

УДК 66.011

ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ ПЕРЕМЕШИВАНИЕ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ В ВИХРЕВОМ ПОТОКЕ

А.С.БЕЛОУСОВ, Б.С.САЖИН, Алексей В.ЛОПАКОВ, Александр В.ЛОПАКОВ

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

В работе развивается подход к исследованию закрученных потоков аэровзвесей в различных вихревых устройствах с единых позиций гидромеханики внутренних течений.

Аппараты и устройства с вихревыми потоками (циклоны, аппараты со встречными закрученными потоками (ВЗП), вихревые камеры, устройства вихревого прядения (УВП)) в последние годы активно используются для решения ряда технологических задач в текстильной и смежных с ней отраслях промышленности [1...4].

В циклонах преобладает винтовое движение потока, а в вихревых камерах и части конструкций аппаратов ВЗП – поперечное вращение устойчивого стационарного вихря дисперсной фазы по отношению к оси устройства.

В последние годы получили развитие и стали занимать определенную долю рынка западных стран прядильные машины с воздушно-вихревым способом формирования пряжи [3], [4]. В них также присутствуют два аналогичных вышеуказанным способа аэродинамического формирования пряжи: винтовой и поперечно-круговой способ (стационарного вихря) [5].

В связи с появлением в 1999-2003 гг. прядильных машин серии MVS с производительностью до 400 м/мин вихревым способом формирования пряжи стало уделяться гораздо более заметное внимание [3], [4].

В большинстве работ по исследованию двухфазных систем обычно описывают качественную картину движения аэровзвеси,

а при обобщении экспериментов в таких устройствах используют интегральные характеристики, в частности, критерии подобия [1], [2].

Для анализа процесса течения аэровзвеси рассмотрим уравнения движения частицы материала под влиянием вихревого потока газа.

При соотношении плотности материала к плотности газа $\rho_m/\rho \geq 1000$ в уравнениях движения можно учитывать только силы аэродинамического сопротивления и веса частицы [6]. Приведем уравнения движения к безразмерному виду, выбрав в качестве масштаба скорости безразмерную скорость в плане аппарата V_0 , масштаба размера – радиус аппарата R , масштаба времени – $T_A = R/V_0$.

В этом случае уравнения движения частицы можно преобразовать к виду:

$$St \frac{dW_z}{d\theta} = Bf_1 (V_z - W_z) - W_B, \quad (1)$$

$$St \frac{dW_r}{d\theta} = Bf_1 (V_r - W_r) + St \frac{W_\varphi^2}{r}, \quad (2)$$

$$St \frac{dW_\varphi}{d\theta} = Bf_1 (V_\varphi - W_\varphi) + St \frac{W_\varphi W_r}{r}. \quad (3)$$

Здесь W и V – безразмерные скорости частицы и газа; (z, r, φ) – цилиндрические координаты; θ – безразмерное время; St – число Стокса $St = \tau/T_A$; τ – время релаксации частицы $\tau = \rho_m d^2 / (18\mu)$; W_B – без-

размерная скорость витания; $B = C_d/C_d^{St}$ – относительный коэффициент сопротивления частицы; C_d^{St} – коэффициент сопротивления частицы, рассчитанный по закону Стокса $C_d^{St} = 24/Re_d$; ρ_m, d – плотность и диаметр частиц; Re_d – число Рейнольдса частицы.

Анализ системы (1)...(3) дал возможность выявить условия применения критериального подхода. При $B=1$, $W_B = const$ и малых значениях числа Стокса система допускает структурное упрощение. В этом случае решения исходной системы приближенно описываются решением так называемой вырожденной системы, получающейся приравниванием нулю производной в левой части уравнений (1)...(3). Это движение частиц будет обладать свойством подобия траекторий (при условии подобия полей скоростей газа, которое в вихревых аппаратах приближенно выполняется [7]).

Проверка условий $B=1$, $St \leq 1$ и анализ движения частиц выполнен нами с помощью численного решения полной системы (1)...(3). Поскольку для тонкодисперсных частиц у системы появляются свойства жесткости, расчет выполнялся с помощью неявной разностной схемы Кранка–Николсона.

Для поля скоростей газа использовались результаты, полученные в [7].

Т а б л и ц а 1

d, мкм	θ_c	θ_A	\bar{Re}_d
100	0,74	5,25	9,1
50	1,79	5,67	3,8
30	4,73	6,41	1,1

В табл. 1 представлены результаты расчетов движения в винтовом потоке частиц трех различных размеров с плотностью $\rho_m = 2000 \text{ кг/м}^3$. Рассчитывалось время сепарации частиц на стенку θ_c , общее время пребывания в аппарате θ_A , а также среднеинтегральное вдоль всей траектории движения относительное число Рейнольдса частицы \bar{Re}_d .

Как видно из результатов расчетов, время сепарации частиц на стенку (для $d \geq 50$ мкм) намного меньше, чем время движения частиц в пристеночной зоне.

После первого столкновения со стенкой частицы движутся скачкообразно в достаточно тонком пристеночном слое по винтовым траекториям.

При уменьшении размеров частиц время пребывания увеличивается.

Оценка критериев структурного упрощения проводилась для частиц так называемого критического диаметра d_* : минимального диаметра, при котором еще возможен унос частиц потока с газом.

Для аппарата с $R=0,05$ м получено $d_*=10$ мкм, для $R=1,0$ м $d_*=25$ мкм. При $d \geq d_*$ условия структурного упрощения не выполняются.

Эти ограничения подтверждаются данными табл. 1 (при $d \geq 50$ не выполняются условия применения закона Стокса для \bar{Re}_d).

Таким образом, критериальное обобщение данных по движению дисперсной фазы будет достаточно точным только в диапазоне $0 \leq d \leq 50$ мкм.

Для исследования гидродинамики течений с более крупными частицами целесообразно использовать применяемый в исследовании химических реакторов метод динамических возмущений на входе в аппарат. Такой подход дает возможность получить информацию не только о среднем времени пребывания, но и выявить степень перемешивания частиц материала внутри устройства, оценить структуру потоков в аппарате.

Для обобщения данных по винтовому двухфазному течению нами были обработаны эксперименты, проведенные в [8]. Кривые отклика $C(t)$ на импульсное возмущение по дисперсной фазе обрабатывались по методу моментов.

Начальный момент первого порядка (\bar{t}) и центральные моменты k-го порядка (M_k), позволяют определить среднее время пребывания и степень перемешивания частиц для различных моделей структуры

ПОТОКОВ:

$$\bar{t} = \int_0^{\infty} tC(t)dt, \quad (4)$$

$$M_k = \int_0^{\infty} (t - \bar{t})^k C(t)dt. \quad (5)$$

Интегралы (4)...(5) рассчитывались численным методом, уравнения связи для определения степени перемешивания в диффузионной модели по моментам приведены в [9].

Для ячеечной модели аналогичным параметром является число ячеек: $N_2 = 1/M_2$; $N_3 = 4M_2^3/M_3^2$. При малом числе Пекле (или малом числе ячеек) для идентификации использовался более точный метод нелинейного оценивания параметра $N_{\text{мнк}}$, предложенный в [9].

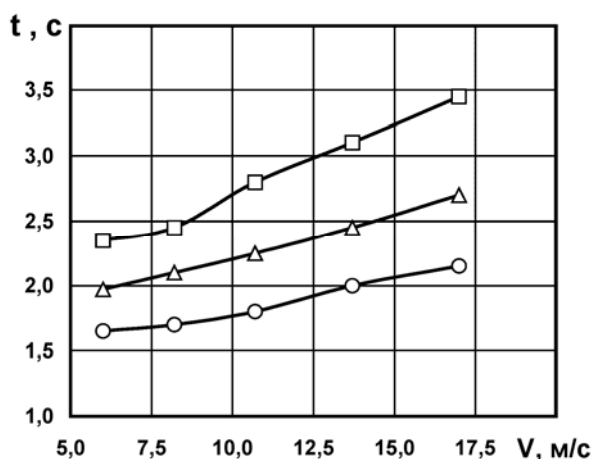


Рис. 1

На рис.1 представлены результаты расчетов зависимости среднего времени пребывания в винтовом потоке циклона от скорости во входном патрубке. Диаметр циклона $D=0,125$ м; диаметр частиц $d=141$ мкм; плотность $\rho_m=1700$ кг/м³; высота аппарата: O – $H=0,5$ м; Δ – $H=1,0$ м; □ – $H=1,5$ м.

Как видно из приведенных данных, увеличение скорости потока, которое в обычных трубных течениях вызывает уменьшение времени пребывания, в случае винтового потока увеличивает \bar{t} , причем это увеличение пропорционально высоте

аппарата.

Для более крупных частиц ($d=211$ мкм) время пребывания при всех режимах меньше на 30...40 %, что согласуется с результатами расчетов модели (1)...(3).

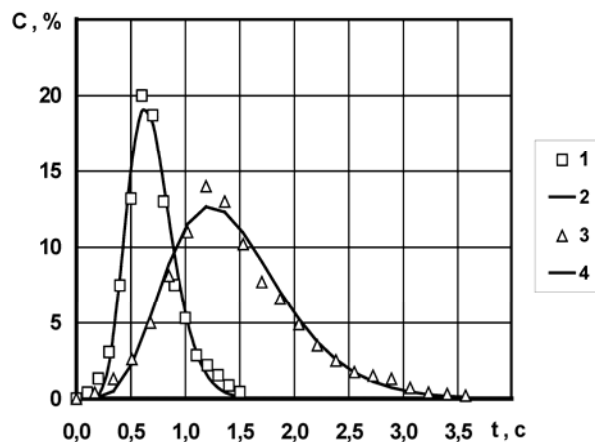


Рис. 2

На рис. 2 представлены экспериментальные (1,3) и расчетные (2,4) кривые распределения времени пребывания (за вычетом времени чистого запаздывания) частиц, характеризующие их перемешивание для аппаратов с различной высотой: □ – $H = 0,5$ м; $N_{\text{мнк}} = 50,3$; Δ – $H = 1,5$ м; $N_{\text{мнк}} = 21,3$.

Как видно из этих данных, с увеличением относительной длины устройства степень перемешивания частиц (обратно пропорциональная $N_{\text{мнк}}$ и критерию Пекле Pe) возрастает, однако значения критерия Pe достаточно велики.

С увеличением длины, как и следовало ожидать, возрастает среднее время пребывания частиц.

Интересно, что у ячеечной модели остаточная дисперсия для трех конструкций аппаратов в 5...6 раз меньше, чем у диффузионной модели. Таким образом, ячеечная модель более адекватно описывает структуру винтового потока.

Для анализа систем с поперечно-круговым вращением частиц нами было выполнено исследование на лабораторной модели вихревой камеры (ВК): $D=0,12$ м; диаметр частиц $d=2$ мм; плотность $\rho_m=900$ кг/м³.

Среднее время пребывания материала (\bar{t}) в ВК увеличивается по сравнению с винтовым потоком в десятки раз. Значение \bar{t} возрастает при увеличении расхода газа через камеру V_0 , однако по достижении некоторого критического значения V_* становится постоянным.

Т а б л и ц а 2

\bar{V}	1,0	1,14	1,48	1,81
N_2	1,57	1,70	3,71	4,36
$N_{\text{мнк}}$	1,08	1,40	3,20	4,00

В табл. 2 приведены значения параметра перемешивания, определенные для ВК импульсным методом при различных значениях $\bar{V} = V_0/V_*$. Значения N , определенные по методу моментов, при малых N имеют неудовлетворительную остаточную дисперсию, то есть в этой области эффективнее применение метода нелинейного оценивания.

Как следует из данных табл. 2, степень перемешивания в системах с поперечно-круговым вращением частиц при всех режимах существенно выше, чем в винтовом потоке.

В Ы В О Д Ы

1. Предложена модель и выполнен анализ движения частиц в вихревых устройствах.
2. Установлены закономерности времени пребывания и степени перемешивания в

устройствах с различной организацией потоков. Для теплообменных процессов больше возможностей имеют устройства с поперечно-круговым вращением; для вихревого прядения более целесообразно применение винтового потока небольшой длины, обеспечивающего последовательную обработку волокон.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Гупта А., Лилли Д., Сайред Н. Закрученные потоки / Пер. с англ. – М.: Мир, 1987.
2. Сажин Б.С., Тюрин М.П. Энергосберегающие процессы и аппараты текстильных и химических предприятий. – М., 2001.
3. Basal G., Oxenham W. // Autex Research Journal. – 2003, v.3, № 3. P.96...101.
4. Oxenham W. // Journal of Textile and Apparel Technology and Management. –V.2, №2, 2002. P.1...10.
5. Павлов Г.Г. Аэродинамические основы безверетенных способов прядения. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982.
6. Бусройд Р. Течение газа со взвешенными частицами. – М.: Мир, 1975.
7. Белоусов А.С., Сажин Б.С., Лопанов А.В. и др. Численный расчет радиальных течений в пылеуловителе со встречными закрученными потоками / В кн.: Успехи в химии и химической технологии. – М., 2005, т.19, №10 (58). С.74...77.
8. Kang S.K., Kwon T.W., Kim S.D. // Powder Technology. –V.58, № 3, 1989. P.211...220.
9. Белоусов А.С., Сажин Б.С. // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2005, №2. С.96...100.

Рекомендована кафедрой процессов, аппаратов химической технологии и безопасности жизнедеятельности. Поступила 02.06.06.