

10.3. Расчет конвективной сушки карьерного песка в сушилке кипящего слоя

Исходные данные

В сушилках кипящего слоя (КС) возможна не только сушка, но и обеспыливание продукта. Преимущества и недостатки сушилок КС подробно описаны в книге автора [Нестеров А.В. Промышленная сушка, СПб: Лань, 2021, 304 с.](#)

Ниже представлен расчет сушилки КС для сушки и обеспыливания кварцевого песка карьера Толмачево Ленинградской области. Технологическая схема сушки представлена на рис. 1.

Влажный карьерный песок загружается в расходный бункер 1, откуда шнековым питателем или вибропитателем подается в сушилку кипящего слоя 2.

В сушильную камеру сушилки КС под распределительную решетку подаются дымовые газы, полученные при сгорании природного газа в газовой горелке 3. Дымовые газы разбавляются холодным воздухом в топке для создания необходимой температуры 550 – 650°C.

В сушилке КС установлена секционированная распределительная решетка беспровального типа, изготовленная из нержавеющей стали. В результате активного перемешивания влажного материала в токе горячих дымовых газов происходит быстрая сушка песка. Скорость газов в надрешеточном пространстве выбирается таким образом, чтобы обеспечить унос с газовой фазой частиц, мельче 0,160 мм.

Высушенный материал разгружается в бункер 9, откуда пневмокамерным насосом 10 направляется в силосный бункер 6. На силосе установлен картриджный фильтр 7.

Запыленные газы из сушилки КС направляются в группу циклонов 4, где мелкодисперсная пыль разгружается в приемный бункер циклонов и шлюзовым питателем пересыпается в бункер 9, а очищенные от пыли газы направляются в рукавный фильтр 5 или группу мультициклонов для дальнейшей очистки и вентилятором 8 сбрасываются в атмосферу. Самая мелкая фракция из бункера рукавного фильтра выгружается в бэги. Запыленность газов после рукавного фильтра менее 20 - 40 мг/м³, после мультициклонов 200 - 300 мг/м³.

Рекомендуется установить грохот перед подачей песка в сушилку КС для удаления посторонних включений (камни, ветки, посторонние предметы), а также смерзшихся комков песка в зимнее время.

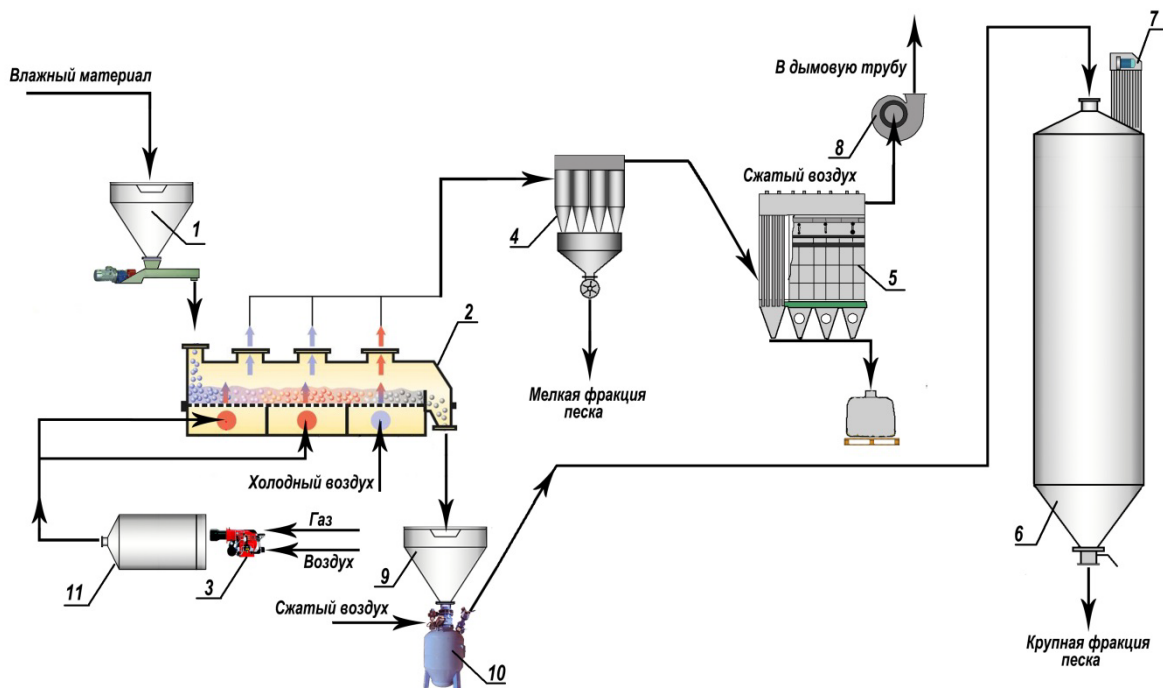


Рис. 1. Технологическая схема сушки карьерного песка в сушилке КС:

- 1 – бункер, 2 – сушилка КС, 3 – газовая горелка, 4 - циклон, 5 – рукавный фильтр,
- 6 – силосный бункер готовой продукции, 7 – картриджный фильтр, 8 – вентилятор
- 9 – бункер, 10 – пневмокамерный насос, 11 - топка

Поскольку кварцевый песок выдерживает высокие температуры, выбор температуры сушильного агента (теплоносителя) определяется жаростойкостью распределительной решетки сушилки КС. В частности, при использовании решетки из стали 08X18H10T, предельная температура эксплуатации которой 800°C, целесообразно принять температуру теплоносителя 650°C.

Исходные данные

В приемный бункер сушилки КС поступает карьерный песок* с влажностью 6%. Дисперсный состав песка приведен в таблице 10-15.

Сушке подвергается карьерный песок очень мелкий 1-го класса (ГОСТ 8736-2014). Производительность по высушенному материалу 20 тонн в час. Конечная влажность менее 0,1%.

Гранулометрический состав карьерного песка

Таблица 10-15

Фракция, мм	1-0,63	0,63-0,4	0,4-0,315	0,315-0,16	0,16-0,1	0,1-0,063	0,063-0,05	< 0,05
Содержание, %	0,25	4,52	9,83	76,2	6,53	2,28	0,36	0,03

- Модуль крупности 1,06
- Содержание глинистых примесей 0,48%
- Марка песка по ГОСТ 2138-91 2К₂О₃025
- Химический состав:

Компонент	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ +TiO ₂	CaO+MgO	Na ₂ O+K ₂ O	Сера	п.п.п.
Содержание, %	98-99,0	0,12-0,16	0,95-1,45	0,3-0,4	0,3-0,5	н/сод	0,2- 0,3

- Насыпной вес сухого материала 1440 кг/м³
- Истинная плотность сухого карьерного песка 2100 кг/м³
- Теплоноситель - природный газ, низшая теплота сгорания 33600 кДж/нм³.
- Запыленность отходящих газов – не более 20 - 40 мг/м³.

Расчет выполнить для средней температуры окружающей среды 10°C, относительная влажность 70% (влажносодержание $x_0 = 0.007$ кг/кг).

Расчет сушилки КС для производительности 20 тонн в час по высушенному материалу выполнялся в программе excel 2010 на основе электронных таблиц по методике изложенной в цитируемой выше книге.

Результаты расчета приведены в таблице 10-16.

Результаты расчета сушилки КС

Таблица 10-16

Наименование	Значение
Расход влажного материала с влажностью 6%, т/час	21,255
Количество испаренной влаги, т/час,	1,255
Расход высушенного материала с влажностью < 0,1%, т/час, в том числе:	20,00
крупная фракция песка >0,16 мм	18,16
мелкая фракция песка <0,16	1,83
пыль <0,05 мм	0,01

* Карьер Толмачево, Ленинградская обл., компания Лужский ГОК

Наименование	Значение
Коэффициент избытка воздуха	3,40
Температура разбавленных воздухом дымовых газов, начальная, °С	650
Температура отходящих газов после сушки, °С	120
Влагосодержание сушильного агента, кг/кг: перед сушильной камерой после сушильной камеры	0,046 0,242
Расход тепла, кВт	1426
Расход природного газа на горение, м ³ /час (20°С, 101,3 кПа)	153
Расход сушильного агента (дымовых газов), кг/с	2,27
Расход отработанных дымовых газов, м ³ /час (при 120 °С)	9223
Расход холодного воздуха (10°С) для охлаждения продукта, кг/с	2,87
Размеры распределительной решетки, мм зоны сушки зоны охлаждения	3x1000x1000 1x1000x1000
Размеры сушилки КС (без учета теплоизоляции): Ширина, м Длина, м Высота, м	1,2 5,0 3,2
Установленная мощность электрооборудования, кВт	96
Напряженность сушильной камеры по испаренной влаге, кг/(час.м ³)	209

Таким образом, сушка песка характеризуется следующими параметрами:

- удельный расход природного газа 7,6 м³/т
- удельный расход электроэнергии 4,6 кВт.час/т

Для расчета размеров сушилки КС рассчитаны скорости начала псевдооживления слоя $w_{по}$ и скорости уноса (осаждения) $w_{ос}$ для граничных размеров частиц песка 0,16 мм и 0,63 мм по формулам*:

$$Re_{ос} = \frac{Ar}{(18 + 0,61\sqrt{Ar})}, \quad (10.24)$$

$$Re_{по} = \frac{Ar}{(1400 + 5,22\sqrt{Ar})}, \quad (10.24a)$$

$$Re_{ос(по)} = \frac{w_{ос}d\rho}{\mu}, \quad Ar = \frac{gd^3}{\mu^2} \rho_T \rho,$$

Результаты расчета сведены в таблицу 10-17. Следует отметить, что скорость осаждения и скорость уноса равнозначны.

* В некоторых источниках в формуле (10.24) стоит коэффициент $0,575 \sqrt{Ar}$

Результаты расчета скорости осаждения

Таблица 10-17

Средний размер, мм	0,16	0,63	Средний размер, мм	0,16	0,63
Критерий Ar	142	8 678	Критерий Ar	328	11 428
Критерий Re _{ос}	5,72	121,26	Критерий Re _{ос}	11,53	143,81
Критерий Re _{по}	0,10	4,60	Критерий Re _{по}	0,22	5,84
Скорость осаждения, м/с	0,92	4,98	Скорость осаждения, м/с	1,04	4,86
Скорость п/ожж., м/с	0,15	0,20	Скорость п/ожж., м/с	0,09	0,16
Температура, °С	120		Температура, °С	10	80
Вязкость, ·10 ⁶ , Па·с	22,95		Вязкость, ·10 ⁶ , Па·с	17,81	21,17
Плотность д. газа, кг/м ³	0,887		Плотность д. газа, кг/м ³	1,232	0,994
Плотность частиц, кг/м ³	2100		Плотность частиц, кг/м ³	2100	
Скорость рабочас, м/с		0,85	Скорость рабочас, м/с		1,86
Re		20,80	Re		54,90
Порозность		0,556	Порозность		0,699
Высота слоя h ₀ , мм		300	Высота слоя h ₀ , мм		300
Высота слоя h, мм		405	Высота слоя h, мм		598

Для надрешеточного пространства сушилки

- для граничного размера 0,16 мм – скорость уноса 0,92 м/с,
- для граничного размера 0,63 мм – скорость уноса 4,98 м/с, скорость начала псевдооживления 0,20 м/с.

Следовательно, скорость газа над решеткой и в сепарационном пространстве сушильной камеры должна быть больше 0,92 м/с, а для псевдооживления слоя необходима скорость больше 0,20 м/с.

Примем скорость газа над решеткой 1,0 м/с. Для сушки материала по уравнению теплового баланса требуется 9223 м³/час (2,56 м³/с) дымовых газов при 120°С. Следовательно площадь сечения решетки составит 2,56/1,0=2,56 м². Возьмем с запасом площадь сечения решетки 3,0 м² – три секции 1000х1000 мм при ширине решетки 1000 мм. Тогда реальная фиктивная* скорость дымовых газов над решеткой составит 0,854 м/с.

С учетом секции для охлаждения продукта получаем четырех или пятисекционную решетку, длиной 4-5 м, шириной 1000 мм (4-5 секций 1х1 м). Скорость горячего сушильного агента в сушилке ($w = 0,85$ м/с) при желании, может быть увеличена за счет регулирования расхода горячих газов в топке. Изменяя расход и температуру дымовых газов в подрешеточном пространстве можно добиться требуемой сепарации мелких частиц в сушильной камере.

Пылевая фракция содержит в основном глинистые примеси и мелкодисперсный песок фракции < 0,160 мм. Самая мелкая фракция образуется в рукавном фильтре или в мультициклонах, ее количество незначительно – оценочно менее одной тонны в сутки.

Число псевдооживления $K_w = w/w_{по} = 0,85/0,20 = 4,25$. Напряженность сушильной камеры по испаренной влаге 209 кг/(м³·час). Столь высокая влагонапряженность сушильной камеры определяется активным гидродинамическим режимом сушки во взвешенном слое и высокой температурой сушильного агента.

Высоту кипящего слоя примем $h_0 = 300$ мм (в пересчете на неподвижный слой) с последующим уточнением. Во взвешенном состоянии высота слоя будет больше и определяется порозностью ε , которая может быть определена через критерий Лященко $Ly = w^3 \rho^2 / (\mu \rho_T g)$, по формуле:

$$\varepsilon = [(18Re + 0,36Re^2)/Ar]^{0,21}. \quad (10.246)$$

Высота слоя в псевдооживленном состоянии

$$h = \frac{h_0(1 - \varepsilon_0)}{1 - \varepsilon}. \quad (10.28)$$

* Фиктивная скорость – скорость газа, отнесенная к полному сечению решетки без учета сечения частиц взвешенного слоя.

При скорости $w = 0,85$ м/с для частиц $d = 0,63$ мм получаем $\varepsilon = 0,56$, $h = 406$ мм (табл. 10-17).

По данным [11], высоту сепарационного пространства принимаем в 4 раза больше высоты кипящего слоя ($406 \cdot 4 = 1624$ мм), общая высота сушильной камеры 2 м. Площадь сечения сепарационной зоны принимают на 20-30% больше площади решетки, тогда ширина сушильной камеры в верхней части составит 1200 мм.

Потери давления в сушилке КС определяются суммой гидравлических сопротивлений взвешенного слоя и газораспределительной решетки.

Примем живое сечение решетки 8%, щелевую распределительную решетку (гл.7.3, рис. 68 б, с. 93). Скорость газов в щели решетки при температуре 650°C составит $w = 20,7$ м/с, плотность газа $\rho = 0,376$ кг/м³, при коэффициенте сопротивления решетки $\zeta = 1,9$ сопротивление решетки составит:

$$\Delta p_{\text{реш}} = \zeta \cdot \frac{\rho w^2}{2} = 0,15 \text{ кПа} \quad (10.29)$$

Высота слоя в неподвижном состоянии 300 мм. Гидравлическое сопротивление слоя

$$\Delta p_{\text{сл}} = \rho_T g \cdot h_0 (1 - \varepsilon_0) = 3,71 \text{ кПа} \quad (10.30)$$

Общее сопротивление сушилки с учетом сопротивления газоходов (200 Па) составит 4,26 кПа.

В последнюю секцию сушилки подается холодный воздух. Расход воздуха подбираем таким образом, чтобы на газораспределительной решетке был режим устойчивого псевдоожижения. Принимаем* начальную температуру воздуха 10°C , конечную 80°C . Температура материала в слое начальная 120°C , конечную температуру примем 60°C . Расход воздуха G_B рассчитываем по уравнению теплового баланса:

$$G_B = \frac{G_M c_M (t_{\text{МН}} - t_{\text{МК}})}{c_B (t_{\text{БК}} - t_{\text{БН}})} = 3,69 \text{ кг/с}, \quad (10.31)$$

где G_M – расход обеспыленного материала, кг/с, $t_{\text{МН}}$, $t_{\text{МК}}$ начальная и конечная температура материала, соответственно, $^\circ\text{C}$, $t_{\text{БН}}$, $t_{\text{БК}}$ начальная и конечная температура воздуха, $^\circ\text{C}$.

Для охлаждения продукта необходимо 2 секции с решеткой 1000×1000 мм, поскольку если взять одну секцию, получится высокая скорость воздуха в щелях решетки и в слое.

Для сечения зоны охлаждения $2,0 \text{ м}^2$ получаем следующие значения. Скорость воздуха в щелях решетки при температуре 10°C составит 18,5 м/с, сопротивление решетки $\Delta p_{\text{реш}} = 0,41$ кПа. Расчетная скорость начала псевдоожижения для воздуха с температурой $60-80^\circ\text{C}$ составит 0,15-0,16 м/с (см. табл. 10-17), поэтому расход воздуха достаточен для создания взвешенного слоя в секциях для охлаждения материала. Фиктивная скорость воздуха над решеткой при температуре воздуха в псевдоожиженном слое $70-80^\circ\text{C}$ составит $3,69/1,00 = 1,84$ м/с, где 1,00 кг/м³ – плотность воздуха при 80°C . Коэффициент псевдоожижения $K_w = 1,84/0,16 = 16,8$, где 0,16 м/с – скорость начала псевдоожижения при 80°C . Скорость уноса частиц размером 0,63 мм составляет 4,86 м/с – меньше фиктивной скорости воздуха над взвешенным слоем.

Для подачи холодного воздуха в секцию охлаждения ставим дутьевой вентилятор. Он также необходим, поскольку гидравлическое сопротивление распределительной решетки секции охлаждения больше, чем для сушильных секций. Выбираем дутьевой вентилятор ВЦ 14-46-5 (№5), который имеет следующие характеристики:

- производительность 7500-10800 м³/час,

* Скорость теплообмена материала с воздухом очень высокая, поскольку частицы песка очень мелкие, время охлаждения, рассчитанное по методике, изложенной в [41], составляет менее 0,3 секунды, поэтому температура воздуха на выходе близка к температуре материала. Охлаждение материала происходит в режиме перекрестного тока – материал движется в сторону разгрузочного желоба, а холодный воздух снизу перпендикулярно потоку материала, поэтому усредненную конечную температура воздуха на выходе из зоны охлаждения принимаем немного меньше, чем $(60+120)/2 = 90^\circ\text{C}$.

- полное давление 1980-2380 Па
- частота вращения рабочего колеса 1500 об/мин
- мощность электродвигателя 11 кВт

Как видим, массовый расход воздуха на охлаждение материала сопоставим с расходом дымовых газов на сушку материала. Это существенно увеличивает размеры сушилки, нагрузку на аспирационное оборудование, и требует выбора вытяжного вентилятора большей мощности. Поэтому охлаждение материала нужно делать только тогда, когда это является производственной необходимостью.

Суммарный расход дымовых газов на сушку материала и воздуха на охлаждение продукта составит $2,27+3,69=5,96$ кг/с. Температура смеси газов после сушилки составит 95°C , плотность $0,957$ кг/м³, влагосодержание $0,098$ кг/кг, точка росы 60°C . Объемный расход смеси газов составит $5,96/0,957=6,228$ м³/с.

В схеме необходимо установить циклон. Поскольку потери давления в сушилке КС высокие, и в схеме имеется рукавный фильтр, выберем циклон СЦН-50-1600У, который имеет низкое гидравлическое сопротивление (коэффициент сопротивления $\zeta_{\text{ц}}=185$):

$$\Delta p_{\text{ц}} = \zeta_{\text{ц}} \cdot \frac{\rho w^2}{2} = 0,85 \text{ кПа} \quad (10.27)$$

Для уменьшения потерь давления в рукавном фильтре примем минимальную скорость фильтрации $w_{\text{ф}}=0,7$ м/мин. Объемный расход дымовых газов уменьшится, поскольку снизится его температура после циклонов до 80°C . Объемный расход газов составит $5,96 \cdot (273+80)/(273+95)=5,71$ м³/с или 343 м³/мин. Площадь фильтрации составит $343/1,6=214$ м². Рукавный фильтр ФРИ-240 будет иметь сопротивление 700 Па

Полное гидравлическое сопротивление цепи аппаратов составит $4,26+0,85+0,7=5,81$ кПа.

Расход смеси газов при $75-80^{\circ}\text{C}$ составит $5,71 \cdot 3600=20560$ м³/час.

Выбираем вытяжной вентилятор ВР-132-30-10, имеющий следующие характеристики:

- производительность $9000-26640$ м³/час
- полное давление $7200-5800$ Па
- частота вращения рабочего колеса $1500-2000$ об/мин
- мощность электродвигателя 75 кВт

Для регенерации фильтроткани рукавного фильтра необходим компрессор с осушителем воздуха, установленная мощность компрессора 10 кВт. Суммарная установленная мощность дутьевого, вытяжного вентилятора и компрессора составит 96 кВт.

На рис. 2 изображена рассчитанная сушилка КС. В первые три секции сушилки 1 из топки 2 подаются топочные газы, разбавленные воздухом до температуры 650°C . В последние две секции вентилятором 4 подается холодный воздух. Влажный материал загружается в бункер 5, откуда через весовой дозатор 6 поступает на распределительную решетку сушилки 1

Вытяжной вентилятор, циклон и рукавный фильтр на рисунке не показаны.

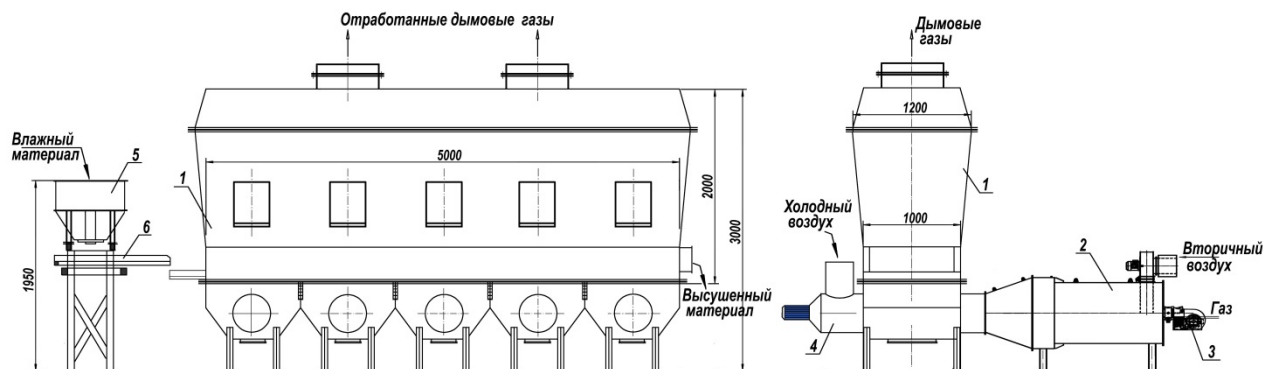


Рис. 2. Схема сушилки КС:

1 – сушилка, 2 – топка, 3 – горелка, 4 – дутьевой вентилятор, 5 – бункер, 6 – весовой дозатор

На рисунке 3 представлена схема топки. Топка предназначена для получения смеси дымовых газов с воздухом и подачи полученных газов в барабанную сушилку.

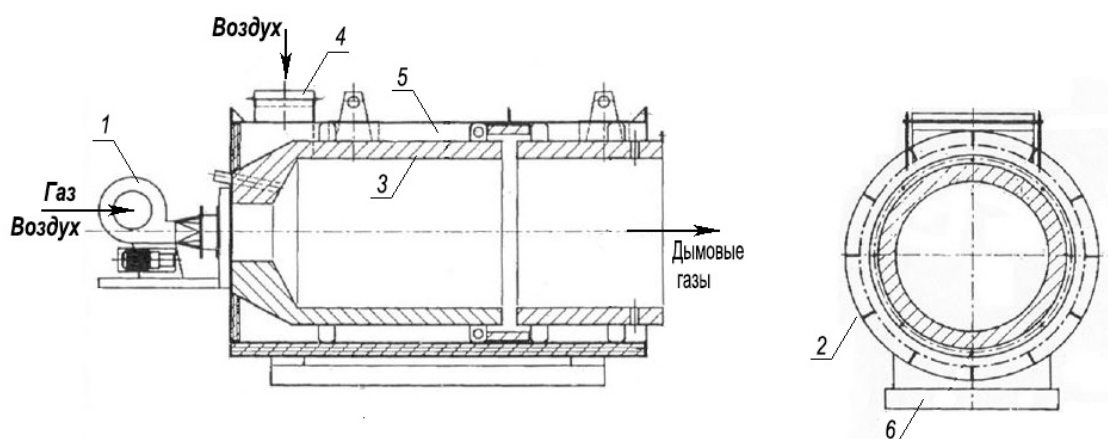


Рис. 3. Схема топки:

1- горелка; 2-корпус топки; 3 - огнеупорная футеровка ; 4 – патрубок для подачи воздуха; 5- воздушный канал, 06 - опора

Из горелки 1 продукты горения поступают в топочное пространство с температурой 1300 – 1500°C и в конце топочного пространства разбавляется воздухом до температуры, необходимой для сушки материала (550 - 650 °C). Внутреннее пространство топки футеровано огнеупорным материалом 3. Для охлаждения корпуса топки через патрубок 4 в кольцевое пространство 5 дутьевым вентилятором подается холодный воздух, который нагреваясь, поступает в топку для разбавления продуктов горения.

Изменяя расход воздуха можно регулировать температуру газов, поступающих в сушильную камеру.

Пример расчета взят из книги:

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