, %	3,4%	4,0%	6,6%	28,9%	38,6%	16,9%	1,5%	0,0%	100,0%	
Продукт сушки, кг/час	1 595	1 890	3 145	13 685	18 315	8 021	726	11	47 387	
Баланс	1 595	1 890	3 145	13 685	18 315	8 130	2 660	580	50 000	

Как видно из таблицы самый большой унос пыли для фракции <0,05 мм составляет 98,2%. Всего выносятся потоком дымовых газов 2 613 кг пыли, следовательно, пылевынос составит 5,2%. Запыленность газов на выходе из барабана $2613/26051=0,100$ кг/м³.

1.6. Выбор вспомогательного оборудования

Расчет и выбор циклона, рукавного фильтра и дымососа

В состав сушильной установки, кроме сушильного барабана входит вспомогательное оборудование для транспортировки, загрузки и выгрузки материала, для подачи и удаления воздуха и очистки дымовых газов (см. рис. 1). Сушильная установка также должна быть оснащена автоматической системой управления технологическим процессом (АСУТП).

Состав оборудования приведен в таблице 10-9.

В системе пылеочистки дымовых газов обычно используют две стадии очистки – циклоны (1-я стадия) и рукавный фильтр. Рукавный фильтр может быть заменен электрофильтром или скруббером. Иногда, при незначительном пылевыносе из сушильного барабана, первую стадию очистки совмещают со второй (используют только фильтр).

Для расчета необходимо знать расход дымовых газов. Поскольку для зимних условий расход дымовых газов больше, возьмем для расчета 26,05 тыс. м³/час (см. табл. 10-6).

Для средней и мелкодисперсной пыли применяют циклоны ЦН-11, ЦН-15 и некоторые другие. Возьмем циклон СЦН-40, который более эффективно очищает воздух и газы от мелкой и средней пыли. Высокая степень очистки в циклоне СЦН-40 достигнута за счет повышения интенсивности вращательного движения газа в корпусе циклона и одновременного снижения скорости радиального стока в направлении к выхлопной трубе.

Степень очистки в циклоне СЦН-40 при оптимальных условиях составляет до 95 %.

Для нашего расхода принимаем групповой циклон СЦН-40-1200х4, его гидравлическое сопротивление составит:

$$\Delta p_{\text{ц}} = \zeta \cdot \frac{\rho w_{\text{ц}}^2}{2} = 1277 \text{ Па}, \quad (10-27)$$

где $\zeta = 1100$ – коэффициент сопротивления циклона, $w_{\text{ц}} = 1,6$ м/с – условная скорость дымовых газов в циклоне.

Примем степень очистки в циклоне 92%, тогда количество материала, осевшего в бункере циклона составит (таблица 10-8) $2613 \cdot 0,92 = 2404$ кг/час.

В рукавный фильтр поступит $2613 \cdot (1-0,92) = 209$ кг/час пылеобразного карьерного песка. После циклона запыленность дымовых газов будет $209/26050 = 0,008$ кг/м³ = 8 г/м³.

Принимая степень очистки воздуха в рукавном фильтре 99,5%, получаем запыленность дымовых газов на выходе из рукавного фильтра $8 \cdot (1-0,995) = 0,40$ г/м³ = 40 мг/м³. В рукавном фильтре осядет 208 кг/час пыли.

При прохождении циклонов температура газов уменьшится, и уменьшится объемный расход дымовых газов. Падение температуры на циклонах зависит от температуры окружающей среды и составляет примерно 20-30°C. Пересчет объемного расхода на температуру 80°C дает результат 24,0 тыс. м³/час. Скорость фильтрации дымовых газов через фильтроткань в зависимости от типа пыли и условий фильтрации принимают 0,7 - 2,0 м/мин. Для кварцевого песка рекомендуемая скорость фильтрации 1,6 м/мин. Поверхность фильтрации составит $24000/60/1,6 = 250$ м².

По каталогу производителя принимаем к установке рукавный фильтр с импульсной продувкой фильтровальных рукавов ФРИ-300. Характеристики фильтра и компрессора к нему указаны в таблице 10-9.

Основное гидравлическое сопротивление создают циклоны и рукавный фильтр. Потери давления в сушильном барабане и газоходах незначительны и составляют примерно 300 Па. Принимаем с запасом общее гидравлическое сопротивление системы 4,0 кПа, в том числе циклоны 1,4 кПа, фильтр 2,0 кПа.

По расходу дымовых газов 24 тыс. м³/час и гидравлическому сопротивлению 4,0 кПа выбираем дымосос (вентилятор) ВР 132-30-11,2, исполнение 1, 75 кВт, характеристики указаны в таблице 10-9. Для регулировки производительности на электродвигатель вентилятора устанавливается преобразователь частоты

1.7. Расчет транспортеров, выбор газовой горелки

Газовую горелку выбираем для зимних условий сушки. Мощность горелки должна быть не менее 5,6 МВт. По каталогу итальянского производителя берем модулируемую газовую горелку Lamborghini LMB G 6500 RE-V (DN65), мощность 2000-6500 кВт, расход газа 212-628 м³/час.

Подачу влажного материала в сушилку проектируют исходя из рельефа местности и плана добычи песка в карьере. Исходный материал загружают в бункер, под которым устанавливается грохот. На грохоте из песка удаляются посторонние предметы (ветки, камни, зимой - смерзшийся материал). Из-под грохота материал обычно поступает на ленточный транспортер и поднимается на высоту загрузочного бункера сушилки. Длина транспортера зависит от рельефа местности и учитывает максимальный угол наклона транспортера (11-15°). Над загрузочным бункером сушилки устанавливается приемный бункер, и шлюзовый или винтовой питатель для того, чтобы обеспечить герметичность загрузки материала. Примерный перечень загрузочного оборудования приведен в таблице 10-9.

Выгрузка высушенного материала происходит через шлюзовый затвор, либо винтовым питателем. Это необходимо для обеспечения герметичности, чтобы исключить подсос окружающего воздуха в систему аспирации. Подъем высушенного материала в силосный бункер осуществляется цепным ковшовым элеватором. Возможен вариант пневмотранспорта. Выбор определяется условиями работы производства.

Для бесперебойной работы участка сушки необходимо установить как минимум два силосных бункера, объемом 500 м³ каждый. Под силосами устанавливаются телескопические загрузчики для загрузки автотранспорта. Под силосами могут быть установлены автомобильные весы.

Также необходимо обеспечить выгрузку мелкой фракции песка из циклонов и пыли из рукавного фильтра (в таблице 10-9 эти устройства не учтены).

Высушенный песок используется на предприятиях, выпускающих сухие строительные смеси (ССС) и некоторые виды строительных материалов.

Оборудование сушильной установки

Таблица 10-9

№ пп	Наименование, характеристики оборудования	Стоимость, тыс. руб
1	Сушилка барабанная БС 2,6х14, мощность привода 75 кВт, масса 62 т	14 300
2	Газовая горелка Lamborghini LMB G 6500 RE-V (DN65), мощность 2000-6500 кВт, расход газа 212-628 м ³ /час	1 620
3	Циклон групповой СЦН-40-1200х4	860
4	Фильтр рукавный ФРИ-300. Производительность 10,4 – 36,0 тыс. м ³ /час, Площадь фильтрации 300 м ² (240 рукавов), гидравлическое сопротивление 2,0 кПа, запыленность на входе до 80 г/м ³ , на выходе 10 мг/м ³ .	2 850
5	Компрессор винтовой для регенерации рукавов фильтроткани ФРИ-300, 1500 л/мин, 0,6 МПа, 15 кВт,	1 300
6	Вентилятор ВР 132-30-11,2, исполнение 1, 75 кВт, 1500 об/мин, 4,8-6,1 кПа, 10-30 тыс. м ³ /час (с преобразователем частоты)	480
7	Грохот ГИЛ-41, 11 кВт	560
8	Ленточный транспортер ЛК-650 мм, L 30м, 8 кВт	360
9	Бункер 40 м ³	80
10	Шлюзовый питатель ШП-400, 2,2 кВт	90
11	Винтовой (шнековый) питатель D250 мм, L1,5 м	280
12	Элеватор цепной ЦК-400	1 200
13	Силосные бункеры 500 м ³ , 2 шт	16 000
14	Фильтры картриджные 24 м ² на силосные бункеры 2 шт	260
15	Телескопические загрузчики на силосные бункеры, 2 шт	900

*) Дана ориентировочная стоимость единицы оборудования на начало 2020 года без учета НДС, доставки, курс евро 72 руб.

Таким образом, затраты на оборудование для участка сушки карьерного песка обойдется инвестору ориентировочно 40 млн. рублей без учета расходов на доставку и монтаж. В таблице также не учтена стоимость общестроительных работ, газовое хозяйство и электрообеспечение участка.

Общая мощность установленного электрооборудования составит 200 кВт.

Расход на 1 тонну высушенного песка:

- ✓ природный газ 10,2 м³/т (60 руб/т)
- ✓ электроэнергия 3,5 кВт.час/т (12 руб/т)

Пример расчета взят из книги:

[Нестеров А.В. Промышленная сушка, СПб: Лань, 2021, 304 с.](#)