

**ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АППАРАТА ВИБРОКИПАЮЩЕГО СЛОЯ
ДЛЯ СУШКИ ВОЛОКНООБРАЗУЮЩИХ ПОЛИМЕРОВ
С НАНОРАЗМЕРНЫМИ ПОРАМИ**

**THE HYDRODYNAMIC MODEL OF THE APPARATUS OF VIBRATED BED
FOR DRYING FIBER-FORMING POLYMERS
WITH NANOSCALE PORES**

Б.С. САЖИН, М.Б. САЖИНА, М.А. АПАРУШКИНА, З.Н. ОСМАНОВ, Э.Р. КУШПАНОВ, В.В. ПЕСКОВОЙ
B.S. SAZHIN, M.B. SAZHINA, M.A. APARUSHKINA, Z.N. OSMANOV, E.R. KUSHPANOV, V.V. PESKOVOY

(Московский государственный университет технологий и управления им. К.Г. Разумовского
Московский государственный текстильный университет им. А.Н. Косыгина)
(Moscow State University of Technology and Management named after K.G. Razumovsky;
Moscow State Textile University "A.N. Kosygin")
E-mail: paxt@ya.ru

Получены соотношения для расчета поперечного и продольного перемешивания частиц в виброкипящем слое. Выявлены параметры, при которых виброкипящий слой близок к режиму идеального вытеснения, что позволяет использовать его для равномерной сушки тонкопористых волокнообразующих полимеров с продолжительностью сушки до 20 мин.

Relations for calculating transverse and longitudinal particles mixing in vibrated bed have been obtained. The parameters under which a vibrated layer is close to the regime of ideal displacement have been identified, it can be used for uniform drying fine porous fiber-forming polymers with duration of drying up to 20 min.

Ключевые слова: взвешенный слой, волокнообразующие полимеры, сушка, гидродинамическая модель, наноразмерные поры, скорость транспортирования, перемешивание, параметры вибрации, виброкипящий слой, меченые частицы, аппарат идеального вытеснения, коэффициенты диффузии, конвективная диффузия, ячейка идеального смешения.

Keywords: a weighted layer, fiber-forming polymers, drying, a hydrodynamic model, nanoscale pores, transportation speed, mixing, vibration parameters, a vibrated bed, marked particles, the device for ideal displacement, a diffusion coefficient, convective diffusion, an ideal mixed particle.

Наибольшую сложность при сушке волокнообразующих полимеров представляют задачи, когда требуется удалить влагу из наноразмерных пор (2...8 нм) и осуществить равномерную глубокую сушку.

Эффективными в таких случаях оказываются сушилки с виброкипящим слоем (ВКС), если по гидродинамической модели они близки к аппаратам идеального вытеснения [1...3]. Основными параметрами гидродинамической модели являются ре-

альная скорость транспортирования обрабатываемого материала и показатель перемешивания материала в аппарате ВКС.

Средняя скорость транспортирования определяется простым соотношением:

$$V_{\text{тр}} = \frac{L}{\tau}, \quad (1)$$

где L – длина вибротка сушилки; τ – необходимое время обработки материала.

Для определения числа условных ячеек $n_{я}$, определяющих тип гидродинамической модели, необходимо рассмотреть условия перемешивания материала в аппарате ВКС.

Реальная скорость транспортирования материала зависит от параметров вибрации и от скорости продуваемого сквозь слой воздуха. Специальные исследования показали, что наилучшие результаты достигаются при обобщенном показателе вибрации $K_p=4,1$.

$$K_p = \frac{Aw^2}{g}, \quad (2)$$

где A – амплитуда вибрационных колебаний; w – частота вибрационных колебаний; g – ускорение силы тяжести, m^2/c .

Эмпирическая формула для определения скорости транспортирования материала [1] имеет вид:

$$V_{тр} = K_{тр} Aw^{1,25} \cos\beta, \quad (3)$$

где $\cos\beta$ – угол наклона направленности вибрационных колебаний; $A=1...3$ мм; $w=0,4...0,8$ 1/с.

Степень взвешивания одиночной частицы является функцией критериев Re и Ar [4]:

$$W = f\left(\frac{\psi Re^2}{Ar}\right). \quad (4)$$

Степень взвешивания в слое или число псевдооживления W – это отношение скорости газа V к критической скорости псевдооживления $V_{кр}$ [2]:

$$W = \frac{V_r}{V_{кр}}. \quad (5)$$

Скорость воздуха через число псевдооживления может быть рассчитана по формуле [3]:

$$V = V_{тр}^* [1 + C \ln(1 + W)]. \quad (6)$$

Установлено [2], что коэффициент поперечного перемешивания (коэффициент псевдодиффузии) D_y зависит от вертикальной составляющей скорости вибрации $A_w \sin\beta$, а средняя скорость вибротранспортирования является функцией горизонтальной составляющей скорости вибрации $A_w \cos\beta$.

Процесс перемешивания имеет первостепенное значение, так как определяет равномерность обработки материала в аппарате. В первом приближении процесс перемешивания дисперсных материалов в виброкипящем слое (ВКС) может быть условно описан уравнением, имеющим вид уравнения диффузии двухкомпонентной смеси:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2}. \quad (7)$$

Решим это уравнение применительно к процессу перемешивания частиц в виброкипящем слое с использованием соответствующих начальных и граничных условий. Допустим, что в начальный момент времени концентрация меченых частиц на поверхности равна нулю, а концентрация у решетки C_0 постоянна в процессе перемешивания. Граничные условия будут иметь вид:

$$\begin{aligned} y=0; C=C_0; \tau \neq 0, \\ y=0; y=h; \frac{dC}{dy}=0, \\ y=h; C=0; \tau=0. \end{aligned} \quad (8)$$

Общее решение уравнения (7) аналогично решению уравнения теплопроводности:

$$C = (A \cos \lambda y + B \sin \lambda y) \exp(-\lambda^2 D_y \tau). \quad (9)$$

Так как $\frac{dC}{dy} = 0$, при $y=0$ и $y=h$:

$$\frac{dC}{d\tau} = (-A \sin \lambda y + B \cos \lambda y) \exp(-\lambda^2 D_y \tau), \quad (10)$$

при $y = 0, B = 0$; при $y = h$:

$$A \cos \lambda y = 0. \quad (11)$$

Чтобы условие (11) выполнялось, λ должно быть равным одному из чисел:

$$\lambda_1 = \frac{\pi}{2h}; \lambda_2 = \frac{3\pi}{2h}; \lambda_3 = \frac{5\pi}{2h}; \dots \lambda_n = \frac{(2n-1)\pi}{2h}. \quad (12)$$

Подставив полученные значения в общее решение при $\tau = 0$, получим:

$$C_{0(13)} = A_1 \cos \frac{\pi y}{2h} + A_2 \cos \frac{3\pi y}{2h} + \dots + A_n \cos \frac{(2n-1)\pi y}{2h} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos \frac{(2n-1)\pi y}{2h}. \quad (13)$$

Коэффициенты A_1 и A_2 определяются по формулам разложения тригонометрических рядов:

$$A_1 = \frac{2C_0}{h} \int_0^h \cos \frac{\pi}{2h} y = \frac{4C_0}{\pi}, \quad (14)$$

$$A_n = \frac{2C_0}{h} \int_0^h \cos \frac{(2n-1)\pi}{2h} y = \frac{4C_0}{(2n-1)\pi}. \quad (15)$$

Окончательно получаем выражение вида:

$$C_{y,\tau} = C_0 - \frac{4C_0}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2n-1} \exp(-\lambda^2 D_y \tau) \cos \lambda_n y. \quad (16)$$

Для решения уравнения (13) требуется знание численных значений коэффициентов диффузии (фактически это псевдодиффузия, так как вместо молекул реально диффундируют частицы дисперсного материала в ВКС). Используя кинетическую теорию газов, последнее уравнение можно записать через соотношение:

$$D_y = \frac{1}{3} \ell \bar{V},$$

где \bar{V} – средняя скорость частиц; ℓ – средняя длина свободного пробега. Однако определение средних скоростей частиц связано с большими трудностями, поэтому коэффициенты «диффузии» определялись

экспериментально по концентрации меченного вещества в слое. Коэффициент поперечной диффузии может быть определен по формуле:

$$C_{y,\tau} = \frac{C_0}{2\sqrt{\pi D_y \tau}} \exp\left(-\frac{y^2}{4D_y \tau}\right). \quad (17)$$

Логарифмируя, получим:

$$\ln \frac{C(y,\tau)}{C_0} = \ln \frac{1}{2\sqrt{\pi D_y \tau}} - \frac{y^2}{4D_y \tau}. \quad (18)$$

Полученное уравнение является уравнением прямой линии в координатах $\ln C\left(\frac{y,\tau}{C_0}\right) - y^2$, у которой угловой коэффициент равен $\frac{1}{4} D_y \tau$.

Наиболее важной характеристикой аппаратов с направленным виброкипящим слоем являются показатели перемешивания частиц в продольном направлении. Процесс перемешивания частиц по длине аппарата с ВКС можно описать уравнением типа уравнения конвективной диффузии:

$$\frac{dC}{d\tau} = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial L^2} - v_{\text{тр}} \frac{\partial C}{\partial L}, \quad (19)$$

где $V_{\text{тр}}$ – скорость транспортирования; D_L – коэффициент продольной псевдодиффузии; L – направление диффузии (по длине вибротка L аппарата ВКС).

Обработка данных экспериментов позволила получить зависимость

$$D_L = f\left(\frac{Aw^2}{g} \sin \beta\right),$$

которая для одного из типичных волокнообразующих полимеров – полипропилена – имеет вид [3], [4]:

$$D_L = 0,82 \left(\frac{Aw^2}{g} \sin \beta\right)^{0,6}, \quad (20)$$

где $Aw^2 = 10 \dots 80 \text{ м}^2/\text{с}$; $w = 100 \dots 300 \text{ 1/с}$ при высоте неподвижного слоя $h_0 = 20 \dots 40$

мм и отношении длины вибролотка к его ширине $\frac{L}{B}=10$. Число ячеек идеального смешения $n_{я}$ для ВКС изменялось в пределах $n_{я}=40...80$, поэтому такой режим ВКС может быть отнесен к режиму идеального вытеснения по твердой фазе, что гарантирует равномерность обработки дисперсных частиц.

Подача воздуха под вибрирующую решетку существенно сказывается на характере перемешивания частиц в ВКС, причем зависимость D_L от скорости воздуха имеет две области. В области малых скоростей газа ($V < V_{крит}$) поток газа не оказывает существенного влияния на процесс перемешивания, а в области скоростей газа больших $V_{крит}$ коэффициенты продольной диффузии изменяются пропорционально первой степени критерия Re . Получена эмпирическая зависимость для коэффициента продольного перемешивания [3], [4], имеющая вид:

$$D_L = k_1 \left(\frac{Aw^2}{g} \sin\beta \right)^{0.6} + k_2 \frac{Re}{Re_{кр}} + (k_3 - k_2) \frac{Re}{Re - Re_{кр}}. \quad (21)$$

Для полипропилена входящие в формулу (18) коэффициенты имеют следующие численные значения: $k_1 = 0,82$; $k_2 = 70$; $k_3 = 90$. При $\frac{Re}{Re_{кр}} \leq 1,0$, $k_2 = k_3$.

Максимальные значения коэффициента D_L в опытах были $13,5 \text{ см}^2/\text{с}$, а минимальные числа ячеек идеального смешения $n_{я}=19$; при этом критерий Пекле (Pe') изменялся в пределах от 40 до 80.

Получено уравнение связи $n_{я}$ и D_L :

$$n_{я} = \frac{1}{2D_L} \frac{G_m}{h_0 \rho_{нас}} \frac{L}{B}, \quad (22)$$

где G_i – вес слоя материала, $\rho_{нас}$ – его насыпная плотность.

1. Получены уравнения для расчета скорости транспортирования материала в виброкипящем слое.

2. На базе интерпретации перемешивания частиц как диффузии молекул получены соотношения для расчета поперечного и продольного перемешивания частиц в виброкипящем слое.

3. Получены уравнения для расчета числа псевдосекций (ячеек идеального смешения $n_{я}$) для волокнообразующих полимеров на примере полипропилена, а также уравнение связи между числом ячеек и коэффициентом псевдодиффузии.

4. Выявлены параметры, при которых ВКС близок к режиму идеального вытеснения, что позволило его эффективно использовать для равномерной сушки тонкопористых волокнообразующих полимеров с наноразмерными порами, необходимая продолжительность обработки которых составляет до 20 мин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сажин Б.С., Сажина В.Б. Научные основы термовлажностной обработки дисперсных и рулонных материалов. – М.: Химия, 2012.
2. Расчеты аппаратов кипящего слоя. Справочник под ред. И.П. Мухленова, Б.С. Сажина и В.Ф. Фролова. – Л.: Химия, 1986.
3. Сажин В.Б., Сажина М.Б. Выбор и расчет аппаратов со взвешенным слоем. – М.: РосЗИТЛП, 2001.
4. Сажин Б.С., Сажина М.Б. и др. Уточнение гидродинамической модели виброкипящего слоя и условий перемешивания. – М.: МКХТ, 2012, №5. С.87...92.

Рекомендована кафедрой процессов, аппаратов химической технологии и безопасности жизнедеятельности. Поступила 06.06.12.