

УДК 532.526

П.Н. Зятиков

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АЭРОДИНАМИКИ ЗАКРУЧЕННОГО ПОТОКА В ВОЗДУШНО-ЦЕНТРОБЕЖНОМ КЛАССИФИКАТОРЕ

Приведены результаты экспериментальных исследований распределения компонент вектора скорости несущего потока в сепарационном элементе воздушно-центробежного классификатора порошков производительностью до 2000 кг/ч (ВЦК-1000). 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, шаровой зонд, пылегазовый поток.

В классификаторах воздушно-центробежного типа процесс разделения исходного порошка 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]. С другой стороны, 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 канала, профиль зоны сепарационного элемента, способ подачи несущей среды и 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 – 4].

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. 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 $Re_q = q/2\pi R_0 \nu$ – безразмерное интегральное значение радиальной скорости, выражающее соотношение сил инерции и вязкости, обусловленных течением несущей среды, и $Re_\omega = \omega R_0^2/\nu$ – модифицированное число Рейнольдса, выражающее от-

ношение инерционных сил за счет вращения границ сепарационного элемента к силам вязкости потока, где ν – кинематическая вязкость газа [5].

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

Основная задача разработки и изготовления экспериментального стенда, включающего классификатор ВЦК-1000 с производительностью до 2000 кг/ч по исходному продукту (рис. 1), состояла в изучении моделирования процессов воздушно-центробежной классификации частиц на установках промышленного назначения и большей мощности. В то же время большие габариты (по сравнению с классификаторами типа ВЦК-9 [NbF]) ВЦК-1000 позволили применить в данном случае шаровой зонд для изучения аэродинамики входного участка сепарационного элемента.

Экспериментальный стенд (рис. 1) включает дозатор 1, обеспечивающий при скорости вращения шнека 20 – 130 об/мин производительность 300 – 2000 кг/ч, блок сепарации 3, систему пылеулавливания, состоящую из улиточного пылеконцентратора 7 и выносных циклонов 4 и 5, подсоединенных к трубопроводу отсасывающего вентилятора ВВД-9. Скорость вращения ротора ВЦК и шнека дозатора регулировалась с блока управления 2 и регистрировалась тахометром. Для регистрации расхода воздуха через ВЦК и его сопротивления установлен коллектор 8 и дифференциальные манометры 9, 10. Для измерения компонент вектора скорости служит шаровой зонд 11, подсоединенный к пятиканальному микроманометру 12.

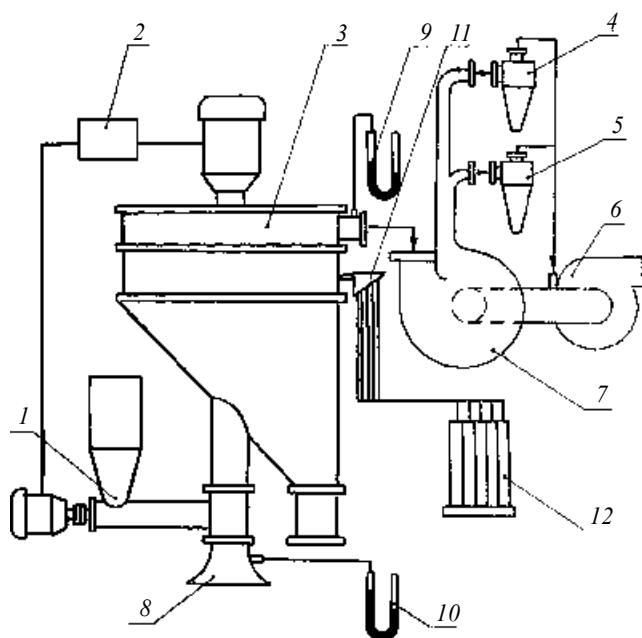


Рис. 1 Экспериментальный стенд исследования аэродинамики зоны сепарации на базе классификатора ВЦК-1000

Исследования на представленном стенде проводились следующим образом. Включался вентилятор ВВД-9 и определялся расход воздуха через блок сепарации. Устанавливалась заданная скорость вращения ротора ВЦК. Порция материала взвешивалась и засыпалась в бункер дозатора. Включался дозатор, и регистрировалось время прохождения всего материала. Крупный и мелкий продукты разделения извлекались из бункеров блока сепарации и циклонов, взвешивались, и проводился ситовой или микроскопический анализ продуктов разделения.

Шаровой зонд (рис. 2) изготовлен с диаметром шара $d_{ш} = 6$ мм, диаметр шейки равен $0,5d_{ш}$. Диаметр трубок составил $0,08 d_{ш}$. Ствол зонда выполнен из трубки с внутренним диаметром 5 мм. Длина шейки 40 мм. Угол между осями центрального и боковых отверстий составляет 40° . Чтобы ослабить влияние зонда на воздушный поток, зонд изготовлен с отогнутой назад по направлению потока шейкой. Дополнительным достоинством такой конструкции является большая степень локализации точки измерения, поскольку ось ствола совмещается с устьем центрального отверстия. Тарировочные графики для изготовленного зонда приведены на рис. 3.

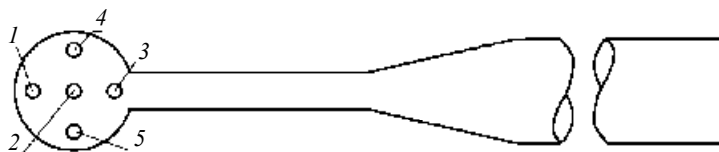


Рис. 2. Шаровой зонд исследования аэродинамики зоны сепарации ВЦК.
1 – 5 – отверстия ввода воздушного потока

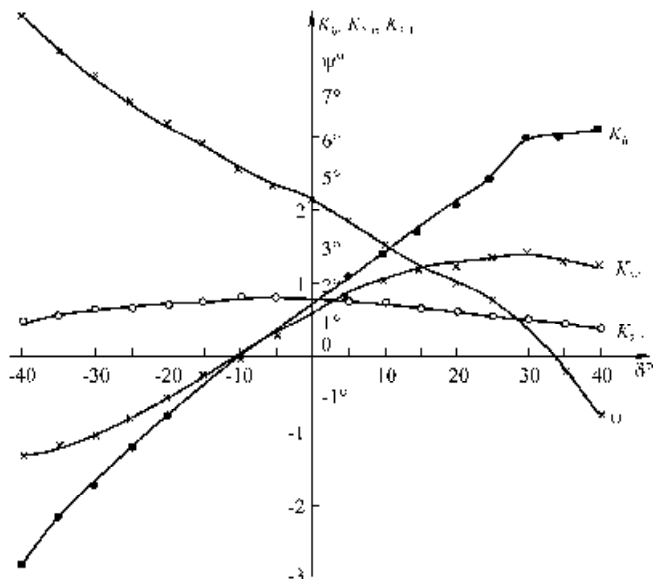


Рис. 3. Тарировочные графики шарового зонда

Относительная погрешность измерения скорости может быть рассчитана по формуле [6]

$$\frac{\Delta U}{U} = 0,5 \frac{\Delta(\Delta P)}{\Delta P} + \frac{\Delta \rho}{\rho},$$

где $\Delta(\Delta P)/\Delta P$ – относительная погрешность измерения динамического напора; а $\Delta\rho/\rho$ относительная погрешность измерения плотности, равная относительной погрешности измерения температуры $\Delta T/T$, так как $\rho \sim T$. Относительная ошибка измерения динамического напора может быть оценена по формуле

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

где ΔP_1 – абсолютная ошибка, обусловленная непостоянством режима; ΔP_2 – абсолютная ошибка, связанная с неточностью отсчета по шкале прибора микроманометра;

$$\left| \left(\frac{dP}{dy} \right) \Delta y \right|$$

– абсолютная ошибка, связанная с неточностью установки пневмометрического зонда в данной точке.

Для оценки относительной погрешности измерения динамического напора используются следующие характерные значения: $\Delta P = 1$ мм вод. ст.; $\Delta P = 0,5$ мм вод. ст.; $\Delta y = 0,1$ мм. Подстановка этих значений в расчетную формулу дает относительную погрешность динамического напора:

$$\frac{\Delta(\Delta P)}{\Delta P} = \frac{1}{100} \cdot [1 + 0,5 + 0,1] \cdot 100 \% = 2,5 \, \%.$$

В действительности ошибка в определении величины динамического напора несколько больше, так как на погрешность измерения влияют и другие факторы [7].

Погрешность измерения компонент вектора скорости газового потока для изучаемых сепарационных элементов ВЦК составляла не более 10 %.

На рис. 4. приведена схема исследования аэродинамики входного участка зоны сепарации с радиусом $R_{02} = 0,250$ м.

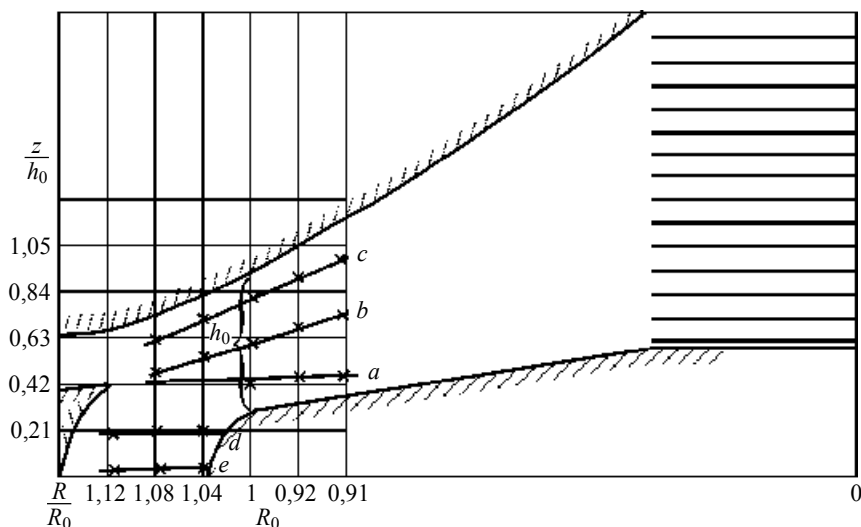


Рис. 4. Схема исследования аэродинамики зоны сепарации в классификаторе ВЦК-1000

Представленный стенд позволяет исследовать влияние основных значимых факторов на аэродинамику воздушного потока в сепарационном элементе и процессы воздушно-центробежной классификации частиц и представляет собой физическую модель центробежной сепарации в воздушном потоке, которая отвечает следующим основным требованиям:

- изменение геометрии канала с различными входными радиусами R_0 и высотой h_0 сепарационного элемента;
- регулирование в широких пределах расходной концентрации порошка;
- регулирование в широком диапазоне скорости вращения ротора и расхода несущей среды.

Экспериментальные результаты для установки ВЦК-1000 приведены на рис. 5. При тангенциальном подводе основного потока воздуха начальная закрутка формируется в соответствии с расходом и в дальнейшем слабо реагирует на изменение скорости вращения сепарационного элемента.

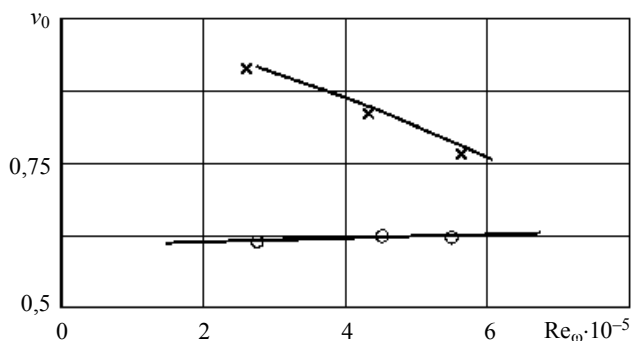


Рис. 5. Влияние условий ввода основного потока на величину окружной составляющей скорости несущей среды на входе в сепарационный элемент: x – тангенциальный подвод; o – аксиальный подвод; $Re_q = 1,46 \cdot 10^4$

В случае использования аксиального подвода и радиальных лопаток на обтекатель ротора в достаточно широком диапазоне расходов несущей среды поддерживается постоянное соотношение между скоростью вращения ротора и величиной начальной закрутки несущей среды на входе в сепарационный элемент. При тангенциальном подводе начальная закрутка растет пропорционально расходу основного потока. Вдув дополнительного потока радиально через отверстия снижает уровень начальной закрутки, причем при соотношении дополнительного и основного потока, равном 0,3, величина начальной закрутки уменьшается на 15 %. Влияние расхода на величину начальной закрутки при аксиальной подаче основного потока не так сильно выражено, как при тангенциальной подаче.

Поэтому данные измерения были дополнены экспериментальными исследованиями всех компонент скорости несущего потока с помощью пятиканального шарового зонда на крупногабаритном классификаторе ВЦК-1000. Зонд вводился во входной участок зоны сепарации по пяти направлениям в соответствии со схемой рис. 4. На рис. 6 – 10 приведены распределения аксиальной, окружной (тангенциальной) и радиальной составляющих скорости несущей среды по радиусу входного участка сепарационного элемента при различных режимах работы ВЦК и различных направлениях перемещения зонда.

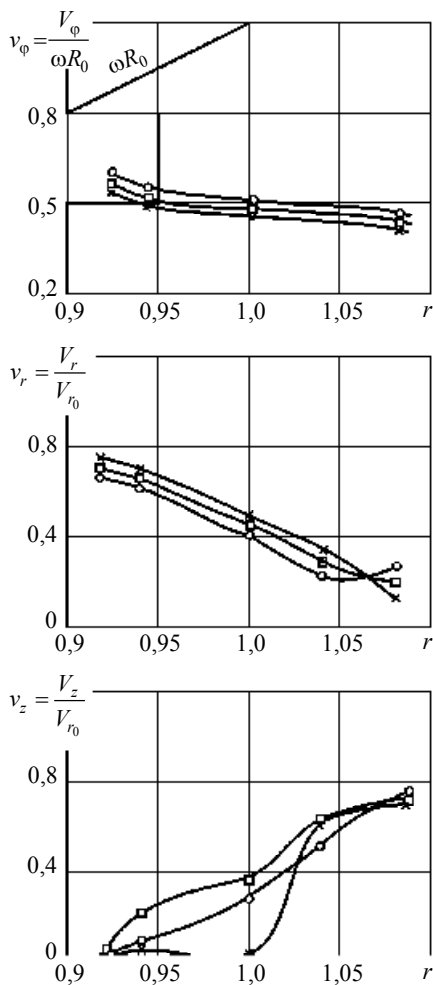


Рис. 6. Распределение компонент вектора скорости несущей среды по линии a (рис. 4) Re_ω : $\times$ – $2,7 \cdot 10^5$; $\square$ – $4,5 \cdot 10^5$; $\circ$ – $5,4 \cdot 10^5$

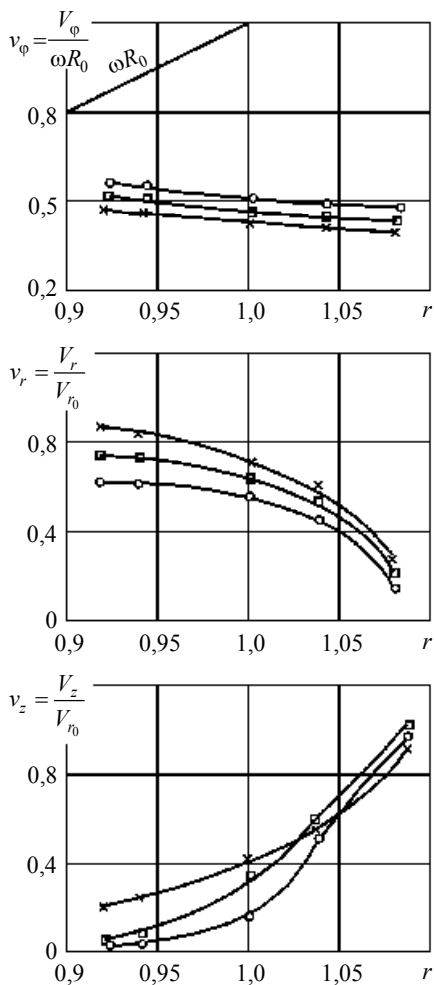


Рис. 7. Распределение компонент вектора скорости несущей среды по линии b (рис. 4) Re_ω : $\times$ – $2,7 \cdot 10^5$; $\square$ – $4,5 \cdot 10^5$; $\circ$ – $5,4 \cdot 10^5$

Расход воздуха оставался постоянным и равным $1270 \text{ м}^3/\text{ч}$, что соответствовало значению параметра $Re_q = 502$. Значения измеренных компонент скорости приведены к безразмерному виду через масштаб ωR_0 . Как видно из рис. 6 – 10, на входном участке зоны сепарации ВЦК происходит изменение структуры потока несущей среды от аксиального осесимметричного течения с незначительной радиальной составляющей (рис. 6, 7) к плоскому вихревому течению типа потенциального стока, причем с ростом скорости вращения ротора интенсивность перестройки структуры потока увеличивается. В качестве входного радиуса зоны сепарации выбран радиус $R_{0,2} = 0,255 \text{ м}$, на котором течение типа потенциального стока можно считать реализованным. Дальше вниз по потоку значение аксиальной составляющей скорости составляет $0,01 - 0,1$ и в 5 – 10 раз меньше значения радиальной составляющей скорости.

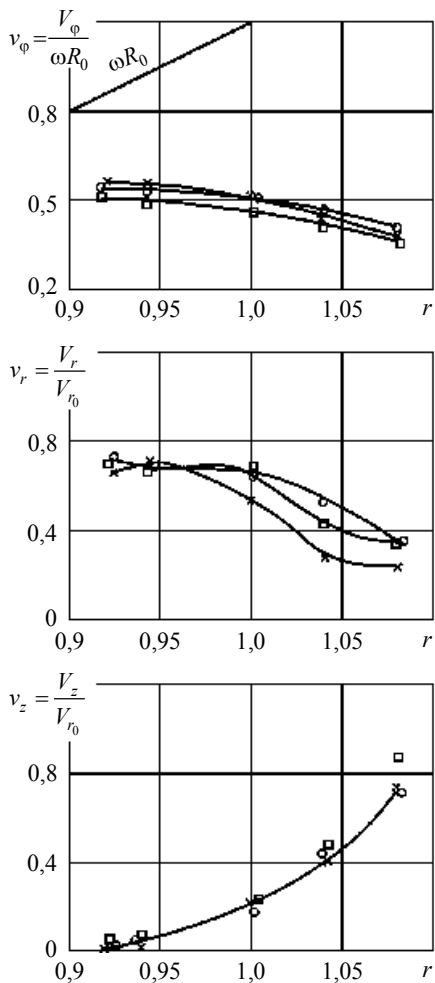


Рис. 8. Распределение компонент вектора скорости несущей среды по линии c (рис. 4) Re_ω : $\times$ – $2,7 \cdot 10^5$; $\square$ – $4,5 \cdot 10^5$; $\circ$ – $5,4 \cdot 10^5$

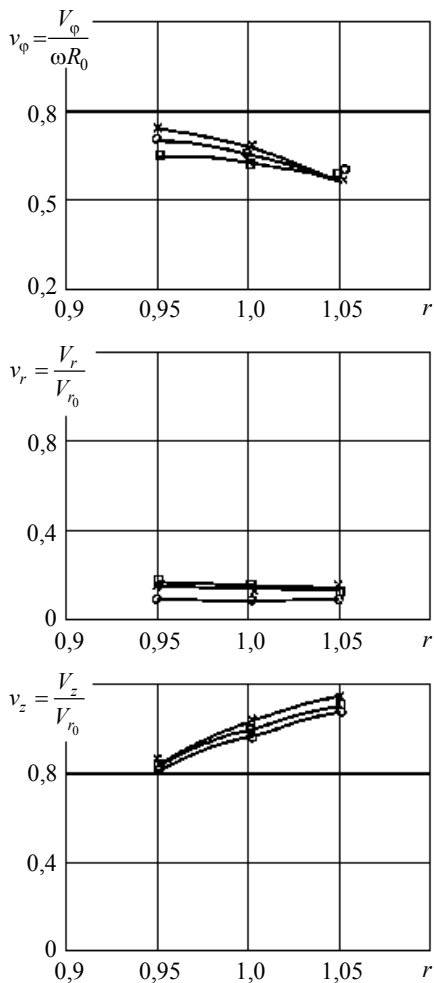


Рис. 9. Распределение компонент вектора скорости несущей среды по линии d (рис. 4) Re_ω : $\times$ – $2,7 \cdot 10^5$; $\square$ – $4,5 \cdot 10^5$; $\circ$ – $5,4 \cdot 10^5$

Абсолютные значения окружной составляющей скорости несущей среды составляют 0,5 – 0,6 от скорости вращения границ зоны сепарации на входном радиусе ($\omega R_{0,2}$). Следует также отметить, что значения аксиальной составляющей скорости несущей среды на линиях e и d (рис. 9 и 10) и радиальной составляющей на радиусе $r = 0,92$ с точностью до 10 % коррелируют со среднерасходной скоростью. Такое соответствие подтверждает достаточную точность и достоверность проведенных экспериментальных измерений.

Полученные экспериментальные результаты позволяют построить профили компонент скорости несущего потока на входном радиусе зоны сепарации, которые приведены на рис. 11. Как видно из графиков, увеличение скорости вращения ротора ВЦК приводят к увеличению относительной величины начальной закрутки и уменьшению аксиальной и радиальной компонент скорости, причем некоторое

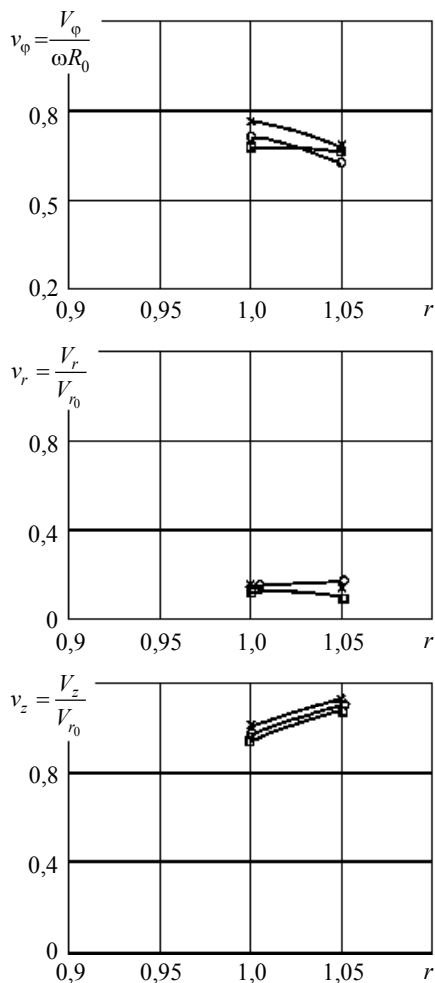


Рис. 10. Распределение компонент вектора скорости несущей среды по линии e (рис. 4) Re_{ω} : $\times$ – $2,7 \cdot 10^5$; $\square$ – $4,5 \cdot 10^5$; $\circ$ – $5,4 \cdot 10^5$

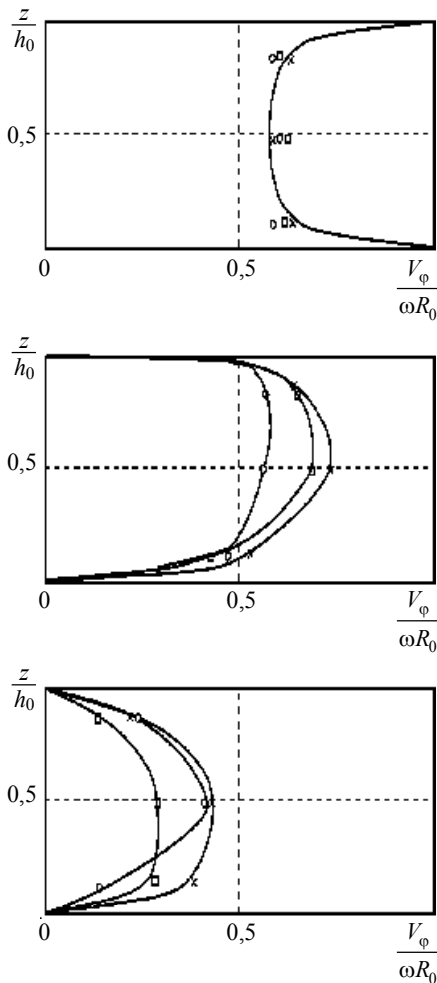


Рис. 11. Профили составляющих компонент вектора скорости несущей среды на входном радиусе зоны сепарации ВЦК-1000 Re_{ω} : $\times$ – $2,7 \cdot 10^5$; $\square$ – $4,5 \cdot 10^5$; $\circ$ – $5,4 \cdot 10^5$

уменьшение радиальной составляющей скорости вызвано падением расхода вследствие увеличения сопротивления аппарата при ускорении вращения ротора.

Экспериментальные измерения входного участка зоны сепарации ВЦК шаровым зондом обеспечивает задание граничных условий для расчета аэродинамики сепарационного элемента [8]. Результаты такого расчета представлены на рис. 12, где символами обозначены опытные данные.

По результатам представленных в статье экспериментальных исследований аэродинамики зоны сепарации ВЦК могут быть сделаны следующие выводы.

1. Проведены измерения основных характеристик потока ВЦК в реальных условиях и установлены закономерности основных параметров.
2. На аэродинамику зоны сепарации оказывают влияние как конструктивно-геометрические, так и рабочие параметры ВЦК.

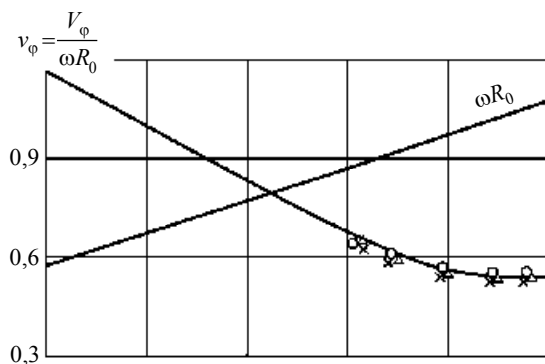


Рис. 12. Распределение среднеинтегральной окружной скорости по радиусу сепарационного элемента ВЦК-1000 Re_ω : $\times$ — $2,7 \cdot 10^5$; Δ — $4,5 \cdot 10^5$; $\circ$ — $5,4 \cdot 10^5$

3. Для исключения образования циркуляционного движения несущей среды дополнительный подвод воздуха на периферию зоны сепарации следует осуществлять через сопла, направленные по ходу вращения ротора.

4. Для обеспечения регулирования начальной закрутки несущей среды на входе в зону сепарации необходима аксиальная подача основного потока через обтекатель ротора с радиальными лопатками. Величина начальной закрутки в этом случае составляет 0,5 – 0,7 от скорости вращения границ зоны сепарации на входном радиусе.

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

6. С помощью шарового зонда на ВЦК с производительностью до 2000 кг/ч получены распределения тангенциальной, аксиальной и радиальной компонент скорости несущей среды по радиусу и высоте входного участка зоны сепарации.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Сосновский Н.Д., Шваб А.В., Зятков 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. Зятков 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. Зятков П.Н., Росляк А.Т., Кузнецов Г.В. Исследование турбулентного закрученного потока во вращающемся сепарационном элементе переменного сечения // Теплофизика и аэромеханика. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. Т. 16. № 2. С. 253–259.

6. Петунин А.М. Методы и техника измерений параметров газового потока. М.: Машиностроение, 1972. 212 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. Шваб А.В., Зятиков П.Н., Садретдинов Ш.Р., Чепель А.Г. Исследование закрученного турбулентного течения в рабочей зоне воздушного-центробежного классификатора // ПМТФ. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2010. Т. 51. № 2 С. 253–259.

Статья принята в печать 27.10.2010г.

Zyatikov P.N. EXPERIMENTAL STUDIES OF SWIRLING FLOW AERODYNAMICS IN AN AIR-CENTRIFUGAL CLASSIFIER. Distribution of the components of the carrying flow velocity vector in the separating element of the air-centrifugal powder classifier with capacity of up to 2000 kg/h (VPO-1000) was studied experimentally. The results of the experimental studies complement the mathematical model of rotor aerodynamics of a turbulent flow in a profiled rotating separator element and make it possible to analyze the flow in the separation zone.

Keywords: Turbulent swirling flow, separation zone, initial twist, profile of a channel, circumferential and radial velocity components, experimental bench, ball probe, dust and gas stream.

ZYATIKOV Pavel Nikolaevich (Tomsk State University)

E-mail: zpn Pavel@sibmail.com