

УДК 66.011

## **КРИЗИСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ВИНТОВЫХ ПОТОКАХ ГАЗОВЗВЕСЕЙ**

*А.С. БЕЛОУСОВ, Б.С. САЖИН, А. В. ЛОПАКОВ*

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

Возможность совершенствования конструкций устройств с закрученными потоками в значительной степени определяется особенностями аэромеханики течения газозвеси в этих устройствах. Особый практический интерес представляет возможность исследования с единых позиций течений в устройствах разного масштаба и технического назначения.

Рассмотрим течение газозвеси по винтовой схеме, а именно закрученное течение газа вместе с материалом в периферийной зоне, а затем выход газа и материала в приосевой зоне в противоположные стороны. Такая схема течения реали-

зуется в возвратно-поточных циклонах [1], в технологических вихревых аппаратах, например, для сушки волокнообразующих полимеров [2], в устройствах вихревого прядения [3], [4]. Движение ассоциации дисперсных, или волокнистых частиц при этой схеме происходит в основном у стенки устройства, буквально по линии винта, причем по мере приближения к выходу (и к оси течения) концентрация материала в пристеночной зоне увеличивается.

Расчет технологических характеристик аппаратов циклонного типа достаточно хорошо разработан и обычно проводится

на основе теории приближенного моделирования [5], [6].

Методика основана на обычных для практики центробежного разделения логарифмически-нормальных (ЛНР) распределениях по размерам обрабатываемых частиц материала, а также на ЛНР-распределении эффективности аппарата от диаметра улавливаемых частиц. В этом случае распределение частиц материала по размерам описывается двумя параметрами:  $d_{50}$  – медианный диаметр частиц (мкм);  $\lg \sigma$  – стандартное отклонение функции распределения.

Тогда общую эффективность улавливания  $E$  можно рассчитать по уравнениям:

$$E = 100F_0(x) = 100F_0\left(\frac{\lg d - \lg d_{\eta=50}}{\sqrt{\lg^2 \sigma + \lg^2 \sigma_{\eta}}}\right), \quad (1)$$

$$F_0(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-Z^2/2} dZ, \quad (2)$$

где  $d_{\eta=50}$  – диаметр частиц, осаждаемых с вероятностью 50%;  $\lg \sigma_{\eta}$  – стандартное отклонение в функции распределения парциальных коэффициентов улавливания;  $F_0$  – интегральная функция нормального распределения.

Для циклонов, испытанных при стандартных условиях, величина  $d_{\eta=50}^c$  пересчитывается на рабочие условия  $d_{\eta=50}$  по критерию Стокса; параметр  $\sigma_{\eta}$  по данным [5] может быть принят  $\sigma_{\eta} = 1,8$ .

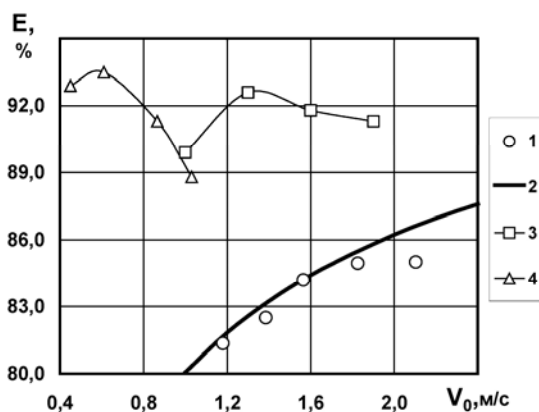


Рис. 1

В соответствии с данной методикой общая эффективность улавливания  $E$  монотонно возрастает с увеличением скорости газа  $V_0$  в цилиндрическом сечении аппарата (расчетная кривая 2 на рис. 1). Расчет выполнен по уравнениям (1), (2) для циклона СКЦН-34 со значениями характеристик, полученными в результате испытаний при стандартных условиях [6].

Между тем, исследования аэродинамики винтового течения в узле выгрузки материала [7] показывают, что здесь возникают сложные структурные образования, которые могут быть не автомодельными и соответственно оказывать существенное влияние на эффективность улавливания при изменении режима течения. Такие явления действительно наблюдаются при определенных значениях режимных и конструктивных параметров.

На рис. 1 представлены расчетные и экспериментальные данные по зависимости общей эффективности улавливания от скорости  $V_0$  для трех конструктивных вариантов циклонов, отличающихся относительной длиной цилиндрической  $\bar{H}_{\text{ц}} = h_{\text{ц}}/D$  и конической  $\bar{H}_{\text{к}} = h_{\text{к}}/D$  частей корпуса (здесь  $D$  – диаметр аппарата).

На рис. 1 обозначено: кривые 1 и 2 – эксперимент и расчет, циклон СКЦН-34,  $\bar{H}_{\text{ц}} = 0,5$ ,  $\bar{H}_{\text{к}} = 2,1$ ; кривая 3 – □ – вариант циклона СЦН-40 с удлиненной цилиндрической частью  $\bar{H}_{\text{ц}} = 2,2$ ,  $\bar{H}_{\text{к}} = 1,0$  [6]; кривая 4 – Δ – технологический циклон С125 с длинной цилиндрической частью  $\bar{H}_{\text{ц}} = 9,6$ ,  $\bar{H}_{\text{к}} = 2,4$  [8].

Как видно из данных, представленных на рис.1, эффективность циклона при высоких скоростях  $V_0$  может выходить на режим насыщения и даже уменьшаться. При увеличении скорости  $V_0$  до некоторого критического значения  $V_0^*$  эффективность перестает монотонно возрастать в соответствии с теорией (1), (2), а при удлиненной величине цилиндрической части начинает уменьшаться.

Снижение эффективности при повышенных скоростях можно объяснить вто-

ричным уносом частиц из газодисперсного пограничного слоя, который, в свою очередь, может вызываться усилением приосевой турбулентности, отскоком частиц от стенки, развитием возвратного вихревого течения. Поскольку при таких явлениях может изменяться распределение времени пребывания (РВП) материала в аппарате, то представляет интерес рассмотреть характеристики винтового течения газозвеси с точки зрения принятого в химической технологии подхода, основанного на типовых моделях структуры потоков [8].

Для исследования структуры винтового потока была проведена идентификация однопараметрических и двухпараметрических моделей путем обработки кривых отклика  $C(t)$  на импульсное возмущение по дисперсной фазе [8], [9]. При обработке исследовались следующие однопараметрические модели структуры потоков: диффузионная модель с неограниченными, полуограниченными и конечными условиями на торцах аппарата (модели М1, М2 и М3), а также ячеечная модель (М4).

Уравнения моделей и уравнения связи для определения степени перемешивания (числа Пекле  $Pe$ ) в диффузионной модели и числа ячеек  $N$  ячеечной модели приведены в [9], [10]. Среднее время пребывания  $\bar{t}$  и центральные моменты второго и третьего порядков ( $M_k$ ) рассчитывались численно по методу Симпсона и соответствующим уравнениям:

$$\bar{t} = \int_0^{\infty} tC(t)dt, \quad (3)$$

$$M_k = \int_0^{\infty} (t - \bar{t})^k C(t)dt. \quad (4)$$

Исследовались также более сложные (комбинированные) модели: циркуляционная модель с одним возвратным контуром, секционная модель с обратным перемешиванием между ячейками, двухпоточная секционная модель.

Расчеты были выполнены для аппарата с диаметром  $D = 0,125$  м, с высотой, варьируемой в пределах:  $H = 0,55 - 1,5$  м.

Скорость в аппарате изменялась в диапазоне  $V_0 = 0,45; 0,62; 1,03; 1,28$  м/с; исследовался материал с диаметром частиц 141,178 и 211 мкм.

Как установлено в результате расчетов, при  $V_0 \leq 0,5$  м/с для всех размеров частиц и конструкций аппарата адекватной оказалась ячеечная модель. Однако при повышенных скоростях никакие однопараметрические модели не описывают РВП.

Анализ показал, что при повышении скорости более некоторого критического значения  $V_m^*$  изменяется модель структуры течения материала, поток распадается на две ветви с различными параметрами.

Эти режимы описывает двухпоточная секционная модель, уравнения которой в относительных координатах имеют вид:

первая секция первого потока:

$$\frac{dC_{1,1}}{d\theta} = N\lambda_1(1 - C_{1,1}); \quad (5)$$

все остальные секции первого потока:

$$\frac{dC_{1,i}}{d\theta} = N\lambda_1(C_{1,i-1} - C_{1,i}); \quad (6)$$

первая секция второго потока:

$$\frac{dC_{2,1}}{d\theta} = N\lambda_2(1 - C_{2,1}); \quad (7)$$

все остальные секции второго потока:

$$\frac{dC_{2,i}}{d\theta} = N\lambda_2(C_{2,i-1} - C_{2,i}); \quad (8)$$

на выходе модели

$$C(\theta) = \lambda_1 C_{1,n_1}(\theta) + \lambda_2 C_{2,n_2}(\theta), \quad (9)$$

где  $N = n_1 + n_2$ ;  $n_1, n_2$  – число секций в первом и втором потоке;  $\lambda_1, \lambda_2$  – доли общего расхода, поступающие в первый и второй поток;  $C_{j,i}$  – относительная концентрация материала в  $j$ -м потоке и  $i$ -й секции.

ции;  $\theta = t/\bar{t}$  – относительное время пребывания.

Обозначим  $q = \lambda_1$ , тогда  $\lambda_2 = (1 - q)$  и, при одинаковом размере секций, модель включает три параметра:  $n_1, n_2$  и  $q$ .

Для аппарата диаметром  $D = 0,125$  м и  $\bar{N}_c = 9,6$ ,  $\bar{N}_k = 2,4$ ,  $V_0 = 1,28$  м/с параметры  $n_1, n_2$  и  $q$  были найдены методом нелинейного оценивания [10].

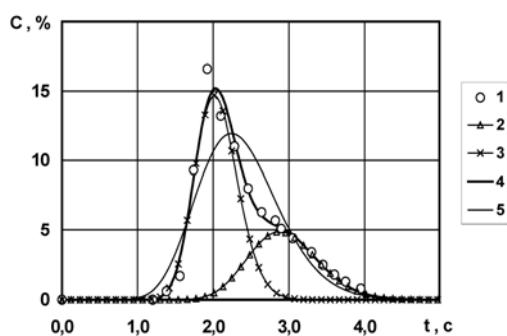


Рис. 2

На рис. 2 представлены экспериментальные данные (кривая 1), а также расчетные кривые РВП частиц материала двухпоточной секционной модели (2...4) и расчетная кривая РВП обычной ячеечной модели (5): 2 –Δ– кривая  $C_{1,n_1}$  при  $\lambda_1 = 0,35$ ,  $n_1 = 41$ ; 3 –x– кривая  $C_{2,n_2}$  при  $\lambda_2 = 0,65$ ,  $n_2 = 53$ ; 4 – кривая  $C(\theta)$ , рассчитанная по (9); 5 – кривая  $C(\theta)$  ячеечной модели при оптимальном  $N = 19,06$ .

Как видно из результатов, представленных на рис. 2, поток 1 имеет большее время пребывания и дисперсию РВП, чем второй поток. Такими характеристиками должны обладать частицы, вынесенные из пограничного слоя, но затем вернувшиеся в основной поток и уловленные.

Процесс распада потока на две ветви начинается при значениях  $V_m^*$ , близких к точке экстремума кривой 4 на рис. 1, что подтверждает согласованный характер этих явлений.

Принимая во внимание этот факт, уравнение для критической скорости  $V_m^*$  было получено на основе данных по пыле-

улавливанию [1], [5], [8]:

$$V_m^* = 1,6 \cdot 10^3 \left( \frac{\rho_p \mu}{\rho_g^2} \right) \frac{(\bar{N}_c)^{-0,3} D^{0,2} \sqrt{S}}{(S-1)}, \quad (10)$$

где  $\rho_p, \rho_g$  – плотность материала и газа;  $S$  – параметр крутки устройства [11].

Как следует из полученных результатов, для пылеулавливающих циклонов оптимальная скорость должна быть не более критической  $V_m^*$ . Для устройств вихревого прядения, имеющих высокие параметры крутки, необходимо минимизировать цилиндрическую часть устройства.

## ВЫВОДЫ

1. Выполнен анализ кризисных явлений в винтовых потоках газовзвесей.
2. Установлены закономерности изменения структуры потоков при различных значениях параметров вихревых устройств. Предложено уравнение для расчета критической скорости.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гунта А., Лилли Д., Сайред Н. Закрученные потоки / Пер. с англ. – М.: Мир, 1987.
2. Сажин Б.С., Сажин В.Б. Научные основы техники сушки. – М.: Наука, 1997.
3. Павлов Г.Г. Аэродинамические основы безверетенных способов прядения. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982.
4. Basal G., Oxenham W. Vortex Spun Yarns vs. Air-jet Spun Yarn//AUTEX Research Journal. –V.3, № 3, 2003. P. 96...101.
5. Коузов П.А., Мальгин А.Д., Скрябин Г.М. Очистка от пыли газов и воздуха в химической промышленности. – Л.: Химия, 1982.
6. Чекалов Л.В., Карпухович Д.Т., Смирнов М.Е. и др. Экотехника / Под ред. Чекалова Л.В. – Ярославль: Русь, 2004.
7. Obermair S., Woisetschläger J., Staudinger G. Investigation of the flow pattern in different dust outlet geometries of a gas cyclone by laser Doppler anemometry//Powder Technology. – V.138, № 2-3, 2003. P.239...251.
8. Kang S.K., Kwon T.W., Kim S.D. Hydrodynamic Characteristics of Cyclone Reactors//Powder Technology. –V.58, № 3, 1989. P. 211...220.
9. Кафаров В.В., Глебов М.Б. Математическое моделирование основных процессов химических производств. – М.: Высшая школа, 1991.

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

11. Белоусов А.С., Сажин Б.С. // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2005, №3. С.122...125.

Рекомендована кафедрой процессов и аппаратов химической технологии и безопасности жизнедеятельности. Поступила 29.01.07.

---