

УДК 532.526

Исследование турбулентного закрученного потока во вращающемся сепарационном элементе переменного сечения

П.Н. Зятиков, А.Т. Росляк, Г.В. Кузнецов

Томский государственный университет

E-mail: roslyakat@ignd.tpu.ru

Приведены результаты экспериментальных исследований распределения окружных компонент скорости несущего потока в сепарационных элементах воздушно-центробежных классификаторов порошкообразных материалов. Исследования проводились при различных профилях канала зоны сепарации, а также при различных условиях ввода несущей среды (воздуха) в зону сепарации. Для реализации оптимальных условий разделения частиц во всем объеме сепарационного элемента профиль канала должен быть расширяющимся к центру вращения. Результаты проведенных экспериментальных исследований дополняют математическую модель аэродинамики несущего турбулентного потока в профилированном вращающемся сепарационном элементе и позволяют анализировать течение в зоне сепарации.

Ключевые слова: Турбулентный закрученный поток, зона сепарации, начальная закрутка, профиль канала, окружная и радиальная компоненты скорости, экспериментальный стенд, цилиндрический зонд, пылегазовый поток.

В классификаторах воздушно-центробежного типа процесс разделения исходного порошкообразного материала на крупную и мелкую фракции относительно граничного размера происходит в потоке несущей среды, поэтому турбулентный закрученный поток в сепарационном элементе оказывает определяющее влияние на процесс сепарации частиц [1]. В то же время на распределение составляющих компонент скорости несущего потока в зоне сепарации оказывают влияние расход несущей среды, скорость вращения границ сепарационного элемента, входной радиус и относительная ширина зоны сепарации, профиль канала, способ подачи несущей среды и классифицируемого порошка в зону разделения, начальная закрутка несущего потока, концентрация в несущей среде и гранулометрический состав исходного материала, наличие дополнительных подводов воздуха и ряд других факторов [2].

Организация оптимального движения пылегазового потока в сепарационном элементе является определяющим фактором, обеспечивающим создание аппаратов центробежного типа с высокими рабочими характеристиками. Однако до сих пор не установлены не только характер и степень влияния многих из перечисленных выше параметров на аэродинамику несущего потока, но и то, какое распределение составляющих скорости несущей среды отвечает максимальной эффективности разделения. В работе [2] показано, что для достижения максимальной эффектив-

ности разделения необходимо равенство в любой точке зоны сепарации массовых (центробежных) и аэродинамических сил, действующих на частицы граничного размера, что обеспечивается постоянством во всем объеме зоны сепарации комплекса $\frac{V_r R}{V_\varphi^2}$, где V_r , V_φ — радиальная и окружная составляющие скорости несущего потока, R — текущий радиус в зоне сепарации.

В настоящее время известные теоретические решения задач такого типа приведены для ламинарных и турбулентных закрученных потоков с рядом серьезных допущений в работах [1, 3–7]. Анализ решений в этих работах показывает, что в сепарационном элементе аппарата поток несущей среды состоит из центрального ядра, окружная скорость в котором по радиусу изменяется по закону свободного вихря, и турбулентных пограничных слоев.

Основными режимными параметрами аппаратов центробежного типа, определяющими аэродинамику сепарационного элемента, являются угловая скорость вращения ротора ω , объемный расход несущего потока через зону сепарации q и интегральная по высоте канала окружная скорость потока на входе $V_{\varphi 0}$. К геометрическим параметрам канала относятся радиус входа в зону сепарации R_0 , высота канала на входе h_0 и зависимость высоты канала от радиуса $h = h(R)$. Все эти параметры могут быть обобщены в безразмерном виде. Первые два из них можно

представить по аналогии с критерием Рейнольдса как: $Re_q = \frac{q}{2\pi R_0 \nu}$ — безразмерное интегральное значение радиальной скорости, выражающее соотношение сил инерции и вязкости, обусловленных течением несущей среды, и $Re_\omega = \frac{\omega R_0^2}{\nu}$ — модифицированное число Рейнольдса, выражающее отношение инерционных сил за счет вращения границ сепарационного элемента к силам вязкости потока, где ν — кинематическая вязкость газа.

За масштаб скорости в окружном и радиальном направлениях обозначим линейную скорость обода ротора ωR_0 и начальную закрутку запишем как $v_{\varphi 0} = \frac{V_{\varphi 0}}{\omega R_0}$. Относительная ширина канала $\beta = h_0/R_0$, а уравнение профиля сепарационного элемента имеет вид $f(r) = \frac{h(R)}{h_0}$, где $r = R/R_0$ — безразмерный текущий радиус зоны сепарации.

Учитывая, что $h_0^2 \ll R_0^2$, уравнения осредненного движения, переноса кинетической энергии пульсаций и скорости диссипации энергии турбулентности в цилиндрической системе координат запишутся в виде [1]:

$$v_r \frac{\partial v_\varphi}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_\varphi}{\partial z} + \frac{v_\varphi v_r}{r} = \frac{1}{\beta_2 Re_\omega} \frac{\partial}{\partial z} \left[(1 + \varepsilon_t) \frac{\partial v_\varphi}{\partial z} \right], \quad (1)$$

$$v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{v_\varphi^2}{r} + \frac{dP}{dr} = \frac{1}{\beta_2 Re_\omega} \frac{\partial}{\partial z} \left[(1 + \varepsilon_t) \frac{\partial v_r}{\partial z} \right], \quad (2)$$

$$\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0, \quad (3)$$

$$v_r \frac{\partial k}{\partial r} + v_z \frac{\partial k}{\partial z} + \frac{1}{\beta_2 \text{Re}_\omega} \frac{\partial}{\partial z} \left[(1 + \varepsilon_t) \frac{\partial k}{\partial z} \right] + \frac{\varepsilon_t}{\beta^2 \text{Re}_\omega \alpha_0^2} \left[\left(\frac{\partial v_\varphi}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_r}{\partial z} \right)^2 \right] - \frac{\alpha_0 \Psi}{\beta} - \frac{2}{\beta^2 \text{Re}_\omega} \left(\frac{\partial k^{0,5}}{\partial z} \right)^2, \quad (4)$$

$$v_r \frac{\partial \psi}{\partial r} + v_z \frac{1}{\beta^2 \text{Re}_\omega} \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(1 + \frac{\varepsilon_t}{\sigma_e} \right) \frac{\partial \psi}{\partial z} \right] + \frac{c_{\varepsilon_1} \varepsilon_t}{\beta^2 \text{Re}_\omega \alpha_0^2} \frac{\psi}{\kappa} \left[\left(\frac{\partial v_\varphi}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_r}{\partial z} \right)^2 \right] - \frac{\alpha_0 c_{\varepsilon_2} \psi^2}{\beta \kappa} + \frac{2 \varepsilon_t}{\beta^2 \text{Re}_\omega^2 \alpha_0^3} \left[\left(\frac{\partial^2 v_\varphi}{\partial z} \right)^2 + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} \right]. \quad (5)$$

Для замыкания системы уравнений (1)–(5) записывается уравнение сохранения расхода

$$r \int_0^1 v_r dz = \frac{\text{Re}_q}{\beta \text{Re}_\omega}, \quad (6)$$

Безразмерные величины в этих уравнениях представлены следующими соотношениями

$$v_\varphi = \frac{V_\varphi}{\omega R_0}, \quad v_r = \frac{V_r}{\omega R_0}, \quad v_z = \frac{V_z}{\omega h_0}, \quad k = \frac{K}{K_0}, \quad \psi = \frac{h_0 \Psi}{K_0^{3/2}}, \quad \rho_0 = \frac{P}{\rho_0 \omega^2 R_0^2},$$

$$z = \frac{z}{h_0}, \quad \alpha = \frac{\sqrt{K_0}}{\omega R_0}, \quad \varepsilon_t = \frac{v_t}{\nu},$$

где V_r, V_φ, V_z — размерные радиальная, окружная и аксиальная составляющие вектора скорости несущего потока, P — осредненное статическое давление, ρ_0 — плотность среды, K — размерная кинетическая энергия пульсаций скорости несущего потока (K_0 — соответствует входу в сепарационный элемент), Ψ — скорость диссипации энергии турбулентности, v_t — коэффициент турбулентной вязкости потока, ωh_0 — масштаб для осевой компоненты скорости.

Относительный коэффициент турбулентной вязкости определяется [3, 4] как

$$\varepsilon_t = c_\mu \text{Re}_k, \quad \text{где } \text{Re}_k = \frac{\alpha_0 \lambda K^2}{\beta \Psi}.$$

В соответствии с [3] выбраны эмпирические постоянные модели:

$$C_\mu = 0,9 \exp \left[-\frac{3,4}{(1 + 0,02 \text{Re}_k)^2} \right], \quad c_{\varepsilon_1} = 1,44,$$

$$c_{\varepsilon_2} = 1,92 \left[1 - 0,3 \exp(-\text{Re}_k^2) \right], \quad \sigma_e = 1,3.$$

Система (1)–(6) замыкается граничными условиями:

$$v_r(r, 0) = v_r(r, f) = v_z(r, 0) = \kappa(r, 0) = \kappa(r, f) = \psi(r, 0) = \psi(r, f) = 0,$$

$$v_\varphi(r, 0) = v_\varphi(r, f) = r, \quad v_\varphi = v_{\varphi 1}(z), \quad v_r(1, z) = v_{r1}(z), \quad \kappa(1, z) = \kappa_1(z), \quad \psi(1, z) = \psi_1(z).$$

В работе [1] представлены результаты расчета распределения радиальной и окружной компонент скорости несущего потока по высоте и радиусу зоны сепарации при трех профилях канала (рис. 1). Однако во всех вышеописанных решениях приходится задавать произвольно начальную закрутку потока на входе в сепарационный элемент, исходя из априорных соображений, т. к. его теоретическое определение представляет собой еще более сложную задачу, чем течение в узком вращающемся канале. Поэтому экспериментальные измерения компонент скоростей, особенно окружной скорости на входе в сепарационный элемент, позволяют совместно с теоретическими результатами адекватно описать картину течения несущего потока в зоне сепарации.

Основная цель экспериментальных исследований аэродинамики сепарационного элемента состоит в том, чтобы установить влияние значимых параметров на

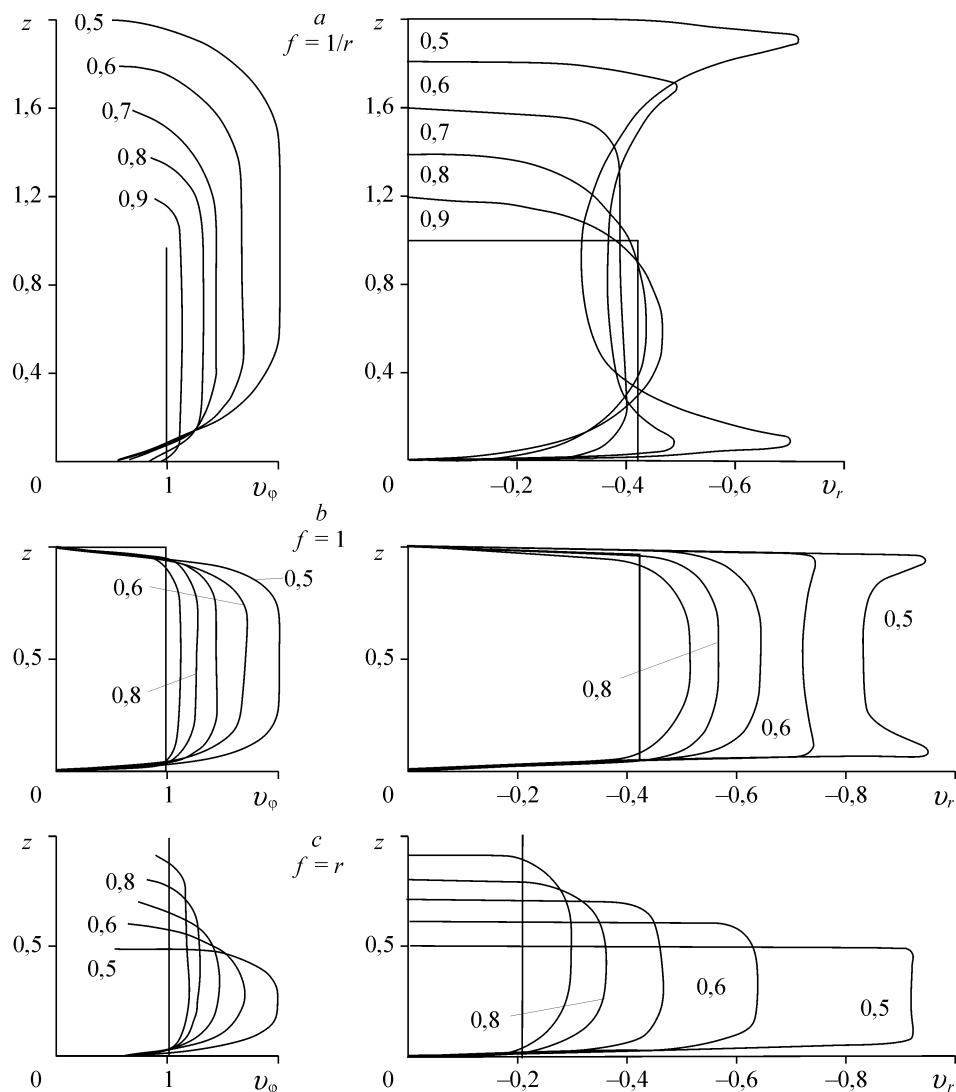


Рис. 1. Расчетные распределения окружной и радиальной компонент скорости несущей среды в трех профилях канала зоны сепарации при $Re_\omega = 7 \cdot 10^5$, $Re_q = 29,5 \cdot 10^3$, $v_{\varphi 0} = 1,0$, $\beta = 0,1$, $r = 1$.

распределение компонент скорости несущего потока в зоне сепарации, прежде всего на величину и профиль по высоте канала окружной составляющей скорости на входе в сепарационный элемент.

Для измерения компонент вектора скорости в двумерном потоке применяются цилиндрические зонды [8], которые использовались при измерении окружной компоненты скорости потока в сепарационном элементе аппарата.

При малых дозвуковых скоростях потока величина скорости определяется выражением

$$V = \xi \sqrt{\frac{P_0 - P_{cm}}{0,5\rho_0}} = \xi \sqrt{\frac{m\gamma(h_2 - h_1)}{0,5\rho_0}}, \quad (7)$$

где ξ — тарировочный коэффициент датчика давления.

В действительности это выражение усложняется за счет введения ряда коэффициентов и поправок, учитывающих характеристики поля канала.

Для схемы точного измерения скорости

$$V = \sqrt{\frac{2}{\rho_0}(h_2 - h_1)K_m F_m \gamma_m \xi_k \mu}, \quad (8)$$

где h_2, h_1 — показания манометра, соответствующие начальному и изменившемуся уровням жидкости, K_m — коэффициент манометра, F_m — коэффициент наклона манометра, ξ_k — коэффициент трубки, μ — коэффициент поля трубки, учитывает отклонение действительного значения скорости в месте размещения зонда от истинного значения.

Погрешность определения скорости складывается из частных погрешностей измерения перепада давлений и частных погрешностей, с которыми определены все входящие в (8) коэффициенты [8]:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{\Delta\rho_0}{\rho_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta h}{h}\right)^2 + \left(\frac{\Delta K}{K}\right)^2 + \left(\frac{\Delta F_m}{F_m}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\gamma_m}{\gamma_m}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\xi_k}{\xi_k}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\mu}{\mu}\right)^2}.$$

Относительная ошибка измерения динамического напора может быть оценена по формуле

$$\frac{\Delta(\Delta P)}{\Delta P} = \frac{1}{\Delta P} \left[\Delta P_1 + \Delta P_2 + \left| \frac{dP}{dy} \right| \Delta y \right] \cdot 100 \%,$$

где $\Delta P_1, \Delta P_2, \left| \frac{dP}{dy} \right| \Delta y$ — абсолютные ошибки, обусловленные непостоянством ре-

жима, а также связанные с неточностью отсчета по шкале прибора и с неточностью установки пневмометрического зонда в данной точке соответственно.

Общая ошибка в определении компонент вектора скорости составляет не более 10 %.

Для установления закономерностей аэродинамики несущего потока в процессах воздушно-центробежной классификации частиц разработан стенд (рис. 2), который обеспечивает исследования в условиях как однофазного, так и двухфазного потоков. Стенд состоит из блока сепарации в различных вариантах исполнения (с аксиальной и тангенциальной подачей исходного материала и воздушного потока в зону сепарации, с различной геометрией зоны сепарации и несколькими вариантами перераспределения воздушных потоков), дозатора исходного материала, пылеотделительной системы (циклон, фильтр), блока управления, дутьевого

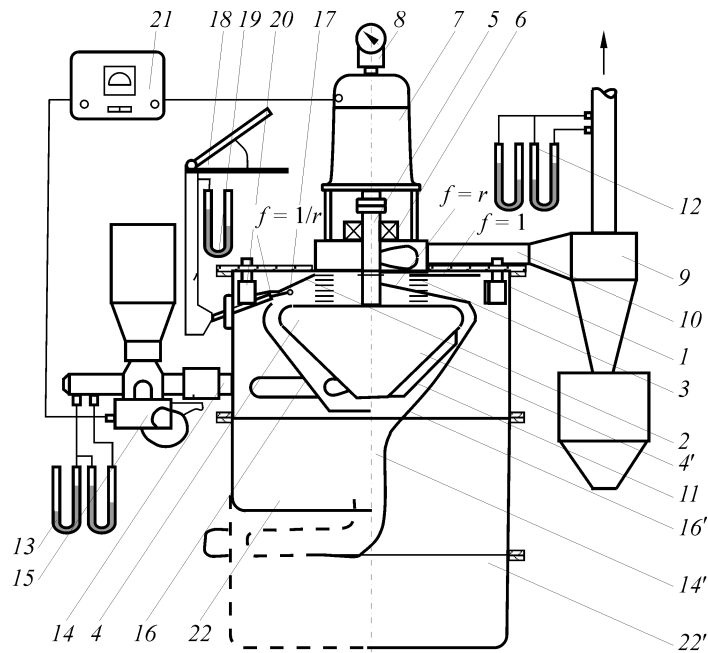


Рис. 2. Экспериментальный стенд.

1 — корпус, 2 — профилированный диск, 3 — набор дисков, 4 — обтекатель ротора (4' — при аксиальной подаче), 5 — вал ротора, 6 — подшипниковый узел, 7 — электропривод, 8 — тахометр, 9 — циклон, 10 — тангенциальный выходной патрубок, 11 — радиальные лопатки, 12, 13 — дифференциальные манометры, 14, 14' — тангенциальный и аксиальный входные патрубки соответственно, 15 — дозатор, 16, 16' — воронки, 17 — цилиндрический зонд, 18 — наклонный дифференциальный манометр, 19 — манометр статического давления, 20 — поворотные сопла, 21 — пульт управления, 22, 22' — букеры приема крупной фракции.

устройства (воздуходувка, вакуум-насос). Блок сепарации воздушно-центробежного классификатора (ВЦК) является основным узлом стенда и состоит (см. рис. 2) из корпуса 1, внутри которого на валу 5 с подшипниковым узлом 6 установлен ротор, включающий верхний профилированный диск 2, набор дисков и обтекатель 4. При аксиальном вводе несущего потока на роторе установлены радиальные лопатки 11. Ротор приводится во вращение электроприводом 7. Зону сепарации образуют верхний профилированный диск 2, набор дисков 3, верхняя часть обтекателя ротора 4 и верхний край направляющей воронки 16. Подача порошка в несущую среду осуществляется дозатором 15. Двухфазный поток подается в зону сепарации через тангенциальный 14 или аксиальный 14' патрубки и кольцевую щель между вращающимся обтекателем ротора 4 и направляющей неподвижной воронкой 16, а вывод мелкой фракции вместе с потоком воздуха обеспечивается через тангенциальный патрубок 10 в циклон 9. Крупная фракция за счет преобладающего действия центробежных сил выбрасывается в корпус 1 классификатора через кольцевую щель между верхним профилированным диском 2 и направляющей воронкой 16. Поворотные сопла 20 в количестве шести штук служат для дополнительной подачи воздуха с различной начальной закруткой в зону сепарации. Для обеспечения расхода воздуха стенд подключается к воздуходувке, работающей в режиме отсоса, или к водокольцевому вакуум-наосу ВВН-3. Пульт управления 21 двухканальный, для однотипных двигателей постоянного тока обеспечивает регулирование и стабилизацию скорости вращения шнека дозатора и ротора ВЦК в диапазоне 200–3000 об/мин. Скорость вращения ротора дополнительно контролируется стробоскопическим методом и регистрируется частотомером ЧЗ-33. Расход воздуха измеряется по методике Никурадзе [8] и регистрируется

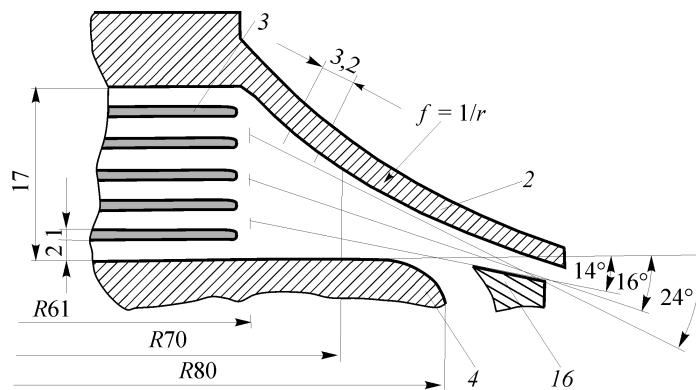


Рис. 3. Схема исследования аэродинамики сепарационного элемента (обозначения соответствуют рис. 2).

дифференциальными манометрами 12, 13. Для определения окружной составляющей скорости воздушного потока в зону сепарации введен цилиндрический зонд 17, подсоединенный к дифференциальному наклонному манометру 18 типа ММН-2 и манометру статического давления 19. Цилиндрический зонд изготовлен из шприцевой иглы наружным диаметром $d_1 = 1,2$ мм и приемным отверстием $d_2 = 0,5$ мм. Изготовление, тарировка и измерения проводились в соответствии с методикой [8]. Коэффициент тарировки для данного цилиндрического зонда составил 0,98. Зонд крепился на корпусе аппарата и перемещался в радиальном (с точностью установки $\pm 0,05$ мм) и угловом (с точностью 1°) направлении зоны сепарации с помощью специального координатного устройства с шагом измерения 3,2 мм (рис. 3). На этом рисунке также приведены: входной радиус $R70$, радиус обтекателя ротора $R80$, радиус дисков $R61$, толщина дисков 1 мм и расстояние между ними 2 мм. Обозначения элементов зоны сепарации соответствуют рис. 2.

Ротор снабжен сменными верхними дисками 2 и дополнительными вставками, обеспечивающими изменение геометрии зоны сепарации в соответствии с тремя типами каналов: расширяющимся к центру вращения по закону $f = 1/r$, плоско-параллельным $f = 1$ и сужающимся к оси вращения по закону $f = r$ (см. рис. 2).

Исследование аэродинамики сепарационного элемента проводилось в следующих диапазонах варьирования рабочих и геометрических параметров классификатора:

1. Входной радиус R_0 сепарационного элемента составляет 0,07 и 0,15 м;
2. Угловая скорость вращения ω сепарационного элемента варьировалась в диапазоне $10 \text{ с}^{-1} - 400 \text{ с}^{-1}$;
3. Расход несущей среды изменялся в пределах $5,5 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$;
4. Способ подвода воздушного потока — аксиальный, тангенциальный и соплами;
5. Профиль сепарационного элемента $f = 1, 1/r, r$.

В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что распределение окружной компоненты скорости в ядре потока по радиусу близко к потенциальному течению независимо от профиля канала, расхода несущего потока и скорости вращения границ сепарационного элемента. На рис. 4 представлены результаты измерения окружной составляющей скорости по радиусу сепарационного элемента для трех видов геометрии канала: расширяющегося к оси вращения ($f = 1/r$), плоско-параллельного ($f = 1$) и сужающегося к оси вращения ($f = r$). Измерения проводились цилиндрическим зондом на трех скоростях вращения ($\omega = 40, 146, 215 \text{ с}^{-1}$) при различных условиях ввода основного потока

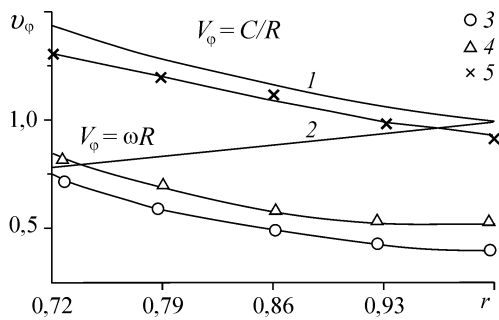


Рис. 4. Распределение окружной составляющей скорости по радиусу зоны сепарации для трех профилей канала: $V_\phi = c/R$ (1), ωR (2), $f = r$ (3), 1 (4), $1/r$ (5) при $\omega = 146 \text{ с}^{-1}$, $q = 1,53 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{с}$.

(тангенциально и аксиально) и подвода дополнительного воздуха (радиально через отверстия или тангенциально соплами, установленными по направлению или навстречу вращения). В качестве примера на рис. 4 приведены результаты измерений при скорости вращения $\omega = 146 \text{ с}^{-1}$, с тангенциальным вводом основного потока $q = 0,02 \text{ м}^3/\text{с}$ и без подвода дополнительного воздуха. Символами отмечены экспериментальные точки, а кривая 1 показывает распределение окружной скорости по закону потенциального течения, вычисленное по экспериментально найденной начальной закрутке на входе в сепарационный элемент. Распределение по радиусу окружной скорости вращения границ сепарационного элемента при заданной угловой скорости ω показывает кривая 2. Максимальный уровень окружных составляющих скорости при прочих равных условиях реализуется для расширяющегося к центру вращения канала.

Исследование влияния ввода дополнительного потока воздуха на профиль окружной компоненты скорости на входе в сепарационный элемент проводилось на сужающемся к центру вращения канале. Характерные профили окружной составляющей скорости при различных условиях ввода дополнительного потока и для двух скоростей вращения приведены на рис. 5. Основной поток воздуха подводился в зону сепарации тангенциально. Как видно из рис. 5, на малых скоростях вращения ротора при отсутствии подвода дополнительного потока начальная закрутка воздуха опережает скорость вращения границ сепарационного элемента. Подвод дополнительного воздуха через отверстия (радиально) значительно искажает профиль окружной компоненты скорости несущего потока. У верхнего диска окружная компонента скорости несущего потока отстает от скорости вращения диска,

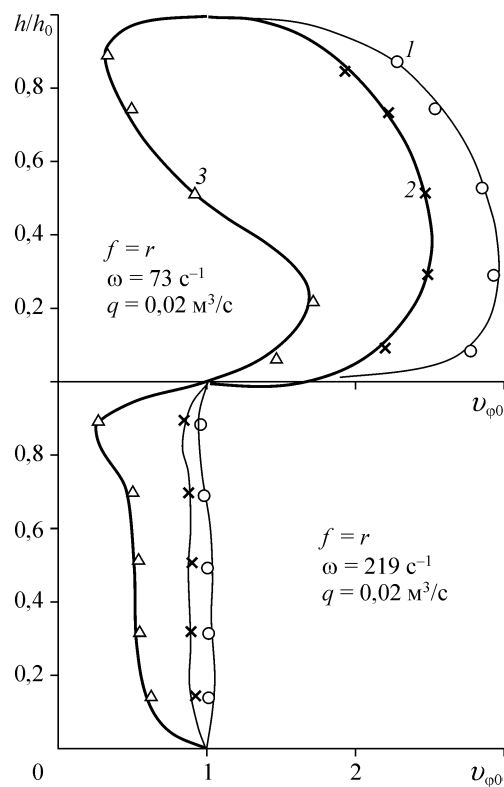


Рис. 5. Распределение окружной составляющей скорости по высоте входного участка зоны сепарации:

1 — подача дополнительного воздуха отсутствует. Соотношение дополнительного и основного расходов воздуха — 0, 2 — через сопла тангенциально по направлению вращения подается воздух в соотношении дополнительного и основного расходов воздуха — 0,20, 3 — радиально через сопла в корпусе подается воздух в соотношении дополнительного и основного расходов воздуха — 0,40.

а в нижней части входа в сепарационный элемент опережает скорость вращения границы. За счет этого возникает значительная разница центробежных сил, действующих на несущий поток в верхней и нижней части входа в сепарационный элемент, что может привести к циркуляционному движению несущего потока в зоне сепарации. В то же время подача дополнительного потока через сопла обеспечивает выравнивание профиля окружной компоненты скорости несущего потока на входе в сепарационный элемент. С увеличением скорости вращения ротора влияние этих условий на начальную закрутку уменьшается.

На рис. 6 приведены результаты исследования влияния параметров на формирование величины начальной закрутки несущего потока на входе в сепарационный элемент при различных условиях ввода основного и дополнительного потоков воздуха. Как видно, при тангенциальной подаче основного потока воздуха относительная величина начальной закрутки падает с ростом критерия Re_{ω} , характеризующего скорость вращения сепарационного элемента. Вдув дополнительного потока радиально через отверстия снижает уровень начальной закрутки, причем при соотношении дополнительного и основного потоков, равном 0,4, величина начальной закрутки уменьшается на 15 %.

При аксиальной подаче основного потока (рис. 6, *b*) относительная величина начальной закрутки остается постоянной и равной 0,6–0,7 при любых расходах воздуха и скоростях вращения ротора.

Экспериментальные исследования аэродинамики зоны сепарации позволяют сделать следующие выводы:

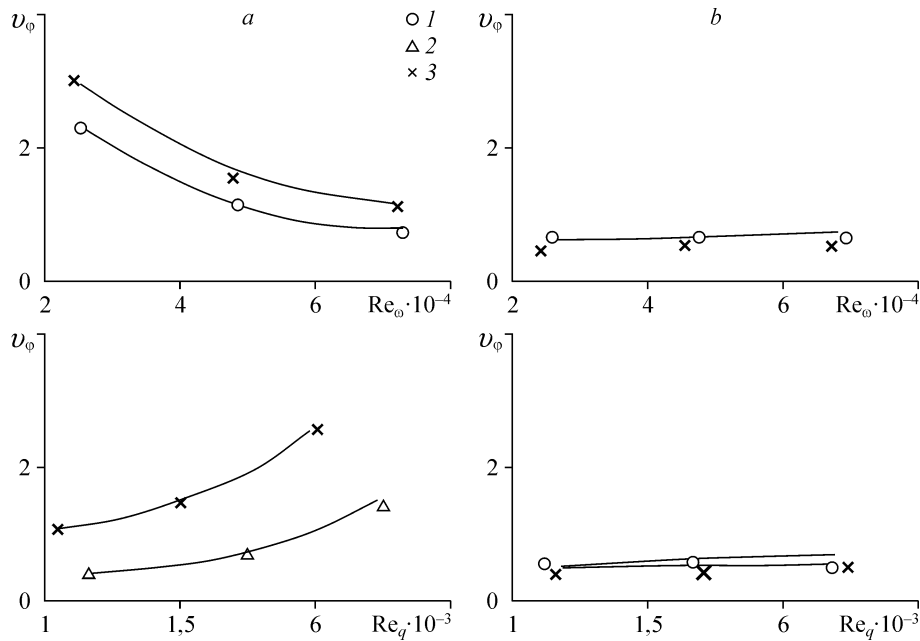


Рис. 6. Влияние режимных параметров на формирование величины начальной закрутки несущего потока на входе в сепарационный элемент при тангенциальной (*a*) и аксиальной (*b*) подаче воздуха.

1 — подача дополнительного воздуха отсутствует. Соотношение дополнительного и основного расходов воздуха — 0, 2 — через сопла тангенциально по направлению вращения подается воздух в соотношении дополнительного и основного расходов воздуха — 0,20, 3 — радиально через сопла в корпусе подается воздух в соотношении дополнительного и основного расходов воздуха — 0,40.

1. Для реализации максимальной закрутки потока на входе в сепарационный элемент и равномерного распределения по радиусу комплекса $V_r R_0 / V_\phi^2$, характеризующего граничный размер разделения, оптимальным является профиль канала зоны сепарации, расширяющийся к центру вращения по закону $f = 1/r$;

2. Дополнительный подвод воздуха на периферию зоны сепарации следует осуществлять через сопла, направленные по ходу вращения ротора, чтобы исключить образования циркуляционного движения несущего потока;

3. Для регулирования начальной закрутки несущей среды на входе в зону сепарации необходима аксиальная подача основного потока через обтекатель ротора с радиальными лопатками (поз. 11, см. рис. 2). Величина начальной закрутки в этом случае составляет 0,5–0,7 от скорости вращения границ зоны сепарации на входном участке;

4. При тангенциальной подаче основного потока воздуха в зону сепарации начальная закрутка практически не зависит от скорости вращения ротора и полностью определяется расходом несущей среды;

5. Результаты проведенных экспериментальных исследований замыкают математическую модель аэродинамики несущего турбулентного потока в профилированном вращающемся сепарационном элементе и позволяют анализировать течение в зоне сепарации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сосновский Н.Д., Шваб А.В., Зятиков П.Н. и др. Влияние гидродинамики течения несущей среды в профилированном канале воздушно-центробежного классификатора на эффективность разделения порошков // Вопросы аэрогидромеханики и теплообмена. — Томск: Изд-во Том. ун-та. — 1989. — С. 32–47.
2. Зятиков П.Н., Росляк А.Т. Исследование воздушно-центробежного классификатора дисперсных материалов // Методы гидроаэромеханики в приложении к некоторым технологическим процессам. — Томск: Изд-во Том. ун-та. — 1977. — С. 134–143.
3. Лаундер В.Е., Приддин С.Н., Шарма В.И. Расчет турбулентного пограничного слоя на вращающихся и криволинейных поверхностях // Теоретические основы инженерных расчетов. — 1977. — С. 332–340.
4. Адамс Р., Райс В. Экспериментальное исследование течения между совместно вращающимися дисками // Прикладная механика. — 1970. — Т. 37, № 3. — С. 272–277.
5. Гольдштик М.А. Вихревые потоки. — Новосибирск: Наука, 1981. — 366 с.
6. Брэдшоу П. Турбулентность. — М.: Мир, 1980. — 343 с.
7. Кутателадзе С.С., Волчков Э.П., Терехов В.И. Аэродинамика и тепломассообмен в ограниченных вихревых потоках. — Новосибирск: ИТФ СО АН СССР, 1987. — 282 с.
8. Петунин А.М. Методы и техника измерений параметров газового потока. — М.: Машиностроение, 1972. — 212 с.

Статья поступила в редакцию 28 мая 2008 г.