

УДК 66.047

СУШИЛКИ ВЗВЕШЕННОГО СЛОЯ С УПРАВЛЯЕМОЙ ГИДРОДИНАМИКОЙ ДЛЯ ДИСПЕРСНЫХ ВОЛОКНООБРАЗУЮЩИХ ПОЛИМЕРОВ

М.Б. САЖИНА, В.А. УГЛОВ, В.Б. САЖИН, Б.С. САЖИН

(Российский заочный институт текстильной и легкой промышленности,
Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева,
Московский государственный текстильный университет им. А.Н. Косыгина)

Процессы сушки являются достаточно распространенными и энергоемкими. Создание ресурсосберегающих и экологически чистых сушильных аппаратов и установок для дисперсных материалов целесообразно осуществлять на базе различных гидродинамических режимов взвешенного слоя, особенно закрученных потоков.

Гидродинамические режимы взвешенного слоя находят все большее применение, отличаются высокой интенсивностью процесса и позволяют создавать в аппаратах управляемую гидродинамическую обстановку. Во многих случаях применение таких аппаратов позволяет совмещать сушку и улавливание. Это важно как с точки зрения экономии ресурсов, так и в экологическом отношении [1], [2].

На рис. 1 представлены схемы основных типовых сушилок с закрученными потоками: а – циклонная сушилка (ЦС); б – комбинированная циклонная сушилка (КЦС); в – сушилка со встречными закрученными потоками (СВЗП); г – вихревая сушилка (ВС); д – комбинированная безуносная сушилка с закрученными потоками (СВЗП-ВК).

Выбор сушильных аппаратов для дисперсных материалов целесообразно осуществлять на основе применения новой классификации материалов как объектов сушки [3]. Комплексный анализ материалов как объектов сушки в сочетании с анализом особенностей и возможностей различных режимов взвешенного слоя позволяет определить область рационального применения того или иного режима и дать соответствующие технические рекомендации по аппаратурно-технологическому оформлению сушилки и сушильной установки для каждого конкретного материала (исходя из набора эффективных типовых решений).

Используя принцип соответственных состояний и данные по кинетике сушки модельных материалов во взвешенном слое, можно рассчитать процесс сушки любого материала без проведения опытов по сушке на лабораторных и пилотных установках на основании комплексного анализа материалов как объектов сушки и определения места исследуемого материала в классификационной таблице.

Весьма эффективным является применение закрученных потоков, особенно

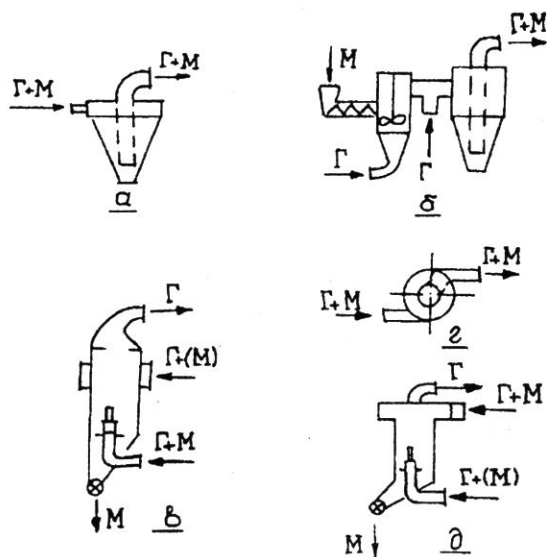


Рис. 1

встречных закрученных потоков.

Существенно расширяет область применения безуносных сушилок со встречными закрученными потоками режим сушки с образованием вращающегося слоя дисперсного материала. Применение такого режима, как было установлено в [4], позволяет высушивать в них не только широкопористые, но и тонкопористые материалы с размерами пор порядка 60 \AA .

Экспериментально подтверждено, что при определенных режимах работы аппарата ВЗП образуется устойчивое вращающееся кольцо частиц дисперсного материала, что способствует дополнительной задержке материала в аппарате и положительно сказывается на проведении процесса сушки. Показано, что такое кольцо образуется вследствие расширения первичного потока, который в пристеночной области останавливает вторичный поток – частицы материала, вращаясь, зависают.

Определены координаты кольца и порозность частиц в кольце по высоте аппарата. Получена расчетная зависимость удерживающей способности кольца от режима и сопоставлена с экспериментальными данными (расхождение не превышает 11%). Изучены параметры вращающегося кольца (порозность, среднее время пребывания частиц в кольце, удерживающая способность); сняты С-кривые отклика. Эксперимент подтвердил адекватность разработанной математической модели.

Разработана стохастическая модель процесса улавливания готового продукта в аппарате СВЗП, позволяющая в отличие от других известных детерминированных моделей получить непосредственную оценку эффективности этого процесса – массу уловленного продукта, что необходимо для расчета интегрального показателя эффективности работы аппарата СВЗП.

Предложен эксергетический функционал, позволяющий получить объективную оценку эффективности использования потенциала сушильного агента, с помощью которого показана возможность перехода от двухступенчатой сушки суспензионного поливинилхлорида (ПВХ) к одноступенчатой, работающей в режиме вращающегося

кольца во встречных закрученных потоках, что позволило сократить число аппаратов в сушильной установке с восьми до двух.

Экспериментально установлен диапазон рациональных соотношений потоков газозвеси по каналам в аппарате с вращающимся кольцевым слоем дисперсного материала, соответствующий режиму устойчивого существования кольца, при котором обеспечивается высокая эффективность сушки (до 25 с при числе псевдоячеек 6...8 и изменении влагосодержания до 0,1%) и улавливания (не менее 99% при размере пор свыше 60 \AA).

Для дисперсных текстильно-вспомогательных материалов, истирающихся в процессе сушки, и материалов с повышенными адгезионно-когезионными свойствами (K_{a-k} до 4), например, красителей, при сушке которых желательно уменьшить эффект трения материалов о стенки аппарата, целесообразно применение модифицированного аппарата ВЗП – ВЗПК с расширяющимся конусом (ВЗПК).

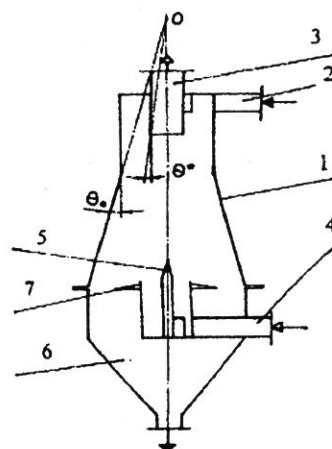


Рис. 2

На рис.2 изображен противоточный вихревой аппарат со встречными закрученными потоками с расширяющимся конусом (ВЗПК): 1 – конический расширяющийся книзу корпус аппарата; 2 – верхний периферийный тангенциальный ввод запыленного газа; 3 – патрубок выхода очищенного газа; 4 – нижний центральный тангенциальный ввод запыленного газа; 5 – вытеснитель; 6 – бункер уловленного материала; 7 – отбойная шайба.

Проведены аналитические и экспери-

ментальные исследования безуносной сушиллки со спутными закрученными потоками. Впервые для аппаратов данного класса осуществлено численное моделирование движения газовой фазы на основе $K_T - \varepsilon$ модели турбулентности [5].

Рассмотрено установившееся движение газовой фазы в прямоточном аппарате на основе совместного решения системы дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned} v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} - \frac{v_\varphi^2}{r} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} + v \left(\frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} - \frac{v_r}{r^2} \right), \\ v_r \frac{\partial v_\varphi}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_\varphi}{\partial z} + \frac{v_r v_\varphi}{r} &= v \left(\frac{\partial^2 v_\varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\varphi}{\partial r} + \frac{\partial^2 v_\varphi}{\partial z^2} - \frac{v_\varphi}{r^2} \right), \\ v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + v \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right), \\ \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{v_r}{r} &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где $v = v_L + v_T / \sigma_E$.

В уравнениях (1) коэффициент турбулентной вязкости определяется соотношением Колмогорова-Прандтля

$$v_T = c_V k_T^2 / \varepsilon. \quad (2)$$

Навье-Стокса для осесимметричной задачи, уравнения непрерывности и двух уровней $K_T - \varepsilon$ модели турбулентности.

Математическая модель включала дифференциальные уравнения в цилиндрической системе координат движения вязкого несжимаемого газа, уравнения сохранения импульса и массы:

Для замыкания системы (1) использована $K_T - \varepsilon$ модель турбулентности и включены два дифференциальных уравнения для кинетической энергии K_T турбулентности и скорости ε ее диссипации:

$$\begin{aligned} v_r \frac{\partial k_T}{\partial r} + v_z \frac{\partial k_T}{\partial z} &= v \left[\frac{\partial^2 k_T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial k_T}{\partial r} + \frac{\partial^2 k_T}{\partial z^2} \right] + G - \varepsilon, \\ v_r \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} + v_z \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} &= v \left[\frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} + \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial z^2} \right] + \frac{\varepsilon}{k_T} (c_1 G - c_2 \varepsilon), \end{aligned} \quad (3)$$

где $G = G_{r,z} + G_\varphi$;

$$\begin{aligned} G_{r,z} &= v \left\{ \left[\left(\frac{\partial v_r}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{v_r}{r} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v_z}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r} \right)^2 \right\}, \\ G_\varphi &= v \left[\left(r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v_\varphi}{r} \right) \right)^2 + \left(\frac{\partial v_\varphi}{\partial z} \right)^2 - \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v_\varphi^2}{r} \right) \right]. \end{aligned} \quad (4)$$

Для принятой схемы движения закрученных потоков в аппарате граничные условия имеют вид

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 \leq r < R_2, z = h_2, v_z = v_{z2}, v_\varphi = v_{\varphi2}; \quad r = R_2, 0 \leq z < h_2, v_r = 0; \\ R_2 \leq r < (R_1 - b_1), z = 0, v_z = 0; \quad (R_1 - b_1) \leq r < R_1, z = 0, v_z = v_{z1}, v_\varphi = v_{\varphi1}; \\ r = R_1, 0 \leq z < H_k, v_r = 0; \quad r_0 \leq r < R_1, z = H_k, v_z = 0; \\ 0 \leq r < r_0, z = H_k, P = 0, v_z = v_{z0}. \end{array} \right. \quad (5)$$

Получено численное решение разработанной математической модели на ПЭВМ с применением метода конечных разностей.

Движение газовой фазы в аппарате характеризовалось функцией тока. Получены линии тока газа при различных режимно-конструктивных параметрах. Анализ позволил рекомендовать рациональные конструктивные соотношения аппарата и режимы его работы.

При необходимости увеличения времени пребывания материала в безуносных сушилках с закрученными потоками (что имеет место при критическом размере пор менее 60 \AA) целесообразно применение комбинированных сушилок с вихревой камерой (СВЗП-ВК). Среднее время пребывания частиц материала в аппарате СВЗП-ВК значительно больше, чем в СВЗП, а гидродинамическая модель сушилок СВЗП-ВК характеризуется числом ячеек $2,5 \dots 3,4$, что значительно превосходит данные, например, по кипящему слою, для которого обычно $n_\lambda = 1,2 \dots 1,5$. Поэтому несмотря на то, что кипящий слой может обеспечить требуемое для микропористых материалов время сушки, предпочтительнее использовать аппараты СВЗП-ВК, которые обеспечивают более равномерную сушку.

Проведенный нами анализ аппаратов позволяет сделать вывод о том, что при сушке широкопористых крупнодисперсных волокнообразующих полимерных материалов целесообразно использовать аппараты ЦС, для широкопористых текстильно-вспомогательных материалов с повышенными адгезионно-когезионными свойствами – аппараты КЦС, для тонкодисперсных материалов с размерами пор не менее 60 \AA – различные модификации аппаратов СВЗП (в случае грубодисперсных – ВС), а для микропористых материалов с размерами пор менее 60 \AA – комби-

нированные аппараты СВЗП-ВК.

ВЫВОДЫ

1. Проведен комплексный анализ возможностей сушильных аппаратов с взвешенным слоем применительно к сушке дисперсных волокнообразующих полимеров и в качестве типовых рекомендованы высокоэффективные сушилки с управляемой гидродинамикой, работающие в различных режимах закрученных потоков.

2. Экспериментально подтверждено, что при определенных режимах работы аппарата со встречными закрученными потоками (ВЗП) образуется устойчивое вращающееся кольцо частиц дисперсного материала, что способствует дополнительной задержке материала в аппарате и положительно сказывается на проведении процесса сушки. Изучены параметры вращающегося кольца (порозность, среднее время пребывания частиц в кольце, удерживающая способность), сняты С-кривые отклика. Эксперимент подтвердил адекватность разработанной математической модели.

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 В.Б., Сажина М.Б. Выбор и расчет аппаратов с взвешенным слоем. – М.: 2002.
4. Сажина М.Б. Дис...канд. техн. наук. – М., 2001.
5. Сажин Б.С., Акулич А.В., Сажин В.Б. Математическое моделирование движения газа в сепарационной зоне прямоточного вихревого аппарата на основе $(k_\tau - \varepsilon)$ -модели турбулентности. – ТОХТ. 2001, №5, т. 35. С.472...478.

Рекомендована кафедрой теплотехники
РосЗИТЛП. Поступила 19.05.03.