

УДК 677

ОСОБЕННОСТИ ГИДРОДИНАМИКИ ВИХРЕВЫХ СУШИЛОК ДЛЯ ВОЛОКНООБРАЗУЮЩИХ ПОЛИМЕРОВ

Б.С. САЖИН, М.Б. САЖИНА, Л.М. КОЧЕТОВ, АЛЕКСАНДР В. ЛОПАКОВ, АЛЕКСЕЙ В. ЛОПАКОВ

(Московский государственный текстильный университет им. А.Н. Косыгина,
Российский заочный институт текстильной и легкой промышленности)

E-mail: office@msta.ac.ru, sazhinbs@pochta.ru

Предложены методы инженерного расчета и выбора оптимального режима работы сушилок для широкопористых дисперсных материалов. Установлены особенности гидродинамики движения и взаимодействия газовой и твердой фаз в плоских вихревых аппаратах и определены важнейшие их характеристики.

Methods of engineering account and choice of an optimum operating conditions of drying machines for wide porous dispersed materials are offered herein. Features of hydrodynamics of movement and interaction of gas and firm stages in the flat vortex apparatus are stated and their major characteristics are defined.

Ключевые слова: волокнообразующие полимеры, фонтанирующий слой, тонкопористые материалы, широкопористые материалы, вихревые аппараты.

К вихревым сушилкам для дисперсных волокнообразующих полимеров можно отнести сушилки со встречными закрученными потоками, работающие в режиме вращающегося кольцевого слоя (СВЗПКС) [1], дисковые вихревые сушилки (ДВС) [3], [4] и сушилки с закрученным фонтанирующим слоем, имеющие дополнительные хордальные вводы теплоносителя (СФСДВ) [2]. Аппараты СВЗПКС предназначены для широкопористых материалов, а аппараты ДВС и СФСДВ – для тонкопористых материалов с размерами наиболее тонких пор до 5 нанометров.

Описание гидродинамики аппаратов СВЗПКС базируется на результатах исследований аппаратов со встречными закрученными потоками ВЗП [1].

Согласно кольцевой модели ВЗП существуют два кольцевых потока газа и мате-

риала. Дисперсный материал из внутреннего кольцевого потока под действием центробежной силы вымывается во внешний. Плотность потока вымывания определяется как:

$$q = k_v C, \quad (1)$$

где q – плотность потока вымывания (в радиальном направлении), $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; k_v – коэффициент вымывания, $\text{м}/\text{с}$; C – концентрация материала во внутреннем потоке, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Потоки газа и материала движутся с одинаковой скоростью, равной скорости газа. Из этой модели движения потоков определены время пребывания материала в аппарате и его моменты:

$$\bar{\tau} = \left(\frac{a_1 + b_1}{a_2} \right) b_2 \left(1 - \frac{\exp a_2 H}{a_2} + H \exp a_2 H \right), \quad (2)$$

$$Pe = 1 / \left[2(a_1 + b_1)^2 \left[\frac{1}{a_2^2} - \frac{H^2 \exp a_2 H}{1 - \exp a_2 H} \left(1 - \frac{\exp a_2 H}{1 - \exp a_2 H} \right) \right] \right], \quad (3)$$

где $\bar{\tau}$ – среднее время пребывания, с; Pe – дисперсия времени пребывания, с²; H – высота аппарата, м

$$a_1 = \frac{\pi(r^2 - r_0^2)}{V_1 + V_2}; \quad a_2 = \frac{2\pi k_B r}{V_1 + V_2}; \quad (4)$$

$$b_1 = \frac{\pi(R^2 - r^2)}{V_1 + V_2}; \quad b_2 = \frac{2\pi k_B r}{V_2}, \quad (5)$$

где R – радиус аппарата, м; r_0 , r – внутренний и наружный радиусы внутреннего потока; V_1 и V_2 – расходы газа по первому и второму каналам аппарата.

Двухпараметрическая модель отличается от кольцевой существованием промежуточного слоя между внутренним и наружным потоками.

Для расчетов среднего времени пребывания $\bar{\tau}$ и параметра Pe по этим моделям определены их параметры в зависимости от расходов газа по каналам V_1 и V_2 и от диаметра частиц материала $d_{\text{ч}}$.

При рассмотрении баланса по материалу в слое внутреннего газового потока Δz и по материалу для слоя внешнего потока высотой Δz получены уравнения, из решения которых вытекают уравнения для определения среднего времени пребывания и критерия Пекле в аппарате:

$$\bar{\tau} = \frac{A_2 H_p}{V_2 + A_3} \left(\frac{S_1 H_p}{V_2 V_1} + \frac{S_2 H_p}{V_2 + A_3} \right) \left[\left(\frac{V_3 - A_1}{A_2 H_p} \right)^2 + \exp \left(\frac{A_2 H_p}{V_3 - A_1} \right) \frac{A_2^2 H_p - (V_2 - A_1)}{A_2^2 H_p^2} \right], \quad (6)$$

$$Pe = 1 / \left[2 \left(\frac{S_1 H_p}{V_3 - A_1} + \frac{S_2 H_p}{V_2 + A_3} \right)^2 \left\{ \left(\frac{V_3 - A_1}{A_2 H_p} \right) - \frac{\exp \left(-\frac{A_2 H_p}{V_2 - A_1} \right)}{1 - \exp \left(-\frac{A_2 H_p}{V_2 - A_2} \right)} \right\} \right], \quad (7)$$

где H_p – рабочая высота аппарата; S_1 , S_2 – площади ввода первичного и вторичного потоков газа; $V_3 = V_1 + V_2$ – суммарный расход газа; V – параметр модели (подвижность частиц); $A_1 = V m_{\text{ч}} g S_1$; $A_2 = 2\pi r^2 \omega b^2 m_{\text{ч}} b$; $A_3 = V m_{\text{ч}} g S_2$.

Полученные зависимости для определения среднего времени пребывания частиц τ и критерия Pe могут быть применены для расчета технологических аппаратов со встречными закрученными потоками (ВЗП).

Для дисковых вихревых камер с горизонтальной осью обнаружены две области

работы: докритическая (при малых скоростях газа), когда удерживающая способность зависит от расхода теплоносителя и закритическая (при больших скоростях газа), когда удерживающая способность практически не зависит от расхода теплоносителя.

В первой области основными силами, определяющими вынос частиц из слоя, являются центробежная сила и сила тяжести, а во второй области – центробежная сила и сила сопротивления потока, покидающего вихревую камеру. Для первой области получено соотношение:

$$q_0 = 0,103 \frac{\varepsilon_0 \rho_p^{1,5} d_p^3 R_*^{1,5} H^{1,5}}{\varphi_{тр} f_{вх}^{0,5} R^{0,5} V^{1,5}}, \quad (8)$$

а для второй области – соотношение:

$$q_0 = 191 \frac{\varepsilon_0 \rho_p^{1,5} d_p^{1,5} R_*^3 H^3}{\varphi_{тр} \xi^{1,5} f_{вх}^2 \rho^{0,5} R^{0,5}}. \quad (9)$$

Анализ зависимостей (8) и (9) подтвердил существование двух режимов работы вихревых аппаратов: докритического, когда q_0 пропорционально расходу газа в степени 1,5, и автомодельного, при котором q_0 не зависит от V . Следовательно, с увеличением расхода газа удерживающая способность вначале возрастает пропорционально V в степени 1,5 ($q_0 \approx V^{1,5}$), достигая наибольшего значения в критической точке, после чего с увеличением V удерживающая способность остается постоянной, то есть наступает автомодельный режим.

При определенном расходе газа вихревая камера будет удерживать определенное количество дисперсного материала q (удерживающая способность камеры). Величина удерживающей способности является важнейшей характеристикой вихревой камеры, поскольку определяет среднее время пребывания дисперсного материала в аппарате ($\tau_{ср}$) согласно соотношению:

$$\tau_{ср} = q/G, \quad (10)$$

где G – расход твердого материала при непрерывном процессе. Путем варьирования производительности по твердому материалу G и удерживающей способности камеры q можно добиться оптимального времени обработки материала в камере, достигнув, в частности, требуемой остаточной влажности материала при его сушке.

При рассмотрении математической модели гидродинамики дисперсного потока в дисковой вихревой сушилке с вертикальной осью [3] получено выражение для удерживающей способности камеры:

$$q = \frac{\pi \rho_r B D^2 \alpha^2 \left(\frac{D}{h_1} - \frac{C(1+A)}{K\alpha} \right)}{(A^2 - 1)C^2}, \quad (11)$$

где

$$C = \left(\frac{3}{8} \xi \frac{\rho_r D}{\rho_m \delta} \right)$$

и

$$A = \frac{(1 + f_x)}{(1 - f_x)}.$$

Анализируя уравнение (11), можно оценить влияние различных параметров на величину удерживающей способности камеры. Удерживающая способность камеры увеличивается пропорционально ширине камеры B и примерно пропорционально квадрату диаметра.

Важным выводом является независимость величины q от расхода воздуха. Эта особенность характерна только для камер с вертикальной осью, где сила тяжести не влияет на характер выноса материала из камеры, поскольку направлена перпендикулярно плоскости движения твердой и газообразной фаз.

При проведении и расчете процесса сушки в аппаратах фонтанирующего слоя с дополнительным закручивающим потоком газа большое значение имеет знание структуры потоков дисперсной фазы. Исходя из реальной картины движения материала в аппарате предложена комбинированная гидродинамическая модель структуры потоков твердой фазы.

Ядро фонтана и периферийная область дополнительных боковых струй описываются ячеечной моделью. Периферийная зона ниже действия боковых струй описывается моделью идеального вытеснения. Между зонами происходит циркуляция дисперсного материала.

Комбинированная модель состоит из уравнений материального баланса частиц трассера в потоках. Для ядра фонтана и периферийной зоны уравнения модели имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} v(C_1 - C_2) &= V_n \frac{dC_2}{d\tau}, \\ v(C_2 - C_3) &= V_n \frac{dC_3}{d\tau}, \\ \dots\dots\dots \\ v(C_{n-1} - C_n) &= V_n \frac{dC_n}{d\tau}, \\ v(C_n - C_{n+1}) &= V_n \frac{dC_{n+1}}{d\tau}. \end{aligned} \right\} (12)$$

$$-\frac{dC}{d\tau} = -\frac{v_2}{V} \frac{\partial C}{\partial V_a}. \quad (13)$$

Дифференциальное уравнение (13) имеет начальное и граничное условия:

$$\tau = 0, C = 0, V_a = 0, C = C_b.$$

Решая дифференциальные уравнения (12) и уравнение (13), после ряда математических преобразований получаем безразмерную функцию отклика для данного аппарата на импульсное возмущение по концентрации трассера:

Аналогично для зоны идеального вытеснения:

$$C(\theta) = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{p^{i-1} (1+p)^{i(n-1)}}{\min(i, n-1)!} \left[\theta - (i-1) \frac{V}{p} \right]^{(i-1)} \exp \left[-\frac{(1+p)}{m} \left[\theta - (i-1) \frac{V}{p} \right] \right] 1 \left\{ \theta - (i-1) \frac{V}{p} \right\}. \quad (14)$$

Начальным моментом первого порядка для функции (14) является среднее время пребывания частиц материала в аппарате – τ .

Выражение для дисперсии функции (15) имеет вид:

$$\sigma_0^2 = 1 + \frac{V^2}{p} - \frac{n(n-1)m^2}{p+1}. \quad (15)$$

Анализ уравнения (15) показывает, что при большом значении параметра рецикла ($p \rightarrow \infty$) безразмерная дисперсия σ_0 стремится к единице, то есть при большой доле рецикла модель движения твердой фазы в аппарате переходит в модель идеального перемешивания.

ВЫВОДЫ

1. Предложены методы инженерного расчета и выбора оптимального режима работы сушилок для широкопористых дисперсных материалов с критическим размером пор более 6 нанометров.

2. Разработанные физические и математические модели позволили вскрыть особенности гидродинамики движения и взаимодействия газовой и твердой фаз в

плоских вихревых аппаратах и определить важнейшие их характеристики (q_0 , m , τ_{cp}).

3. Для тонкопористых материалов с размерами наиболее тонких пор до 5 нанометров на основании результатов исследования рекомендованы сушилки фонтанирующего слоя с закрученным потоком, в том числе с сушкой на инертном зернистом материале.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сажин Б.С., Сажин В.Б. Научные основы техники сушки. – М.: Наука, 1997.
2. Сажин В.Б., Сажина М.Б. Сушка в закрученных потоках: теория, расчет, технические решения. – М., 2001.
3. Сажин Б.С., Кочетов Л.М., Отрубянников Е.В. // Изв. вузов. Химия и химическая технология. – 2009, № 1. С. 4.
4. Белоусов А.С., Сажин Б.С., Кочетов Л.М., Лопатов А.В., Сажин В.Б. Структура потоков двухфазной полидисперсной смеси в вихревой сушилке. Успехи в химии и химической технологии. – Т. XIX. №10 (58). 2005. С. 77...79.

Рекомендована кафедрой процессов, аппаратов химической технологии и безопасности жизнедеятельности. Поступила 15.06.10.