

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

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СКОРОСТИ СУШКИ ОТ ВЫСОТЫ СЛОЯ МАТЕРИАЛА В РОТОРЕ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ СУШИЛКИ

Ключевые слова: центробежная сушилка, высота слоя материала, скорость сушки.

Проведен анализ работы центробежной сушилки с определением средней интегральной скорости сушки.

Keywords: centrifugal dryer, the height of the material layer, the drying rate.

The analysis of centrifugal dryers with the definition of the integral average drying rate.

Для сушки суспензий и высоковлажных дисперсных материалов в химической и смежных с ней отраслях промышленности широко применяются аппараты с псевдооживленным слоем материала, обладающие рядом достоинств, основными из которых являются [1]:

- развитая поверхность контакта газовой и твердой фазы;
- возможность регулирования времени пребывания материала в слое путем изменения его высоты;
- высокая экономичность и производительность аппаратов, что обусловлено высокой интенсивностью процесса вследствие развитой поверхности фаз;
- возможность организации непрерывного процесса, способствующего автоматизации и механизации аппаратов.

В настоящее время известно большое количество конструкций сушилок с кипящим слоем. Для сушки суспензий и высоковлажных дисперсных материалов возможно применение сушилок с механическим побудителем псевдооживления и вихревых сушилок. Значительный интерес представляет организация процесса сушки высоковлажных материалов в центробежном поле, что объясняется рядом преимуществ центробежных аппаратов перед установками, в которых указанный процесс протекает в гравитационном поле [2]:

- возможность существенного увеличения рабочих скоростей газовой фазы и повышения интенсивности межфазных процессов в слое;
- возможность организации структуры слоя различных вариантов центробежно-зажатого слоя, частично псевдооживления, кипящего осциллирующего; развитого псевдооживленного слоя;
- возможность организации противотока твердой и газовой фаз;
- уменьшение габаритов установки при заданной производительности по твердой фазе.

Наибольший интерес для практиков представляет организация процесса в центробежном кипящем слое (ЦКС), при этом в силу возможности высокоскоростного обдува материала, сушка в ЦКС может быть экономически более целесообразна.

Рассмотрим центробежный кипящий слой и конвективную сушку в аппарате непрерывного действия (рис. 1).

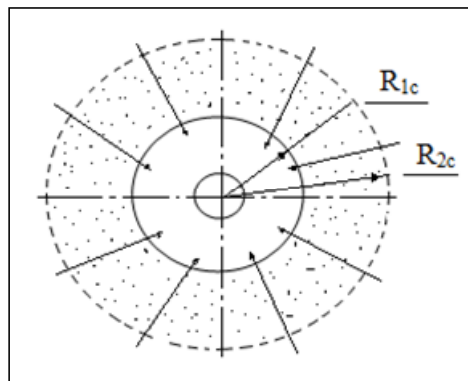


Рис. 1 - Схема кипящего слоя

Примем, что: 1) процесс сушки происходит с интенсивным перемешиванием твердой фазы; 2) влагосодержание материала по слою постоянно; 3) градиентами температуры и влагосодержания в частях материала можно пренебречь.

Выделим в слое продукта элементарное кольцо толщиной dR , расположенное на радиусе R от оси аппарата и имеющее массу dm

$$dm = \rho_m(1 - \varepsilon)dv, \quad (1)$$

где $dv = 2\pi R l dr$, $dm = 2\pi R l \rho_m(1 - \varepsilon)dR$; l - ширина слоя, м; ρ_m - плотность материала, кг/м³; ε - порозность; v - объем, м³.

Примем, что все количество тепла, отданного газом, затрачивается на испарение жидкой фазы и запишем следующее уравнение теплового баланса:

$$-L_r c_r dtd\tau = -rdmdU, \quad (2)$$

где L_r - расход теплоносителя, кг/с; c_r - теплоемкость теплоносителя, Дж/(кг·град); r - удельная теплота парообразования, Дж/кг; U - влагосодержание, кг/кг.

Подставляя выражение для dm в уравнение получим:

$$L_r c_r dtd\tau = dm = -2\pi R l \rho_m(1 - \varepsilon)dR dU, \quad (3)$$

$$L_r c_r dtd\tau = dm = -2\pi R l \rho_m(1 - \varepsilon)dR dU/d\tau, \quad (4)$$

Подставим в уравнение (4) известное уравнение скорости сушки для первого периода:

$$-\frac{dU}{d\tau} = N = \frac{\alpha f}{r} \Delta t_{cp}, \quad (5)$$

получим:

$$L_r c_r dtd\tau = dm = \frac{\alpha f}{r} (t - t_m) \rho_m (1 - \varepsilon) 2\pi R l dR, \quad (6)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·град); f – удельная теплопередающая поверхность, м²/кг; Δt_{cp} – температурный напор, град; $\Delta t_{cp} = t - t_m$; t – температура теплоносителя, град; t_m – температура материала, равная для I-го периода сушки температуре мокрого термометра, град.

Разделим переменные и получим:

$$\frac{dt}{(t - t_m)} = \frac{2\pi R l \alpha f}{L_r c_r} \rho_m (1 - \varepsilon) dR \quad (7)$$

В свою очередь:

$$L_r = W \rho_r S \quad (8)$$

где W – скорость теплоносителя, являющаяся переменной по слою, м/с; S – площадь сечения выделенного элемента, м².

Скорость теплоносителя W в сечении S вычислим по следующей формуле:

$$\frac{W}{W_0} = \frac{R_{2c}}{R}; \quad W = W_0 \frac{R_{2c}}{R}, \quad (9)$$

где W_0 – скорость газа на входе в ротор (на радиусе R_{2c}).

Тогда:

$$\frac{dt}{(t - t_m)} = \frac{\alpha f R}{2W_0 R_{2c} \rho_r c_r} \rho_m (1 - \varepsilon) dR, \quad (10)$$

$$\ln(t - t_m) + C = \int_{R_2}^R \frac{\alpha f R}{W_0 R_{2c} \rho_r c_r} \rho_m (1 - \varepsilon) dR, \quad (11)$$

$$\ln(t - t_m) + C = \frac{\alpha f (R^2 - R_{2c}^2)}{2W_0 R_{2c} \rho_r c_r} \rho_m (1 - \varepsilon) dR. \quad (12)$$

Константу интегрирования C определим из

условия до входа газа в слой ($R = R_{2c}$)

$$C = -\ln(t_0 - t_m)$$

Подставим полученное выражение в последнее уравнение, получим:

$$\ln \left(\frac{t - t_m}{t_0 - t_m} \right) = \frac{\alpha f (R^2 - R_{2c}^2)}{2W_0 R_{2c} \rho_r c_r} \rho_m (1 - \varepsilon) dR, \quad (13)$$

$$(t - t_m) = (t_0 - t_m) \exp \frac{\alpha f (R^2 - R_{2c}^2)}{2W_0 R_{2c} \rho_r c_r} \rho_m (1 - \varepsilon) dR. \quad (14)$$

Полученное выражение показывает закон изменения температуры теплоносителя при прохождении его через слой высотой $(R_{2c} - R)$.

Подставим в уравнение (5) полученные выражения и запишем уравнение скорости сушки для слоя высотой $(R_{2c} - R)$ в следующем виде

$$N = \frac{\alpha f}{r} (t_0 - t_m) \exp \frac{\alpha f (R^2 - R_{2c}^2)}{2W_0 R_{2c} \rho_r c_r} \rho_m (1 - \varepsilon) dR. \quad (15)$$

Определим среднюю интегральную скорость сушки по всему слою материала:

$$N_{cp} = -\frac{1}{R_{2c} - R_{1c}} \int_{R_{1c}}^{R_{2c}} N dR, \quad (16)$$

$$N_{cp} = -\frac{\alpha f (t_0 - t_m)}{(R_{2c} - R_{1c}) r} \int_{R_{1c}}^{R_{2c}} \exp \frac{\alpha f (R^2 - R_{2c}^2)}{2W_0 R_{2c} \rho_r c_r} \rho_m (1 - \varepsilon) dR$$

Таким образом, получено итоговое выражение для определения зависимости средней интегральной скорости сушки от высоты слоя материала в роторе центробежного сушильного аппарата.

Литература

1. Я.С. Мухтаров, Р.Ш. Суфиянов, В.А. Лашков, *Вестн. Казан. технол. ун-та*, **17**, 3, 230-232 (2014).
2. Я.С. Мухтаров, Р.Ш. Суфиянов, В.А. Лашков, *Вестн. Казан. технол. ун-та*, **17**, 3, 242-244 (2014).

© Я. С. Мухтаров – д.т.н., проф. каф. машиноведения КНИТУ; Р. Ш. Суфиянов – д.т.н., доц. Московского государственного машиностроительного университета (МАМИ), 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.