

Исследование процесса сушки асбестовых руд во взвешенном состоянии

М.О. Долматова, Л.В. Соловьева-Гоголева

*Уральский федеральный университет имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина*

Аннотация: В статье приведены результаты исследований процесса сушки асбестовых руд во взвешенном состоянии. Получены уравнения, отражающие влияние начального влагосодержания руды на критерий Нуссельта. Полученные зависимости могут быть использованы при расчете сушилок со взвешенным слоем для асбестовых руд.

Ключевые слова: сушка, труба-сушилка, асбестовая руда, взвешенный слой, влагосодержание, скорость материала, коэффициент массообмена, критерий Рейнольдса, критерий Нуссельта, критериальные уравнения.

Исследование механизма и кинетики сушки асбестовых руд показало, что основная масса влаги в руде является слабосвязанной, свободной [1, 2]. Поэтому одним из наиболее рациональных способов интенсификации процесса сушки мелких классов асбестовых руд является применение взвешенного слоя [3, 4].

Несмотря на значительное количество экспериментальных и теоретических работ по определению коэффициентов теплообмена, до сих пор нет оснований для предпочтительного выбора той или иной расчетной формулы [5]. Значения коэффициентов, определенных по формулам различных исследователей, различаются в несколько раз. Объясняется это тем, что эксперименты проводились в различных пределах чисел Рейнольдса Re . Кроме того, при сушке во взвешенном состоянии значение Re является величиной условной, т. к. не известна действительная относительная скорость движения частиц и газа [6]. Поэтому известные критериальные уравнения обычно справедливы для тех объектов и условий, при которых проводились опыты.

В настоящей работе приведены результаты определений коэффициентов массообмена в трубах-сушилках. Опыты проводились в трубах-сушилках диаметром 69 мм и 80 мм, длиной 6 м и 15 м

соответственно [7, 8]. В качестве сушильного агента использовался воздух, нагретый в электрокалорифере, и топочные газы, полученные при сжигании керосина. Руда подавалась в трубу быстроходными шнеками с регулируемым числом оборотов. Для улавливания руды из потока газа применялись циклоны. Сушильный агент протягивался через трубу-сушилку вакуум-насосом или быстроходным вентилятором БК-6. Опыты проводились с асбестовой рудой класса – 6 мм с естественной влажностью и увлажненной.

Замерялись начальные и конечные температуры теплоносителя, скорость теплоносителя, начальное и конечное влагосодержание асбестовой руды, влагосодержание, скорость и концентрация материала по длине трубы, производительность сушиллки по загружаемому продукту.

Стесненность движения частиц обычно не учитывается и скорость материала v_m принимается равной разности скорости газа v_r и скорости витания v_b . Известно, что на движение частиц в трубах-сушилках оказывает влияние столкновение их друг с другом и со стенками аппарата, вращение частиц, измельчение агрегатов [9]. Скорость движения частиц по длине трубы-сушиллки может изменяться от нуля до скоростей, близких к скорости газов. При этом относительная скорость движения газа и частиц, определяющая значение коэффициентов тепло- и массообмена, уменьшается по длине потока от максимальных значений в месте загрузки материала. Изменяется по длине потока зависящая от скорости материала истинная концентрация его и, следовательно, поверхность контакта фаз. Поэтому скорость материала определялась опытным путем методом отсечек [10].

Температура изменялась от 100 до 600 °С, скорость газа от 12 до 48 м/с.

Коэффициент массоотдачи β определялся из выражения, характеризующего скорость внешней диффузии влаги:

$$G \frac{\omega_n - \omega_k}{1 - \omega_n} = \beta F (\pi - p),$$

где G – количество материала, находящегося в трубе-сушилке или в объеме трубы между дисками в условиях эксперимента, кг; ω_n, ω_k – начальное и конечное влагосодержание материала, кг испаренной влаги/кг сухого продукта; π – упругость насыщенного пара над материалом, Па; p – парциальное давление пара в окружающем воздухе, Па; β – коэффициент массоотдачи (массообмена), кг/(с·м²·Па); F – поверхность материала, находящегося в трубе-сушилке или в объеме трубы между дисками в условиях эксперимента, м², $F = \frac{6G}{\rho_m \cdot d}$; ρ_m – плотность материала, кг/м³;

d – средний диаметр частиц материала, м.

Для получения размерности коэффициентов массообмена (м/с) полученное значение β умножалось на отношение p_b / ρ_p , где ρ_p – плотность диффундирующих паров воды в условиях опыта, кг/м³; p_b – барометрическое давление, Па.

Находились зависимости вида

$$\beta = f(v),$$

$$Nu_d = f(Re),$$

где Nu_d – диффузионный критерий Нуссельта, $Nu_d = \frac{\beta d}{D}$; Re – критерий

Рейнольдса, $Re = \frac{v d \rho_g}{\mu_g}$; D – коэффициент диффузии, м/с; v – относительная

скорость движения газа и частиц материала, м/с; ρ_g – плотность газа в условиях эксперимента, кг/м³; μ_g – вязкость газа в условиях эксперимента, кг·с/м².

Критериальные уравнения теплообмена обычно характеризуются зависимостями вида $Nu_d = f(Re)$, т. е. стесненность движения частиц не учитывается, и относительная скорость движения газа и частиц материала принимается равной скорости витания.

В данной работе

$$v = v_r - v_m,$$

где v_m – скорость материала, м/с

Скорость материала определялась экспериментально.

Установлено следующее. Зависимость коэффициента массоотдачи от относительной скорости для асбестовых руд с естественной влажностью 4–6 % при скорости газов 12–20 м/с лучше всего аппроксимируется выражением $\beta = 0,08v^{0,72}$. При высоких скоростях газов (30–48 м/с) $\beta = 0,125v^{0,5}$.

Здесь влияние скорости сказывается в меньшей степени, т. к. при высокой степени турбулизации потока ламинарный слой имеет небольшую толщину и уменьшение его при дальнейшем увеличении скоростей незначительно.

Обобщенная критериальная зависимость Nu_d от Re в области $Re = 2 \cdot 10^2 \dots 1,2 \cdot 10^3$ имеет вид $Nu_d = 0,16Re^{0,7}$.

Как показали опыты, на процесс сушки существенное влияние оказывает начальное влагосодержание руды. С повышением влагосодержания коэффициенты массоотдачи возрастают, т. к. увеличивается эффективная поверхность контакта между газом и материалом за счет увлажнения волокон асбеста на поверхности частиц. Это значительное увеличение поверхности в расчетах не учитывалось. Обработка опытных данных методом множественной корреляции позволила получить зависимости, отражающие влияние начального влагосодержания на критерий Нуссельта: $Nu_d = 0,33 - 4 \cdot 10^{-3}Re + 511,35\omega_n$.

Полученные зависимости могут быть использованы при расчете сушилок со взвешенным слоем для асбестовых руд [11].

Литература

1. Соколов А.А., Лисовая Г.К., Ивакина М.А., Заостровский Ф.П. Исследование процесса сушки асбестовых руд // Известия вузов. Горный журнал. 1976. № 6. С. 147-149.

2. Долматова Ю.А., Ермаков А.А., Долматова М.О. Исследование аэродинамики полидисперсной газозвеси конверсионного карбоната кальция в трубе-сушилке // Инженерный вестник Дона, 2012, № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/835/.

3. Сажин В. Б. Практические результаты создания научных основ техники сушки дисперсных материалов при эффективных гидродинамических режимах взвешенного слоя // Успехи в химии и химической технологии. Выпуск XIII: Тезисы докладов. Часть 1/ РХТУ им. Д.И. Менделеева. М., 1999. С. 44-45.

4. Vanecek V., Drobohlav R., Markvart M. Fluidized Bed Drying // L. Hill, London. 1965.

5. Sazhin B.S., Sazhin V.B. Scientific Principles of Drying Technology // Begell House, Inc., New York, Connecticut (USA) Wallingfort (U.K.), 2007. 500 p.

6. Лисовая Г.К., Шабалин К.Н. Исследование сушки минеральных солей в пневматической трубе-сушилке // Химическая промышленность. 1969. №11. С. 64–66.

7. Долматова Ю.А., Ермаков А.А., Долматова М.О. Исследование процесса сушки конверсионного карбоната кальция в трубе-сушилке // Инженерный вестник Дона, 2013, № 1 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1523/.

8. Alexander S.W. Berechnung der Trocknung feuchter Produkte im Stromtrockner // Chem.-Ing. Techn, 1973, vol.45, no.16, pp. 1032–1039.

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



10. Долматова М.О., Долматова Ю.А., Соловьева-Гоголева Л.В. Исследование тепло- и массообмена в процессе сушки конверсионного карбоната кальция в трубе-сушилке // Инженерный вестник Дона, 2016, № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3827/.

11. Сажин В.Б., Сажин Б.С. Научные основы стратегии выбора эффективного сушильного оборудования // М. : Химия, 2013. С. 236-242.

References

1. Sokolov A.A., Lisovaja G.K., Ivakina M.A., Zaostrovskij F.P. Izvestija vuzov. Gornyj zhurnal. 1976. № 6. pp. 147-149.

2. Dolmatova Yu.A., Ermakov A.A., Dolmatova M.O. Inzhenernyj vestnik Dona, 2012, №2. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2012/835/.

3. Sazhin V. B. Uspehi v himii i himicheskoy tehnologii. Vypusk XIII: Tezisy dokladov. Chast' 1. RHTU im. D.I. Mendeleeva. M., 1999. pp. 44-45.

4. Vanecek V., Drobohlav R., Markvart M. Fluidized Bed Drying. L. Hill, London. 1965.

5. Sazhin B.S., Sazhin V.B. Scientific Principles of Drying Tecnology. Begell House, Inc., New York, Connecticut (USA) Wallingfort (U.K.), 2007. 500 p.

6. Lisovaya G.K., Shabalin K.N. Khimicheskaya promyshlennost'. 1969. №11. pp. 64–66.

7. Dolmatova Yu.A., Ermakov A.A., Dolmatova M.O. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1523/.

8. Alexander S.W. Chem.-Ing. Techn., 1973, vol.45, no.16, pp. 1032–1039.

9. Planovskij A.N., Mushtaev V.I., Ul'janov V.M. Sushka dispersnyh materialov v himicheskoy promyshlennosti [Drying of dispersed materials in the chemical industry]. M.: Himija, 1979. 288 p.

10. Dolmatova M.O., Dolmatova Yu.A., Solovjeva-Gogoleva L.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2016, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3827/.



11. Sazhin V.B., Sazhin B.S. Nauchnye osnovy strategii vybora jeffektivnogo sushil'nogo oborudovaniya [Scientific basis of selection strategies effective drying equipment]. М. : Himija, 2013. pp. 236-242.