

УДК 66.011

РАДИАЛЬНЫЙ СТОК В ЦЕНТРОБЕЖНЫХ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЯХ

А.С.БЕЛОУСОВ, Б.С.САЖИН

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

Эффективность обработки многофазных сред в вихревых аппаратах и устройствах в значительной степени определяется центробежной силой и силой, обусловленной радиальным стоком газа. Под радиальным стоком обычно понимают течение среды по радиусу, перпендикулярному оси вращения закрученного потока [1]. Влияние радиального стока определяет характеристики отделения волокнистых частиц в центробежных пылеуловителях [2], а также смешение сред в аппаратах с закрученными потоками, предназначенных для утилизации высоковлажных газовых выбросов теплоиспользующих устройств текстильной промышленности [3].

Близкий характер к потокам в центробежных пылеуловителях имеют течения в устройствах безверетенного прядения как на стадии транспортирования, так и при кольцевом вводе воздуха в прядильную камеру [4].

Наиболее сложными для исследования являются устройства со средним отношением длины L к диаметру D ($L/D=0,5\div 3$). Течение воздуха в этой группе устройств имеет ярко выраженный трехмерный характер и к ним не применимы известные гидродинамические модели плоских или трубных потоков [1].

Однако и экспериментальное исследование полей в этой группе устройств затруднено вследствие сложности измерения радиальной скорости V_r .

Величина V_r на порядок меньше значений вращательной V_ϕ и осевой V_z скоростей, поэтому даже возможности лазерных методов для ее измерения ограничены, особенно в каналах прядильных устройств, имеющих небольшие размеры.

В данной работе предлагается исследо-

вать закрученные течения газа в рассмотренной группе устройств с единых позиций, несмотря на существенные различия в размерах и скоростях потоков. Основанием для этого является приближенная автотурбулентность закрученных турбулентных течений [1].

В этом случае измерения полей удобнее проводить на больших аппаратах, а для обобщения данных использовать уравнения Рейнольдса совместно с понятием турбулентного числа Рейнольдса [1]:

$$R_T = VL / \nu_T,$$

где V – характерная скорость, а ν_T – эффективная турбулентная вязкость.

При $R_T = \text{const}$ безразмерные уравнения Рейнольдса обладают свойством автотурбулентности, что позволяет описывать как промышленные пылеуловители, так и малые устройства безверетенного прядения.

В работах [5] и [6] для измерения полей скоростей была применена специально сконструированная лазерная система, которая позволила замерять структуру малых течений в различных областях циклона.

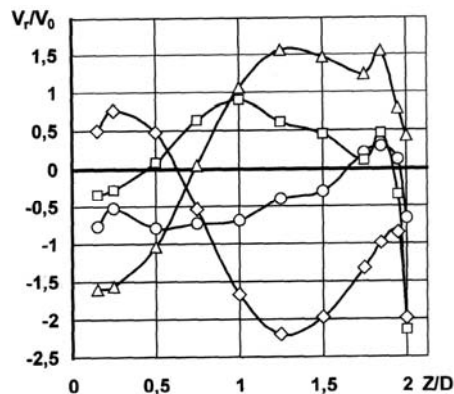


Рис. 1

Нами была проведена обработка этих данных, результаты которой представлены на рис.1. Рассматривается основная рабочая зона между выгрузным отверстием аппарата ($\bar{Z} = Z/D = 0$) и нижней частью выхлопной трубы ($\bar{Z} = 2$). Воздух подавался через тангенциальный завихритель с параметром крутки [7] $S=4,63$ и выходил через выхлопную трубу с относительным диаметром $\bar{d}_T = 0,375$.

Распределения радиальной скорости (нормированной на среднерасходную по сечению аппарата скорость V_0) при радиусе $\bar{r} = r/R = 0,4$ приведены на рис.1 в зависимости от высоты рабочей зоны \bar{Z} для четырех различных углов φ . Угол φ отсчитывался относительно уровня тангенциального входа ($\circ - \varphi = 0^\circ$; $\Delta - \varphi = 90^\circ$; $\square - \varphi = 180^\circ$; $\diamond - \varphi = 270^\circ$).

Выполним оценку радиального стока для простой модели равномерного перетекания газа из периферийной зоны в приосевую через цилиндрическую поверхность постоянного радиуса R_0 . Расчет этого радиуса по первому приближению модели идеальной жидкости [8] дает величину $R_0=0,63$. Тогда, принимая для радиальной скорости на участке от оси до R_0 линейный закон распределения, получаем на радиусе $\bar{r} = 0,4$ оценку $V_r/V_0 = -0,2$.

Как видно из рис.1, замеренные значения намного превышают эту величину, кроме этого для всех углов φ радиальная скорость меняет знак по высоте. Анализ данных на рис.1 показывает, что представленные распределения скоростей возможны лишь при смещении оси физического вихря относительно геометрической оси. Смещение оси вихря меняется по высоте аппарата: при $0,1 \leq \bar{Z} \leq 0,4$ ось расположена в четвертом квадранте, а при дальнейшем увеличении высоты последовательно переходит в первый квадрант.

Описанный эффект смещения объясняет получаемые иногда в экспериментах большие значения радиальных скоростей: при замерах по геометрическим радиусам фактически определяются векторы, содер-

жащие, кроме радиальной, еще и часть тангенциальной компоненты.

Таким образом, принципиальные трудности при исследовании радиального стока путем измерений обуславливают необходимость поиска других методов исследования полей скоростей.

Ниже предложена приближенная теория трехмерных осесимметричных течений газа для рассмотренной группы аппаратов, в определенной мере решающая указанную проблему.

Модель течения газа в аппарате получена на основе уравнений Рейнольдса в цилиндрической системе координат (z, r, φ) . Уравнения замкнуты с помощью гипотезы векторной турбулентной вязкости $\mu_t = (\mu_0, \mu_{r\varphi})$, учитывающей анизотропный характер турбулентности во вращающихся потоках.

По аналогии с корреляцией П. Брэдшоу принято $\mu_{r,\varphi} = \mu_0 / \sigma_s$, где σ_s – интегральный параметр анизотропии, зависящий от эффективной степени закрутки в ядре потока.

Введем функцию тока ψ :

$$V_z = \frac{1}{r\Gamma} \frac{\partial \psi}{\partial r}, \quad V_r = -\frac{1}{r\Gamma} \frac{\partial \psi}{\partial z}, \quad (1)$$

и циркуляцию $\Gamma = V_\varphi r$.

Тогда из уравнений Рейнольдса получаем математическое описание течения газа в виде системы дифференциальных уравнений в частных производных относительно циркуляции Γ , функции тока ψ и азимутальной компоненты завихренности ω_φ .

Для среды с постоянной плотностью ρ и постоянными коэффициентами μ_0 и $\mu_{r\varphi}$, при допущении $\mu = 0$, эти уравнения получены в виде:

$$\frac{\partial \psi}{\partial r} \frac{\partial \Gamma}{\partial z} - \frac{\partial \psi}{\partial z} \frac{\partial \Gamma}{\partial r} = \mu_{r\varphi} \left(r \frac{\partial^2 \Gamma}{\partial r^2} - \frac{\partial \Gamma}{\partial r} \right) + r \mu_0 \frac{\partial^2 \Gamma}{\partial z^2}, \quad (2)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial \omega_\varphi}{\partial z} \frac{\partial \psi}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z} \frac{\partial \omega_\varphi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial \psi}{\partial z} \omega_\varphi =$$

$$= \mu_0 \left(\frac{\partial^2 \omega_\varphi}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \omega_\varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \omega_\varphi}{\partial r} - \frac{\omega_\varphi}{r^2} \right) + \frac{2\Gamma\rho}{r^3} \frac{\partial \Gamma}{\partial z}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} = -\rho r \omega_\varphi. \quad (4)$$

Предложена гидродинамическая схема течения, состоящая из ядра потока, обладающего свойствами свободной турбулентности, и тонкого пограничного слоя. Модель записана для устройств с двумя завихрителями: осевым, со степенью крутки Φ_{M1} и радиусами кольцевого ввода R_1 и R_2 ; тангенциальным, со степенью крутки Φ_{M2} .

Для турбулентной вязкости в ядре потока получено уравнение

$$\mu_0 = 0,0095\rho \frac{Q}{D} \left[\frac{(1-K)^3 (1+\Phi_{M1}^2)}{H(R_2^2 - R_1^2)^2} + \frac{K^3 (1+\Phi_{M2}^2)}{H(1-R_1^2)^2} \right]^{0,33}, \quad (5)$$

Интегральный параметр анизотропии для аппарата с осевым лопаточным входом

и периферийным тангенциальным вводом рассчитывался по формуле:

$$\sigma_S = \left\{ \sqrt{\overline{D}_T \left[(1-K) \frac{\Phi_{M1}}{2R_2} + K \frac{\Phi_{M2}}{2R_{Bx}} \right]} \right\}^{0,33} \cdot 0,32 + 1, \quad (6)$$

где \overline{R}_{Bx} – средний относительный радиус входа потока в тангенциальный завихритель; $K = Q_2 / (Q_1 + Q_2)$; Q_1 и Q_2 – расходы потоков через осевой и тангенциальный завихрители. Степени крутки завихрителей рассчитывались по соотношениям, полученным в [7].

Числовые значения параметров в уравнениях (5), (6) подбирались исходя из наи-

лучшего соответствия расчетов экспериментальным данным по V_φ и V_z из [9].

Расчет течения в пристеночной области проводился на основе предположения о том, что толщина пограничного слоя δ меньше расстояния Δ между стенкой и ближайшим внутренним узлом сетки.

В этом случае касательные напряжения на стенке записаны в виде

$$\tau_{i\omega} = 0,158 \frac{\rho(1+K_i) \sqrt[3]{\Phi_A}}{\sqrt[4]{Re}} |V| V_{i\omega}, \quad i=Z, \varphi, \quad (7)$$

где V – характерная скорость; $V_{i\omega}$ – компонента скорости на стенке.

Значения параметров в (7) приняты: $K_Z = 10,2$; $\sigma_\omega = K_Z / K_\varphi = 4,15$.

На оси аппарата принимались условия симметрии, на выходе – равенство нулю градиентов вдоль оси.

Разностные уравнения, полученные интегрированием способом, решались методом последовательной нижней релаксации с односторонней аппроксимацией конвективных членов, учитывающей направление потока.

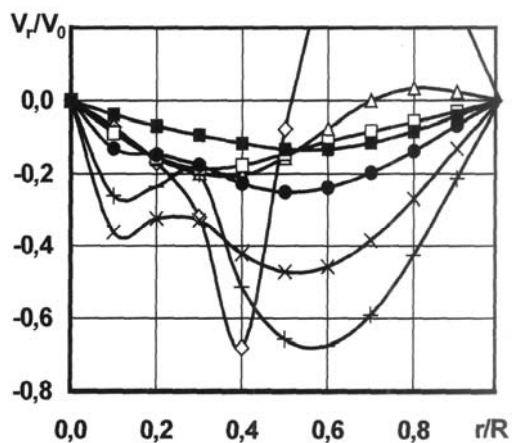


Рис. 2

На рис.2 представлены результаты расчетов распределения безразмерной радиальной скорости в сечениях $\bar{Z} = Z/D$ устройства с двумя входами потоков: + – $\bar{Z}=0,12$; x – $\bar{Z}=0,24$; • – $\bar{Z}=0,37$; ■ – $\bar{Z}=1,08$; □ – $\bar{Z}=1,75$; Δ – $\bar{Z}=1,91$; ◇ – $\bar{Z}=2,02$.

Высота рабочей зоны устройства $\bar{H} = 2,15$; параметры крутки завихрителей $S_1 = 0,6$, $S_2 = 5,2$; диаметр выхлопной трубы $\bar{d}_T = 0,377$; соотношение расходов $K=0,8$.

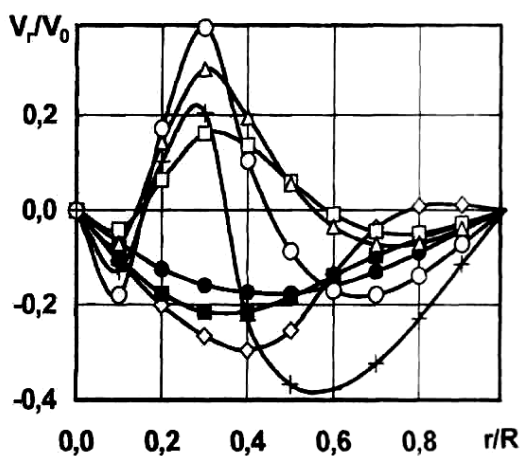


Рис. 3

На рис.3 представлены результаты расчетов радиальной скорости для режима $K=0,62$: + – $\bar{Z}=0,12$; o – $\bar{Z}=0,24$; Δ – $\bar{Z}=0,37$; □ – $\bar{Z}=0,47$; • – $\bar{Z}=1,08$; ■ – $\bar{Z}=1,75$; ◇ – $\bar{Z}=1,91$.

Как видно из этих данных, радиальное течение существенно изменяется по высо-

те устройства и зависит от режима его работы. При преобладании расхода верхнего потока – рис.2 (режим, близкий к течению в циклоне или в устройстве формирования пряжи винтовым потоком [4]) в нижней части аппарата существует сильное радиальное течение, направленное к оси.

В основной части аппарата радиальный сток изменяется плавно и близок к приближенной оценке $V_r/V_0 = -0,2$. Вблизи выхлопного патрубка ($\bar{Z}=2,02$) увеличиваются радиальные токи, направленные к оси.

Наиболее интересно распределение радиальной скорости при характерном для ряда вихревых пылеуловителей соотношении расходов $K = 0,62$ (рис.3). Аналогичный характер имеет течение при кольцевом вводе потока в прядильную камеру.

В этом случае вблизи завихрителя появляется довольно значительная область с радиальной скоростью $V_r > 0$ (радиальный источник). При этом прилегающая периферийная область потока имеет значение радиального стока примерно в 2 раза меньше по абсолютной величине, чем при $K = 0,8$. Оба этих явления должны учитываться при расчете аэродинамики соответствующих устройств.

ВЫВОДЫ

1. В устройствах с тангенциальной закруткой потока может возникать смещение оси физического вихря относительно геометрической оси, что существенно искажает замеры радиальных течений.

2. Предложенная модель и схема расчета позволяют определять поля скоростей закрученных потоков для группы устройств с геометрией $L/D=0,5\div 3$. Установлены закономерности радиальных течений в таких устройствах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гупта А., Лилли Д., Сайред Н. Закрученные потоки / Пер. с англ. – М.: Мир, 1987.
2. Сажин Б.С., Гудим Л.И. Вихревые пылеуловители. – М.: Химия, 1995.

3. Сажин Б.С., Тюрин М.П. Энергосберегающие процессы и аппараты текстильных и химических предприятий. – М., 2001.

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

5. Gorton-Hülgerth A., Woisetschläger J., Wigley G., Staudinger G. Investigation of the flow field in the upper part of a cyclone with laser and phase Doppler anemometry// Particle and Particle Systems Characterization. – V. 17, Issue 1, May 2000. P. 21...27.

6. 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.

7. Белоусов А.С., Сажин Б.С., Миронов А.В. Интегральные параметры крутки потоков в вихревых пылеуловителях / В кн.: Успехи в химии и химиче-

ской технологии. – М., 2004, №7 (47), т.18. С.86...89.

8. Сажин Б.С., Белоусов А.С. Турбулентные и вихревые течения в аппаратах со встречными закрученными потоками / В кн.: Аппараты с активными гидродинамическими режимами для текстильной промышленности и производства химических волокон. – М., 1983. С.17...21.

9. Белоусов А.С. Структура встречных закрученных потоков и расчет эффективности центробежного разделения газозвесей: Дис...канд. техн. наук. – М., 1986.

Рекомендована кафедрой процессов и аппаратов химической технологии и безопасности жизнедеятельности. Поступила 03.02.06.