

*Методический материал разработан доц. Калишуком Д. Г. и доц. Саевичем Н. П.*

## Рекомендации к выбору и расчетам сушилок

Наиболее распространенными сушилками твердых материалов являются конвективные. Студенты, согласно заданию, должны рассчитать сушилку непрерывного действия, барабанную или однокамерную с кипящим слоем. Из задания известно: материал, который подвергается сушке, размер его кусков (частиц); производительность сушилки; начальная и конечная влажность материала; место установки сушилки (климатические условия в месте установки сушилки). Также могут быть заданы начальная и конечная температуры материала, сушильный агент и его температура, топливо. При расчетах можно пользоваться примерами, которые даны в [1–4], рекомендациями [5–10, 11–19].

Порядок расчета сушилки следующий:

- 1) выбрать тип сушилки, сушильный агент;
- 2) рассчитать материальный баланс по материалу;
- 3) сделать выбор (расчет) параметров сушильного агента на входе в сушилку;
- 4) рассчитать внутренний тепловой баланс сушилки, на основании его определить параметры сушильного агента на выходе из сушилки, его расход, а также определить расход тепла на сушку;
- 5) выполнить расчеты основных размеров сушилки;
- 6) рассчитать толщину тепловой изоляции (при необходимости).

Пояснения к расчету сушилок.

**К п. 1.** Барабанные сушилки применяют для сушки кусковых или зернистых материалов. Тип насадки в барабане зависит от размеров кусков (частиц) материала, склонности его к налипанию [5–12]. Для полного удаления влаги из термостойких материалов можно использовать противоточные сушилки. Прямоточные сушилки имеют более высокий КПД, но скорость сушки у них меньше.

Сушилки с кипящим слоем преимущественно применяют при сушке материалов содержащих в основном свободную влагу. Их используют при сушке нехрупких, неабразивных, не склонных к слипанию зернистых материалов. Размер частиц обычно не превышает 5 мм.

Для сушки термостойких материалов, не чувствительных к загрязнениям продуктами горения топлива, применяют дымовые газы. Температуру дымовых газов доводят до заданной (снижают), разбавляя их воздухом. Воздухом сушат материалы, загрязнение которых при сушке нежелательно. Начальную и конечную температуры сушильного агента (режим сушки) выбирают по рекомендациям [3, 12] соответственно материалу или самостоятельно, с учетом его температур плавления, разложения, окисления и др.

**К п. 2.** Производительность сушилки по удаленной влаги  $W$ , кг/с:

$$W = \frac{G_n (U_n - U_k)}{1 - U_k}, \quad (1)$$

где  $G_n$  – производительность сушилки по исходному влажному материалу, кг/с;

$U_n$  и  $U_k$  – начальная и конечная влажность материала соответственно (в расчете на общую массу), кг/кг.

Производительность сушилки по высушенному материалу  $G_k$ , кг/с:

$$G_k = G_n - W. \quad (2)$$

Производительность сушилки по абсолютно сухому материалу  $G_{сух}$ , кг/с:

$$G_{сух} = G_n (1 - U_n). \quad (3)$$

**К п. 3.** Начальную температуру сушильного агента (на входе в сушилку)  $t_1$ , °С, выбирают согласно с рекомендациями к п.1 данного раздела. Влагосодержание его  $x_1$ , кг/кг сухого газа, и энтальпия  $I_1$ , Дж/кг сухого газа, зависят от параметров окружающей среды. Параметры окружающей среды берут в соответствии с местом расположения сушилки и порой года (лето и зима), из пособий [1, 2] или из справочников по климату. Изменение параметров воздуха в результате нагрева в калорифере определяют по диаграмме состояния влажного воздуха (см. примеры 10.3, 10.16 [2], 9.10, 9.19 [1]) или аналитическим путем.

Параметры дымовых газов рассчитывают в зависимости от топлива, климатических условий, требуемой температуры. Методики расчета параметров дымовых газов с примерами можно найти в пособиях [3, 4, 13], состав топлива в пособиях [14–18] и др. Топливо подбирают с учетом возможности его транспортирования к месту потребления (трубопроводы, железная дорога, нефтяные терминалы) и экологической безопасности.

**К п. 4.** Согласно внутреннему тепловому балансу сушилки с кипящим слоем или барабанной, разность между удельным приходом и расходом тепла непосредственно в сушильной камере  $\Delta$ , Дж/кг влаги:

$$\Delta = c\theta_1 - (q_m + q_n), \quad (4)$$

где  $c$  – теплоемкость влаги при температуре  $\theta_1$ , Дж/(кг·°С);

$\theta_1$  – температура материала на входе в сушилку, °С;

$q_m$  – удельный подвод тепла в сушилку с материалом, Дж/кг влаги;

$q_n$  – удельные потери тепла в окружающую среду, Дж/кг влаги.

$$q_m = \frac{G_k c_m (\theta_2 - \theta_1)}{W}, \quad (5)$$

где  $c_m$  – теплоемкость материала, Дж/(кг·°С);

$\theta_2$  – температура материала на выходе из сушилки, °С.

Температуру  $\theta_2$  принимают:

– равной температуре мокрого термометра сушильного агента, с которым в контакте находится высушенный материал, в случае если из материала удаляется только свободная влага;

– на 20–50 °С ниже температуры сушильного агента, с которым в контакте находится высушенный материал, в случае если материал достигает конечной влажности, меньшей, чем гигроскопичная.

Температуру мокрого термометра сушильного агента на выходе из сушилки  $t_{2м}$ , °С, можно приблизительно принять равной температуре мокрого термометра сушильного агента на выходе для процесса теоретической сушки. Температуру сушильного агента на выходе из сушилки  $t_2$  обычно берут на 15–30 °С, больше чем температура точки росы  $t_{2р}$ . Величину  $t_{2р}$  можно приблизительно определить при анализе процесса теоретической сушки по диаграмме состояния влажного газа. При использовании сушильного агента с температурой  $t_1 > 200$  °С обычно принимают  $t_2 = 100...120$  °С. Параметры влажных дымовых газов с достаточной точностью можно определить по диаграмме состояния влажного воздуха.

Величину  $q_n$  можно принять равной 5–10% от удельного количества тепла на испарение влаги из материала:

$$q_n = (0,05...0,10)r, \quad (6)$$

где  $r$  – удельная теплота парообразования влаги, Дж/кг.

Действительные величины энтальпии  $I_2$ , Дж/кг сухого газа, влагосодержания  $x_2$ , кг/кг сухого газа, для сушильного агента определяют совместным решением уравнений материального и теплового баланса по сушильному агенту:

$$I_2 = I_1 + \Delta(x_2 - x_1). \quad (7)$$

Уравнение (7) решают методом последовательных приближений. Упрощенно задачу можно решать графически следующим образом. При использовании одного из методов задаются двумя произвольными значениями  $x_2 - x_2'$  и  $x_2''$ . Соответственно им рассчитывают два значения  $I_2 - I_2'$  и  $I_2''$ . Величины  $x_2'$  и  $x_2''$  рекомендуется брать близкими к величине  $x_2$  при  $t_2$  для варианта теоретической сушки. На диаграмму состояния влажного газа наносят точки с координатами  $x_2', I_2'$  и  $x_2'', I_2''$ . Затем соединяют эти точки отрезком прямой и по точке пересечения отрезка с изотермой  $t_2$  определяют действительные величины  $x_2$  и  $I_2$ .

Массовый расход абсолютно сухого сушильного агента  $L$ , кг/с:

$$L = \frac{W}{x_2 - x_1}. \quad (8)$$

Массовые расходы влажного сушильного агента, его объемные расходы определяют соответственно условиям (температура, влагосодержание, давление) [1, 2].

Расход тепла на сушку  $Q$ , Вт:

$$Q = L(I_1 - I_0), \quad (9)$$

где  $I_0$  – удельная энтальпия воздуха на входе в калорифер (топку) сушилки, Дж/кг сухого воздуха.

Для сушилок с сушильным агентом – дымовыми газами – по величине  $Q$  проводят расчет расхода топлива.

**К п. 5.** Расчет основных параметров барабана барабанной сушилки рекомендуется вести по [3] (см. с. 291–303), [4] (см. с. 8). Проще всего объем барабана  $V$ , м<sup>3</sup>, можно определить через его объемное напряжение по влаге  $A$ , кг/(м<sup>3</sup>·с):

$$V = \frac{W}{A}. \quad (10)$$

Величину  $A$  можно принять по рекомендациях [3, 4] соответственно материалу и режиму его сушки. Длину и диаметр барабана принимают с учетом сведений из [3, 19, 20].

Размеры сушильной камеры для сушилки с кипящим слоем можно рассчитать по методике [3] (см. с. 305–309).

**К п. 6.** Толщину тепловой изоляции можно рассчитать, пользуясь методикой [4, с. 12–14].

Расчеты сушилок выполняют для зимних и летних условий эксплуатации. По результатам расчетов, как определяющие, берут большие из полученных величин  $Q$  и  $L$ .

Для сушилки с кипящим слоем дополнительно рассчитывают гидравлическое сопротивление [3, с. 310].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи) / П. Г. Романков, В. Ф. Фролов, О. Н. Флисюк и др. – СПб.: Химия, 1993.
2. Павлов К. Ф., Романков П. Г., Носков А. А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. – Л.: Химия, 1987.
3. Основные процессы и аппараты химической технологии: Пособие по проектированию / Под ред. Ю. И. Дытнерского. – М.: Химия, 1991.
4. Карпенков А. Ф. Методические указания к курсовому проектированию по курсу «Процессы и аппараты химической технологии» (расчет сушильной установки барабанного типа). – М.: Химия, 1984.
5. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 1973.

6. Дытнерский Ю. И. Процессы и аппараты химической технологии: В 2-х кн. – М.: Химия, 1995.
7. Гельперин Н. И. Основные процессы и аппараты химической технологии: В 2-х кн. – М.: Химия, 1981.
8. Справочник химика / Под ред. Б. П. Никольского. Т.5. – М.: Химия, 1966.
9. Перри Дж. Справочник инженера-химика: В 2-х кн. – М.: Химия, 1969.
10. Плановский А. Н., Николаев П. И. Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии. – М.: Химия, 1987.
11. Сажин Б. С. Основы техноки сушки. – М.: Химия, 1984.
12. Лыков М. В. Сушка в химической промышленности. – М.: Химия, 1976.
13. Левченко П. В. Расчеты печей и сушилок силикатной промышленности. – М.: Высшая школа, 1968.
14. Копелиович В. М., Здоров А. И., Авраменко В. Р. Топливо цементной промышленности. – М.: Стройиздат, 1984.
15. Краткий справочник технолога цементного завода / Под ред. И. В. Кравченко. – М.: Стройиздат, 1974.
16. Теплотехнический справочник: В 2-х т. / Под ред. В. Н. Юренева и П. Д. Лебедева. Т.1. – М.: Энергия, 1975.
17. Справочник химика-энергетика: В 4-х т. / Под общ. ред. С. М. Гурвича. Т.3. Энергетическое топливо. – М.: Энергия, 1972.
18. Энергетическое топливо СССР. Справочник / Под ред. Г. А. Зикеева. – М.: Энергия, 1968, Агропромиздат, 1985.
19. Гинзбург А. С. Расчет и проектирование сушильных установок пищевой промышленности. – М.: Агропромиздат, 1985.
20. Сушильные аппараты и установки. Каталог. – М.: ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1988.