

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ ВИХРЕВОГО СЛОЯ ГАЗОВЗВЕСИ

А.С. БЕЛОУСОВ, Б.С. САЖИН

(Московский государственный текстильный университет им. А.Н. Косыгина)

Режимы течения газозвеси в виде вихревого слоя дисперсной фазы, поперечного по отношению к оси устройства, реализуются в вихревых камерах для сушки волокнообразующих полимеров или в многофункциональных аппаратах для сушки с одновременным улавливанием [1]. Аналогичный режим применяется в некоторых моделях устройств вихревого прядения (УВП). Здесь он называется поперечно-круговым способом стационарного вихря [2], причем формирование слоя волокнистой мычки может происходить как за счет встречного вихревого потока, так и за счет переливного порога на выходе материала. Материал в рассматриваемой группе устройств обычно вводится в пристеночную область, а выходит вблизи оси. В некоторых прядильных камерах MVS материал выводится вместе с воздушным потоком [3]. Ввиду общности аэродинамической схемы течения результаты, полученные на одних устройствах, могут быть использованы для характеристики всей группы, что представляет особый интерес для малых устройств с большими скоростями, где эксперимент затруднителен.

Эффективным инструментом для анализа характера течения газозвеси является информация о спектрах отклика устройств на импульсное возмущение по трассеру, внесенному в дисперсную фазу. Для выявления характеристик течений обычно применяется метод моментов спектров отклика, совместно с уравнениями связи и типовыми моделями структуры потоков [4]. В области малых значений числа Пекле, как показано в работе [5], более эффективно применение методики нелинейного оценивания, основанной на алгоритмах поисковой оптимизации.

Имеющиеся представления о структуре потоков вихревого слоя в сушильных ка-

мерах приведены в работах [6], [7]. В [6] рассматривался аппарат с горизонтальной осью и относительным диаметром выхода $\bar{d}_T = d_T / D = 0,25$, где D – диаметр камеры. Было установлено, что во всем рабочем диапазоне расхода газа структура потоков описывается ячеечной моделью с монотонно возрастающим числом ячеек. Для аппарата с вертикальной осью (горизонтальная вихревая камера – ГВК) и диаметром выхлопа $\bar{d}_T = d_T / D = 0,5$ в [7] также была предложена ячеечная модель, однако полученные зависимости числа ячеек от концентрации материала на входе в аппарат имеют немонотонный характер. Примененный в [7] метод моментов практически не позволяет оценивать адекватность модели. Можно предположить, что немонотонные зависимости связаны с недостаточностью степеней свободы однопараметрической ячеечной модели и интегральным характером идентификации по методу моментов. Поэтому в данной работе предпринята попытка исследовать структуру потоков в вихревом слое с помощью более общих моделей, а также увеличить разрешающую способность процедуры идентификации.

Необходимо отметить, что в рассматриваемых устройствах под воздействием вращения двухфазной среды наряду с активизацией гидродинамики может происходить расслоение течений, обусловленное неоднородным влиянием полей вращения на материал в рабочем объеме. Это явление может вызывать крупномасштабные динамические неоднородности, внешне аналогичные неоднородностям распределения времени пребывания в химических реакторах [4].

Для моделирования и расчета рассматриваемых структур предлагается группа

многопоточных моделей, которая учитывает наблюдаемое в экспериментах реальное разделение потоков с различными свойствами. Модели имеют однотипные элементы (ячейки смешения) и блоки (поток или несколько параллельных потоков). Например, рассмотрим группу моделей с последовательно возрастающим числом параметров: однонаправленная ячеечная модель (1 параметр); ячеечная модель с обратным потоком (2 параметра); секционная двухпоточная модель (3 параметра); смешанная двухпоточная (4 параметра); секционная трехпоточная (5 параметров) и т.д. Процедура выбора адекватной модели и одновременного определения ее параметров (идентификации) реализуется в виде последовательности M_k – моделей приближения. На каждом k -м этапе выполняется идентификация M_k модели по k параметрам методом нелинейного оценивания [5] с использованием F -статистики и сравнением рельефа функции интенсивности [8], полученной по модели, с экспериментальной. Если F -критерий уменьшается, то процесс продолжается до достижения адекватности. Если последовательность M_k не дает уменьшения F -критерия, то в анализ необходимо вклю-

чить дополнительные комбинированные модели [8].

Для реализации процедуры идентификации рассматриваемые модели и функции интенсивности должны рассчитываться в достаточно широком диапазоне значений параметров. Кроме того, желательно знать границы корректного применения расчетных процедур. Уравнения ячеечной модели с обратным потоком (ЯМОП) в относительных координатах имеют вид:

первая секция

$$\frac{dC_1}{d\theta} = N(1 - C_1(1+f) + C_2f), \quad (1)$$

секции от 2 до $N-1$

$$\frac{dC_i}{d\theta} = N(C_{i-1}(1+f) - C_i(1+2f) + C_{i+1}f), \quad (2)$$

секция N

$$\frac{dC_N}{d\theta} = N(C_{N-1}(1+f) - C_N(1+f)). \quad (3)$$

В случае импульсного возмущения модель имеет решение [4]:

$$C(\theta) = -2N(f/(1+f))^{-N/2} \sum_{i=1}^N (\sin(p_i)^2 / D'(p_i)) \exp(K_i \theta), \quad (4)$$

где $K_i = N(1+f) \left\{ 2(f/(1+f))^{1/2} \cos(p_i) - \left[(1+2f)/(1+f) \right] \right\}$; $f = r/Q$; Q – прямой

поток; r – рециркуляционный поток, а p_i – корни уравнения:

$$D(p) = x^{-0.5} \sin[(1+N)p] - 2 \sin[Np] + x^{0.5} \sin[(N-1)p], \quad (5)$$

где $x = f/(1+f)$, а $D'(p_i)$ – значение производной от $D(p)$ при $p = p_i$. Параметрами модели ЯМОП являются число секций N и относительный обратный поток x . Наибольшую сложность в модели представляет расчет N трансцендентных уравнений (5), который, в случае применения методов оптимизации, должен проводиться на каж-

дом шаге поиска в достаточно широком диапазоне параметров. Предложен алгоритм расчета корней методом секущих и найдено уравнение вычисления начальных условий, обеспечивающее сходимость к соответствующему решению:

$$P_i^0 = \pi(i - (x - 0,15))/(N + 0,8). \quad (6)$$

Найдена область значений параметров, в которой обеспечивается устойчивая сходимость ряда (4), в случае применения алгоритма (6):

при $0,1 \leq x \leq 0,55$

$$N \leq 25 + 300(x - 0,1)^2, \quad (7)$$

при $0,55 \leq x \leq 0,97$

$$N \leq 2,7(x - 0,35)^2 \exp(-0,5(1-x)). \quad (8)$$

$$C(\theta) = S \left[(1-\varphi) \frac{A_1(\theta) N_1^{N_1} e^{\left(\frac{-N_1 a \theta}{k}\right)}}{\Gamma(N_1)} + \varphi \frac{A_2(\theta) N_2^{N_2} e^{(-N_2 a \theta)}}{\Gamma(N_2)} \right], \quad (9)$$

где $S = (\varphi + (1-\varphi)k)^2 / (\varphi + (\tau - \varphi)k^2)$;
 $a = (\varphi + (1-\varphi)k^2) / (\varphi + (1-\varphi)k)$; $A_1(\theta) = (a\theta/k)^{N_1-1}$;
 $A_2(\theta) = (a\theta)^{N_2-1}$; $k = \tau_1/\tau_2$; $\varphi = Q_1/Q$; τ_1 и τ_2 – среднее время пребывания в соответствующих частях потока; N_1 и N_2 – числа секций в каждой ветви потока; Q – общий поток; Γ – гамма-функция. Параметрами модели являются числа секций N_1 , N_2 и относительный расход первого потока φ . Секционные многопоточные модели большей размерности формируются аналогично с учетом соотношения между передаточной функцией системы $W_c(s)$ и передаточными функциями отдельных потоков $W_i(s)$:

$$W_c(s) = \sum_{i=1}^{N_{\Pi}} \lambda_i W_i(s),$$

где λ_i – относительные доли объемных расходов потоков, s – комплексная переменная, N_{Π} – число потоков в системе.

Функции интенсивности [8] могут давать значительно большее отклонение экспериментальных кривых от расчетных, чем S -кривые, что дает возможность идентифицировать неоднородности в потоке. Однако анализ показал, что в случае дискрет-

Отметим, что в области $x \leq 0,1$ модель ЯМОП практически совпадает с ячеечной моделью, а при $x \geq 0,97$ обратный поток превышает основной более чем в 30 раз, что для рассматриваемых устройств маловероятно.

Уравнения двухпоточной секционной модели в относительных координатах аналогичны (1)...(3) при $f = 0$. В настоящей работе при импульсном возмущении на входе рассчитывалось их решение для случая равномерной подачи трассера по ширине потока:

ных замеров спектров отклика при построении функций интенсивности достаточно быстро накапливается ошибка. Для уменьшения влияния накопления ошибки предлагается нелинейная сплайн-интерполяция экспериментальных спектров. В этом случае экспериментальная $L(\theta)$ – функция интенсивности рассчиты-

вается как $L(\theta) = -d \left[\ln(1 - F^*(\theta)) \right] / d\theta$,

где интегральная функция распределения времени пребывания частиц материала $F^*(\theta)$ рассчитывается по сплайн-интерполяции экспериментальных данных. В случае отсутствия специальных опытов по воспроизводимости F -критерий определялся как:

$$F = (0,03 \cdot C_{\max})^2 / S_{\text{ост}},$$

где C_{\max} – максимум экспериментальной S -кривой, а $S_{\text{ост}}$ – остаточная дисперсия для соответствующей модели. Аналогично для функции интенсивности оценкой относительной накопленной ошибки служила величина:

$$L_{\Delta} = 0,03 / (1 - F^*(\theta)).$$

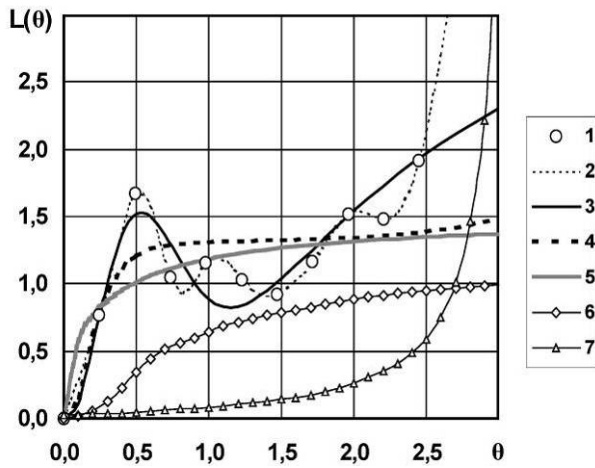


Рис. 1

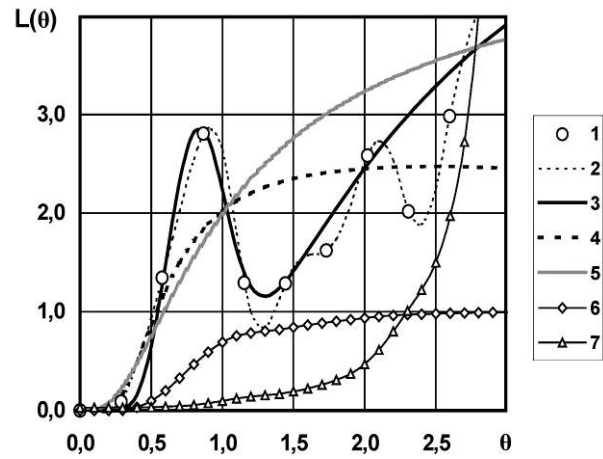


Рис. 2

На рис. 1 и 2 представлены экспериментальные и расчетные кривые L -функций, характеризующие структуру потоков в камере ГВК с диаметром выхлопа $\bar{d}_T = 0,5$ и высотой переливного порога на выхлопе $\bar{h} = h/D = 0,03$ [7]. Входная весовая концентрация материала рассчитывалась как $Z_{\text{вх}} = G_M/G_T$, где G_M и G_T – соответственно входные расходы материала и газа. Данные на рис. 1 получены при концентрации $Z_{\text{вх}} = 3,1 \cdot 10^{-2}$; на рис. 2 – при $Z_{\text{вх}} = 6,2 \cdot 10^{-2}$. Временем пребывания в циклонной части аппарата пренебрегали ввиду его малости. Другие характеристики экспериментальной установки приведены в работе [7]. На рис. 1 соответствующие кривые обозначают: 1,2 – экспериментальная $L(\theta)$ – функция интенсивности в точках замеров и между ними; 3 – $L(\theta)$ – функция двухпоточной секционной модели, $F = 3,21$; 4 – $L(\theta)$ для модели ЯМОП, $F = 9,6$; 5 – $L(\theta)$ для стандартной ячеечной модели, $F = 14,26$; 6 – экспериментальная функция распределения времени пребывания $F^*(\theta)$; 7 – L_Δ – относительная ошибка экспериментальной функции интенсивности. Обозначения кривых на рис. 2 соответствуют обозначениям на рис. 1, отличаются лишь цифры F -статистики: 3 – двухпоточная секционная модель, $F = 1,31$; 4 – модель ЯМОП, $F = 21,4$; 5 – ячеечная модель, $F = 33,0$.

В результате применения процедуры идентификации на шаге $k = 3$ адекватной оказалась двухпоточная секционная модель (табличное значение критерия $F_T = 4,7$). Однопараметрическая ячеечная модель и двухпараметрическая ЯМОП не описывают основные особенности рельефа L -функции. Таким образом, в обоих случаях происходит разделение течения на два потока с разными характеристиками. Как видно из рис. 1, 2, характер структуры потоков при различных входных концентрациях принципиально не меняется.

При увеличении высоты переливного порога до величины $\bar{h} = 0,15$ характер течения существенно меняется. Для этой конструкции адекватна ячеечная модель при $N = 1,25$, то есть практически реализуется режим идеального смешения, при этом исчезает явление разделения потоков и максимально возрастает среднее время пребывания. При высоте перелива $\bar{h} = 0,075$ также адекватна ячеечная модель ($N = 1,67$) и нет разделения потоков. Характерно, что в конструкциях УВП типа MVS [3] произошло значительное увеличение высоты перелива, по сравнению с первыми польскими патентами [2], что практически привело к появлению шпинделя довольно больших относительных размеров. Для вихревой камеры, применяемой в многофункциональном аппарате, достаточна величина $\bar{h} = 0,075$, при этом

устраняется динамическая неоднородность потоков.

ВЫВОДЫ

1. Предложена методика идентификации неоднородных структур в вихревых слоях газозвеси.

2. Установлены закономерности структуры потоков при различных значениях входной концентрации и высоты перелива в вихревых устройствах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сажин Б.С., Сажин В.Б. Научные основы техники сушки. – М.: Наука, 1997.

2. Павлов Г.Г. Аэродинамические основы безверетенных способов прядения. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982.

3. Basal G., Oxenham W. Vortex Spun Yarns vs. Air-Jet Spun Yarn//AUTEX Research Journal. – V.3, № 3, 2003. P.96...101.

4. Кафаров В.В., Глебов М.Б. Математическое моделирование основных процессов химических производств. – М.: Высшая школа, 1991.

5. Белоусов А.С., Сажин Б.С. // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2005, №2. С.96...100.

6. Белоусов А.С., Кочетов Л.М., Сажин Б.С., Милованов А.В. Гидродинамическая структура потоков в вихревой сушильной камере. В кн.: Успехи в химии и химической технологии. – Т. XVII, №13(38), 2003. С.94...97.

7. Сажин Б.С., Акулич А.В., Лукачевский Б.П. и др. Исследование гидродинамики многофункционального вихревого аппарата. Деп. в ВИНТИ, 1986, №6883–В86.

8. Кафаров В.В., Дорохов И.Н. Системный анализ процессов химической технологии. – М.: Наука, 1976.

Рекомендована кафедрой процессов, аппаратов химической технологии и безопасности жизнедеятельности. Поступила 16.06.07.
