

Я. С. Мухтаров, Р. Ш. Суфиянов, В. А. Лашков

РАСЧЕТ ПРЕДЕЛЬНОЙ ТОЛЩИНЫ СЛОЯ МАТЕРИАЛА, ВЫСУШИВАЕМОГО В ЦЕНТРОБЕЖНОЙ СУШИЛКЕ

Ключевые слова: предельная толщина слоя осадка, производительность центробежной сушилки.

Рассчитано предельное значение толщины слоя, увеличение которого практически не приводит к росту производительности, но приводит к увеличению объема разрабатываемого аппарата.

Keywords: maximum thickness of the sediment layer, the performance of the centrifugal drier.

Calculated limit film thickness, the increase of which does not result in substantially improved productivity, but results in an increase in the developed device.

Центробежные распылительные сушилки являются наиболее широко используемыми при сушке порошкообразных продуктов, частиц или полнотелых блоков из растворов, эмульсий, пасты и других влажных материалов. Данные типы сушилок могут применяться и для отделения растворителей после их использования при выделении целевых продуктов из сырья (материалов). Растворители, в частности, применяются для извлечения углеводов из нефтесодержащих грунтов [1-3]. Знание кинетики технологических процессов позволяет повысить их эффективность и определить оптимальные условия при осуществлении массообменных процессов [4, 5].

Для расчета средней интегральной скорости сушки в центробежной сушилке с радиусами ротора R от высоты слоя может использовать следующее выражение

$$N_{cp} = -\frac{\alpha f(t - t_m)}{(R_{2c} - R_{1c})r} \int_{R_{1c}}^{R_{2c}} \exp \frac{\alpha f(R^2 - R_{2c}^2)}{2WR_{2c}\rho_r c_r} \rho_m \times (1 - \varepsilon) dR, \quad (1)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/м²град; f – удельная теплопередающая поверхность, м²/кг; R , R_{1c} , R_{2c} – радиусы, соответственно, ротора, начала и конца слоя, м; Δt_{cp} – температурный напор, град; $\Delta t_{cp} = t - t_m$; W – скорость теплоносителя, являющаяся переменной по слою, м/с; t – температура теплоносителя, град; t_m – температура материала, равная для I-го периода сушки температуре мокрого термометра, град; c_r – теплоемкость газа (воздуха), Дж/кг град; ρ_m , ε – плотность и порозность дисперсного материала, кг/м³; r – удельная теплота парообразования, Дж/кг.

Для тонкого слоя продукта, когда изменением скорости теплоносителя по радиусу ротора можно пренебречь, можно записать следующее уравнение

$$\frac{dt}{(t - t_m)} = \frac{\alpha f}{W\rho_r c_r} \rho_m (1 - \varepsilon) dR, \quad (2)$$

с помощью которого получим уравнение

$$N = \frac{\alpha f}{r} (t - t_m) \exp \frac{\alpha f(R - R_{2c})}{W\rho_r c_r} \rho_m (1 - \varepsilon). \quad (3)$$

Тогда уравнение (1) преобразуем в следующий вид

$$N_{cp} = -\frac{\alpha f(t - t_m)}{(R_{2c} - R_{1c})r} \int_{R_{1c}}^{R_{2c}} \exp \frac{\alpha f(R - R_{2c})}{W\rho_r c_r} \rho_m (1 - \varepsilon) dR$$

Интегрируя, получим:

$$N_{cp} = -\frac{W\rho_r c_r(t - t_m)}{r(R_{2c} - R_{1c})\rho_m(1 - \varepsilon)} \times \left[1 - \exp \frac{\alpha f(R_{1c} - R_{2c})}{W\rho_r c_r} \rho_m(1 - \varepsilon) \right]. \quad (4)$$

Подставив $N_{cp} = -dU/d\tau$, последнее уравнение распишем в виде:

$$dU = \frac{W\rho_r c_r(t - t_m)}{r(R_{2c} - R_{1c})\rho_m(1 - \varepsilon)} \times \left[1 - \exp \frac{\alpha f(R_{1c} - R_{2c})}{W\rho_r c_r} \rho_m(1 - \varepsilon) \right] d\tau. \quad (5)$$

Интегрируя левую часть уравнения от U_0 до U_k , а правую от 0 до τ , получим:

$$U_0 - U_k = \frac{W\rho_r c_r(t - t_m)}{r(R_{2c} - R_{1c})\rho_m(1 - \varepsilon)} \times \left[1 - \exp \frac{\alpha f(R_{1c} - R_{2c})}{W\rho_r c_r} \rho_m(1 - \varepsilon) \right] \tau. \quad (6)$$

Откуда запишем выражение для определения продолжительности процесса сушки материала с начальной влажностью U_0 до конечной влажности U_k

$$\tau = \frac{(U_0 - U_k)r(R_{2c} - R_{1c})\rho_m(1 - \varepsilon)}{W\rho_r c_r(t - t_m)} \times$$

$$\times \left[\frac{1}{1 - \exp \frac{\alpha f(R_{1c} - R_{2c})}{W \rho_r c_r} \rho_m (1 - \varepsilon)} \right]. \quad (7)$$

Определим производительность аппарата в зависимости от высоты слоя:

$$G_{сек} = \frac{\pi l (R_{2c} - R_{1c}) W \rho_r c_r (t_0 - t_m)}{(U_0 - U_k) r} \times \left[1 - \exp \frac{\alpha f(R_{1c} - R_{2c})}{W \rho_r c_r} \rho_m (1 - \varepsilon) \right]. \quad (8)$$

Для достаточно толстого слоя осадка, когда пренебречь изменением скорости теплоносителя по высоте слоя нельзя, выведенные выше зависимости запишутся в следующем виде:

$$\tau = \frac{(U_0 - U_k) r (R_{2c} - R_{1c})}{\alpha f(t_0 - t_m)} \times \frac{1}{\int_{R_{1c}}^{R_{2c}} \exp \frac{\alpha f(R^2 - R_{2c}^2)}{2 W_0 R_{2c} \rho_r c_r} \rho_m (1 - \varepsilon) dR}. \quad (9)$$

Для определения секундной производительности аппарата используем следующую формулу

$$G_{сек} = \frac{\pi l (R_{2c} - R_{1c}) r \rho_m (1 - \varepsilon) \alpha f(t_0 - t_m)}{(U_0 - U_k) r} \times \int_{R_{1c}}^{R_{2c}} \exp \frac{\alpha f(R^2 - R_{2c}^2)}{2 W_0 R_{2c} \rho_r c_r} \rho_m (1 - \varepsilon) dR. \quad (10)$$

В уравнениях (9, 10) наиболее сложным является определение порозности слоя (ε), которая является функцией радиуса по слою. В случае, когда масса материала в роторе известна, среднее по слою значение порозности можно определить на основе выражений:

$$\frac{\Delta P}{H} = g(\rho_m - \rho_r)(1 - \varepsilon), \quad (11)$$

где $\Delta P = M \omega_c^2 / 2 \pi l$.

Среднюю порозность слоя можно рассчитать также по следующему уравнению

$$\varepsilon = \left(\frac{18 Re + 0,36 Re^2}{Ar_{ц}} \right)^{0,21}, \quad (12)$$

где $Ar_{ц} = \frac{\omega_c^2 R_{ср.с} d_c^3}{v^2} \left(\frac{\rho_m - \rho_r}{\rho_r} \right)$ – центробежная модификация критерия Архимеда.

Установление оптимальной высоты слоя ($R_{2c} - R_{1c}$) от производительности аппарата затруднительно ввиду монотонного возрастания последней. Однако очевидно, что существует некоторый предел производительности $G_{пред}$, который при высоте слоя $H = (R_{2c} - R_{1c})$ равен

$$G_{пред} = \lim_{H \rightarrow \infty} G = \frac{\pi l (R_{2c} - R_{1c}) W \rho_r c_r (t_0 - t_m)}{(U_0 - U_k) r}. \quad (13)$$

Пусть толщина слоя соответствует значению производительности, отличающейся от предельной не более чем на 1% (возможна подстановка любых значений отклонения):

$$1 - \exp \frac{\alpha f(R_{2c} - R_{1c})}{W \rho_r c_r} \rho_m (1 - \varepsilon) = 0,99. \quad (14)$$

Отсюда

$$\exp \frac{\alpha f(R_{2c} - R_{1c})}{W \rho_r c_r} \rho_m (1 - \varepsilon) = 0,01, \quad (15)$$

$$\exp \frac{\alpha f(R_{2c} - R_{1c})}{W \rho_r c_r} \rho_m (1 - \varepsilon) = \ln 0,01 \approx -4,6. \quad (16)$$

Отсюда предельную толщину слоя можно определить по следующей формуле

$$H_{пред} = (R_{1c} - R_{2c})_{пред} \approx \frac{4,6 W \rho_r c_r}{\alpha f \rho_m (1 - \varepsilon)}. \quad (17)$$

Таким образом, можно рассчитать предельное значение толщины слоя, увеличение которого практически не приводит к росту производительности, но сопровождается увеличением объема аппарата.

Литература

1. Р.Ш. Суфиянов, *Изв. Моск. гос. техн. ун-та (ММИ)*, 4, 2, 201-205 (2012).
2. Пат. РФ 100.000 (2010).
3. Я.С. Мухтаров, Р.Ш. Суфиянов, В.А. Лашков, *Вестн. Казан. технол. ун-та*, 11, 197-198 (2012).
4. Я.С. Мухтаров, Р.Ш. Суфиянов, В.А. Лашков, *Вестн. Казан. технол. ун-та*, 17, 3, 230-232 (2014).
5. Я.С. Мухтаров, Р.Ш. Суфиянов, В.А. Лашков, Н.Х. Зиннатуллин, *Вестн. Казан. технол. ун-та*, 17, 10, 169-170 (2014).

© Я. С. Мухтаров – д.т.н., проф. каф. машиноведения КНИТУ; Р. Ш. Суфиянов – д.т.н., доц. Московского государственного машиностроительного университета (ММИ), В. А. Лашков – д.т.н., зав. каф. машиноведения КНИТУ, lashkov_dm@kstu.ru.

© J. S. Mukhtarov – d.t.s., professor of the department of mechanical engineering of Kazan National Research Technological University (KNRTU), R. S. Sufyanov – d.t.s., associate professor of Moscow State University of Engineering (MAMI), V. A. Lashkov – d.t.s., head of the department of mechanical engineering KNRTU, lashkov_dm@kstu.ru.