

С.К. Протасов, доц., канд. техн. наук;
А.А. Боровик, доц., канд. техн. наук,
А.И. Вилькоцкий, доц., канд. техн. наук
Protacov@belstu.by (БГТУ, г. Минск)

СУШКА СИЛИКАГЕЛЯ ГОРЯЧИМ ВОЗДУХОМ

Конвективная сушка представляет собой суммарный процесс тепло- и массообмена. Сушильный агент передает свою теплоту высушиваемому материалу за счет конвекции. Влажный материал нагревается и влага под воздействием теплоты перемещается из глубины материала к его поверхности. Затем влага испаряется с поверхности и сушильный агент и вместе с ним отводится из зоны сушки.

Скорость процесса сушки зависит от внутренней структуры материала, его теплофизических свойств, размеров, формы и состояния внешней поверхности. Кроме этого она зависит и от параметров сушильного агента – температуры, влагосодержания и скорости движения относительно материала.

В процессе сушки материалов выделяют следующие периоды сушки: период прогрева материала; период постоянной скорости сушки (первый период сушки); период падающей скорости сушки (второй период).

В период прогрева подводимая к материалу теплота затрачивается на его прогрев до температуры мокрого термометра и на частичное испарение влаги. Время прогрева по сравнению с другими периодами незначительно.

После прогрева наступает период постоянной скорости сушки. В этом периоде вся теплота, подводимая к материалу, затрачивается на испарение влаги. Температура материала остается постоянной и равной температуре мокрого термометра, а скорость сушки максимальна и зависит в основном от параметров сушильного агента (внешних условий).

Во втором периоде сушки скорость процесса испарения влаги уменьшается, потому что влагосодержание материала у поверхности испарения снижается. Замедляется испарение влаги с поверхности материала, его температура повышается и приближается к температуре сушильного агента [1].

Исследование процесса сушки можно проводить исходя из анализа движения влаги внутри материала (внутренняя задача). Однако механизм перемещения влаги внутри материала довольно сложный, поэтому его редко используют. Для решения технических проблем чаще всего используют параметры сушильного агента (внешняя задача).

В период постоянной скорости сушки перенос влаги к поверхности испарения внутри материала практически не влияет на процесс массопередачи. Основное сопротивление сосредоточено в газовой фазе. Коэффициент массопередачи заменяют в расчетах на коэффициент массоотдачи. При постоянной скорости сушки тепловой поток, поступающий к материалу от сушильного агента, затрачивается только на испарение влаги. Поэтому интенсивность процесса сушки определяется количеством подводимой теплоты, а скорость сушки максимальна и зависит от внешних условий.

На практике коэффициент массоотдачи определяют экспериментально для различных конструкций аппаратов и конкретных материалов при заданных параметра сушильного агента.

Опытные данные обрабатывают в виде зависимости критерия Нуссельта от критериев Рейнольдса и Прандтля [2].

Зернистые материалы разделяют на капиллярно-пористые, коллоидные и коллоидные капиллярно-пористые. В капиллярно-пористых влага связана капиллярными силами. В процессе сушки такие материалы становятся хрупкими, легко разрушаются, образуя мелкие частицы, которые уносятся сушильным агентом. В таких случаях применяют сушку зернистого материала с неподвижным слоем, через который проходит (фильтруется) сушильный агент. Гидродинамическая картина движения сушильного агента через слой зернистого материала довольно сложная. Каналы, образованные пустотами между частицами, изменяют по высоте слоя свое направление и площадь поперечного сечения. Скорость сушильного агента все время меняется. Турбулизация потока сушильного агента развивается при значительно меньших значениях критерия Рейнольдса, чем в прямых каналах. Так ламинарный режим существует при значениях критерия Рейнольдса меньше 50, а автомодельный турбулентный режим наступает при Рейнольдсе более 7000 [3].

Рассмотрим сушку влажного силикагеля нагретым воздухом, который продувается снизу вверх через неподвижный слой материала. Температура t_1 и относительная влажность φ_1 нагретого воздуха на входе в слой постоянные. Размер зерен силикагеля имеет малую величину, потому распределение влагосодержания внутри частиц будет близкая к равновесному за счет их большой удельной поверхности. Будем рассматривать удаление влаги при сушке в первом периоде, когда скорость сушки и все остальные параметры не меняются во времени. Давление паров воды над материалом будет равно давлению насыщенных паров чистой воды, а силикагель будет иметь температуру мокрого термометра t_m , которая соответствует данному состоянию нагретого воздуха. В этом случае количество испаренной влаги будет

пропорционально количеству подведенной воздухом теплоты к поверхности частиц.

Запишем уравнение массоотдачи

$$M = \beta_V \cdot V \cdot \Delta x_{cp}, \quad (1)$$

где M – массовый расход влаги, кг/с; β_V – объемный коэффициент массоотдачи, кг/(м³·с); V – объем слоя частиц, м³; $\Delta x_{cp} = \ln \frac{\Delta x_{in}}{\Delta x_{out}}$

$= x^* - x_k$; $\Delta x_{об} = x^* - x_n$; x^* , x_n , x_k – влагосодержание сушильного агента при полном насыщении, на входе и на выходе из слоя соответственно, кг/кг с. в.

Массовый расход влаги выразим из уравнения материального баланса

$$M = G (x_k - x_n), \quad (2)$$

где G – массовый расход сушильного агента, кг/с.

Приравняем правые части уравнений (1) и (2)

$$\beta_V \cdot V \cdot \Delta x_{cp} = G (x_k - x_n). \quad (3)$$

Выразим из уравнения (3) коэффициент массоотдачи

$$\beta_V = \frac{G}{V} \cdot \frac{x_k - x_n}{\Delta x_{cp}} \quad (4)$$

Заменим объем V на произведение $V = S \cdot H$, где S – площадь сечения сушилки, м²; H – высота слоя, м. Получим

$$\beta_V = \frac{G}{S \cdot H} \cdot \frac{x_k - x_n}{\Delta x_{cp}}, \quad (5)$$

где $\frac{G}{S} = u$ – массовая скорость сушильного агента, кг/(м²·с);

$\frac{x_k - x_n}{\Delta x_{cp}}$ – число единиц переноса.

Тогда зависимость для определения коэффициента массоотдачи приобретает вид

$$\beta_V = \frac{u}{H} \cdot N \quad (6)$$

Уравнение (6) позволяет экспериментально определить коэффициент массоотдачи в период постоянной скорости сушки с учетом гидродинамических режимов процесса.

Эксперименты по определению коэффициента массоотдачи проводили в конвективной сушилке, в которой слой неподвижного силикагеля продували снизу нагретым воздухом. При этом измеряли тер-

могигрометрами температуру и относительную влажность воздуха на входе и на выходе из слоя. Диаметр сушилки составлял 0,064 м. Для эксперимента использовали окрашенный силикагель с диаметром частиц от 2 до 3 мм. Высота слоя материала составляла 0,08 м. Температуру горячего воздуха на входе в слой поддерживали около 60°C, а влагосодержание – 0,006 кг/кг с. в. Изменяли величину массовой скорости в пределах от 0,2 до 0,7 кг/(м²·с).

В результате обработки опытных данных были получены критериальные уравнения

$$Nu_d = \dots \cdot \dots \quad \text{при } 20 < Re < 50$$

и

$$Nu_d = \dots \cdot \dots \quad \text{при } 50 < Re < 80,$$

где $Nu_d = \frac{\beta_V \cdot d_{\text{ч}}}{D \cdot \rho}$ – диффузионный критерий Нуссельта; β_V – объем-

ный коэффициент теплоотдачи, кг/(м³·с); $d_{\text{ч}}$ – диаметр частиц, м; D – коэффициент диффузии, м²/с; a – удельная поверхность частиц, м²/м³;

ρ – плотность воздуха, кг/м³; $Re = \frac{a \cdot \mu}{\dots}$ – критерий Рейнольдса; μ –

динамический коэффициент вязкости воздуха, Па·с; $Pr = \frac{\dots}{\rho \cdot \dots}$ – диф-

фузионный критерий Прандтля.

ЛИТЕРАТУРА

1 Лыков М.В. Сушка в химической промышленности. М.: Химия, 1970 – 432 с.

2 Плановский А.Н., Муштаев В.И., Ульянов В.М. Сушка дисперсных материалов в химической промышленности. – М.: Химия, 1979. – 288 с.

3 Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии: Учебник для вузов. Изд. 2-е. В 2-х кн. Часть 1. Теоретические основы процессов химической технологии. Гидромеханические и тепловые процессы и аппараты. – М.: Химия, 1995. – 400 с.