



Научная статья
2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий (технические науки)
УДК: 621.928.6
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.02.015



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ УПРОЩЕННОЙ МОДЕЛИ МУЛЬТИВИХРЕВОГО КЛАССИФИКАТОРА С СООСНО РАСПОЛОЖЕННЫМИ ТРУБАМИ

Вадим Эдуардович Зинуров¹, Ильнур Наилович Мадышев²,
Айгуль Айратовна Каюмова³, Ксения Сергеевна Моисеева⁴

^{1, 2, 3, 4} Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия
² Казанский национальный исследовательский технологический институт, Казань, Россия
¹ vadd_93@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1380-4433>
² ilnyr_91@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9513-894X>
³ ovakayum@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4724-741X>
⁴ kseniyamoiseeva_s@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5980-3188>

Аннотация. Важной задачей при производстве мелкодисперсного сыпучего материала на основе силикагеля является получение узкой фракции порошка требуемой дисперсности. Существующие аппараты ввиду требуемой дисперсности сыпучего порошка, технологических и других параметров не всегда позволяют это осуществлять. В работе рассмотрены различные классификаторы. Показаны их недостатки для проведения фракционирования сыпучего материала на основе силикагеля на предприятии «Салаватский катализаторный завод». Авторами работы была предложена конструкция мультिवихревого классификатора для получения порошка размером от 10 до 40 мкм. Целью данной работы является получение экспериментальной зависимости гидравлического сопротивления упрощенной модели мультिवихревого классификатора от средней скорости движения газового потока. Представлены 3 упрощенные модели мультिवихревого классификатора. Представлена схема экспериментальной установки. Описана методика проведения экспериментов. На основе проведенной работы были сделаны следующие выводы: 1) потери давления в упрощенных моделях мультिवихревого классификатора составляют от 6 до 670,5 Па при входной средней скорости газового потока от 4,1 до 23,6 м/с; 2) максимальное гидравлическое сопротивление соответствует первой модели с наибольшим количеством местных сопротивлений – прямоугольных щелей; 3) получены уравнения гидравлического сопротивления и коэффициентов гидравлического сопротивления от средней скорости движения газового потока для 3 моделей мультिवихревого классификатора; 4) качественно получено, что существует критический эквивалентный диаметр межтрубного пространства, отражающий начало разрушения вихревой структуры в мультिवихревом классификаторе. Данный фактор приводит к увеличению гидравлического сопротивления аппарата.

Ключевые слова: классификатор, разделение сыпучего материала, силикагель, классификация, фракционирование порошка, мелкодисперсные частицы, циклонный сепаратор, сепарация, мелкодисперсный порошок, центробежный классификатор, аэродинамическая классификация.

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МК-2710.2021.4.

Для цитирования: Экспериментальное определение гидравлического сопротивления упрощенной модели мультिवихревого классификатора с соосно расположенными трубами / В. Э. Зинуров [и др.]. // Ползуновский вестник. 2022. № 2. С. 108–116. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.02.015. EDN: <https://elibrary.ru/ktmjrk>.

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF HYDRAULIC RESISTANCE OF A SIMPLIFIED MODEL OF A MULTI VORTEX CLASSIFIER WITH COAXIALLY ARRANGED PIPES

Vadim E. Zinurov ¹, Ilnur N. Madyshev ², Aigul A. Kayumova ³,
Kseniya S. Moiseeva ⁴

^{1, 2, 3, 4} Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

² Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

¹ vadd_93@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1380-4433>

² ilnyr_91@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9513-894X>

³ ovakayum@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4724-741X>

⁴ kseniyamoiseeva_s@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5980-3188>

Abstract. An important task in the production of fine bulk material based on silica gel is to obtain a narrow fraction of the powder of the required dispersion. Existing devices, due to the required dispersion of bulk powder, technological and other parameters, do not always allow this to be done. The paper considers various classifiers. Their disadvantages for carrying out fractionation of bulk material based on silica gel at the Salavat Catalyst Plant are shown. The authors of the work proposed the design of a multi-vortex classifier for obtaining powder in size from 10 to 40 microns. The aim of this work is to obtain an experimental dependence of the hydraulic resistance of a simplified model of a multi-vortex classifier on the average velocity of the gas flow. 3 simplified models of the multi-vortex classifier are presented. The scheme of the experimental setup is presented. The method of conducting experiments is described. Based on the work carried out, the following conclusions were drawn. 1) Pressure losses in simplified models of a multi-vortex classifier range from 6 to 670.5 Pa at an input average gas flow velocity of 4.1 to 23.6 m/s. 2) The maximum hydraulic resistance corresponds to the first model with the largest number of local resistances - rectangular slots. 3) The equations of hydraulic resistance and coefficients of hydraulic resistance from the average velocity of the gas flow are obtained for 3 models of the multi-vortex classifier. 4) It is qualitatively obtained that there is a critical equivalent diameter of the inter-tube space, reflecting the beginning of the destruction of the vortex structure in the multi-vortex classifier. This factor leads to an increase in the hydraulic resistance of the device.

Keywords: classifier, bulk material separation, silica gel, classification, powder fractionation, fine particles, cyclone separator, separator, fine powder, centrifugal classifier, aerodynamic classification.

Acknowledgements: the study was supported by the grant of the President of the Russian Federation No. MK-2710.2021.4.

For citation: Zinurov, V. E., Madyshev, I. N., Kayumova, A. A. & Moiseeva, K. S. (2022). Experimental determination of hydraulic resistance of a simplified model of a multi vortex classifier with coaxially arranged pipes. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 108-116. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.02.015.

В настоящее время для получения узких мелкодисперсных фракций сыпучего материала на основе силикагеля актуальной задачей является разработка новых классификаторов – аппаратов, позволяющих производить фракционирование твердых частиц по крупности [1–4]. Силикагель используется на многих химических, нефтехимических и других промышленных объектах [5]. Порошок представляет собой адсорбент, который применяется для осушки и очистки сред, склон-

ных к разложению и полимеризации, отбензинивания природного газа на установках подготовки газа к транспорту и для других целей [6]. На данный момент основным производителем силикагеля на территории Российской Федерации является промышленное предприятие «Салаватский катализаторный завод» [7]. Повышение качественных характеристик, таких как влагостойкость, сорбционная емкость и др., выпускаемого силикагеля предприятием, является важной задачей.

Одним из решений является улучшение селективности классификаторов, что позволит получать фракции требуемой дисперсности с минимальным количеством в них гранулометрических фракций иных диапазонов, что достигается за счет создания упорядоченной вихревой структуры [8–11]. Также повышение селективности классификаторов будет способствовать ресурсо- и энергосбережению, как в конкретной технологической линии производства силикагеля, так и на текущем предприятии в целом. На данный момент актуальной задачей на предприятии является получение сыпучего материала на основе силикагеля дисперсностью 10–40 мкм [12].

На текущий момент известно большое количество аппаратов для разделения сыпучих материалов на различные гранулометрические фракции по крупности. Их можно разделить на три основные группы: центробежные, гравитационные и ситовые.

Гравитационные классификаторы предназначены для разделения сыпучего материала в жидкой или воздушной среде. Фракционирование сыпучего материала осуществляется под действием силы тяжести. Наиболее известными гравитационными классификаторами являются реечные, спиральные, дражные, чашевые, гидросциляторы и др. Данные аппараты предназначены для фракционирования частиц с граничным зерном, как правило, равным более 80 мкм [13, 14].

Ситовый классификатор представляет собой корпус с набором сит. При этом пористость сита подбирается индивидуально. Ключевым фактором является следующее правило: порошок может проходить через сито, если размер частиц меньше, чем поры сетки, в противном случае частицы порошка остаются на сетке, если их размер больше пор сетки. Сита подразделяются на статические и вибрационные. Ситовые классификаторы предназначены для фракционирования частиц с граничным зерном, как правило, более 40–60 мкм [15, 16].

Центробежные классификаторы производят разделение сыпучего материала за счет возникновения центробежных сил. Данные аппараты подразделяются на две группы: статические и динамические. Первая группа аппаратов не имеет в своей конструкции подвижных элементов, вторая, соответственно, имеет. Центробежные классификаторы предназначены для фракционирования частиц с граничным зерном, как правило, более 10–20 мкм [17, 18].

Как видно, для решения поставленной задачи гравитационные и ситовые классифи-

каторы не могут применяться, так как в большинстве случаев предназначены для более крупных фракций, относительно требуемой дисперсности от 10 до 40 мкм. Центробежные классификаторы могут быть использованы для решения поставленной задачи. Однако большой сложностью применимости данных аппаратов в технологической линии является большая вероятность получения гранулометрических фракций другой дисперсности. Это связано с тем, что заявленные характеристики аппаратов получены при определенных теплофизических и технологических параметрах. Вследствие этого была задача разработки нового классификатора для получения порошка дисперсностью от 10 до 40 мкм.

Авторами работы был разработан новый мультивихревой классификатор [19]. Особенностью данного аппарата является создание множества вихрей в межтрубном пространстве, которые относительно маленького диаметра, что позволяет получать высокие центробежные силы. При этом конструктивные параметры подобраны таким образом, что соседние вихри имели точки соприкосновения, в которых вектора скорости сонаправлены. Таким образом, вихри друг друга поддерживают по высоте межтрубного пространства. Данный аппарат был внедрен на промышленном предприятии «Салаватский катализаторный завод» и в ходе промышленных испытаний показал высокую селективность, составляющую на 12–15 % больше, чем у используемого циклонного сепаратора-классификатора. На данный момент на предприятии используются две модели мультивихревого классификатора. На текущий момент времени стоит задача повышения селективности мультивихревого классификатора. Для этого необходимо детальное изучение газодинамики внутри мультивихревого классификатора. Как известно, для уменьшения финансовых и временных затрат исследователи прибегают к численному моделированию в различных программных пакетах: Ansys Fluent, Solidworks Flow Simulation, Flow Vision и др. Однако на первом этапе необходимо производить верификацию численной модели с результатами лабораторного или промышленного эксперимента. Вследствие этого целью данной работы является получение экспериментальной зависимости гидравлического сопротивления упрощенной модели мультивихревого классификатора от средней скорости движения газового потока.

Для получения экспериментальной выборки данных были изготовлены 3 трехмерные упрощенные модели мультивихревого

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ УПРОЩЕННОЙ МОДЕЛИ МУЛЬТИВИХРЕВОГО КЛАССИФИКАТОРА С СООСНО РАСПОЛОЖЕННЫМИ ТРУБАМИ

классификатора, отличающиеся диаметром внешней цилиндрической трубы, количеством прямоугольных отверстий во внутренней цилиндрической трубе и их шириной. Упрощением данной модели является отсутствие бункера и бокового выходного отверстия. Стоит отметить, что трехмерные модели были распечатаны на 3D принтере из PLA пластика (рисунок 1). Температура эксплуатации составляет от $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$. При этом температура размягчения составляет $50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Таким образом, деформация модели в ходе экспериментов при температуре окружающей среды, равной около $23\text{--}30\text{ }^{\circ}\text{C}$, исключалась. Методика расчета конструктивных параметров упрощенных моделей мультिवихревого классификатора представлена в работе [20]. Принцип действия каждой модели заключается в следующем: газовая среда входит в устройство через входной центральный патрубок, далее движется по внутренней трубе вниз до прямоугольных отверстий, которые проделаны в нижней части трубы осесимметрично. Газовый поток в равных долях проходит через прямоугольные щели. При выходе из каждой прямоугольной щели струя газа разделяется на две, каждая из которых движется в противоположную сторону относительно друг друга и образует вихрь в межтрубном пространстве (рисунок 1).

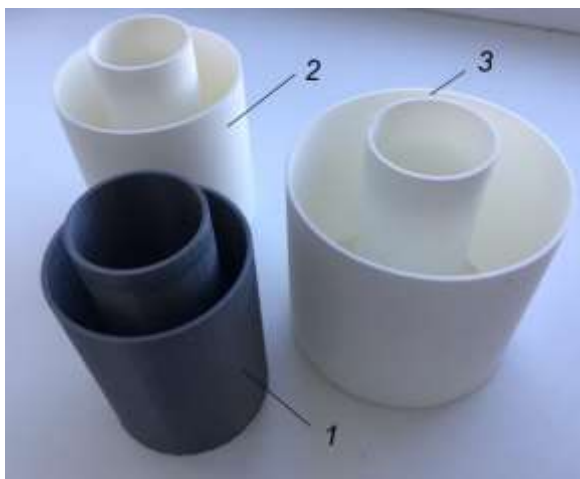


Рисунок 1 – Упрощенные модели мультिवихревого классификатора с соосно расположенными трубами: 1 – первая модель; 2 – вторая модель; 3 – третья модель

Figure 1 - Simplified models of a multi-vortex classifier with coaxially arranged trusses:
1 - the first model, 2 - the second model,
3 - the third model

Так, образуется множество вихрей в межтрубном пространстве устройства, которые движутся по нему к выходу из устройства. Следует отметить, что вихри при своем движении практически не контактируют с поверхностями стенок, кроме областей около внутренней и внешней цилиндрических труб, что позволяет достичь минимального гидравлического сопротивления устройства (рисунок 1).

В ходе создания упрощенных моделей мультिवихревого классификатора принимались следующие постоянные геометрические параметры: высота внутренней цилиндрической трубы – 130 мм, внутренний диаметр внутренней цилиндрической трубы – 50 мм, толщина стенок – 2 мм, высота прямоугольных щелей – 30 мм.

В зависимости от исследуемой модели часть геометрических параметров варьировалась: внутренний диаметр внешней трубы – 80 мм (1 модель), 100 мм (2 модель) и 120 мм (3 модель), количество прямоугольных отверстий во внутренней цилиндрической трубе – 8 шт. (1 модель), 5 шт. (2 модель) и 4 шт. (3 модель), ширина прямоугольной щели – 4 мм (1 модель), 15 мм (2 модель) и 19 мм (3 модель).

Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 2. Проведение ряда экспериментов осуществлялось следующим образом. С помощью вентилятора 1 подавался воздух в линию движения газового потока 2. Далее газ проходил через ресивер 3, в нем было проделано 36 отверстий, которые можно было открывать и перекрывать. В ходе проведения экспериментов их постепенно открывали с целью сброса потока газа в окружающую среду, тем самым, уменьшая скорость газа в линии 2. После ресивера 3 газ поступал в трубу Вентури 4, в узкой и широкой частях которой измерялась разница давлений Δp_v , Па с помощью дифференциального манометра 6. Давление окружающей среды p_{out} , Па принималось равным 101325. Труба Вентури 4 позволяла рассчитать массовый расход газа G_m , кг/с в линии 2. Далее газовый поток поступал в упрощенную модель мультिवихревого классификатора с соосно расположенными трубами 5. Для определения гидравлического сопротивления классификатора в линии движения газового потока 2 перед ним устанавливался дифференциальный манометр 7. При этом показания дифференциальных манометров 6 и 7 передавались вычислительному компьютеру 8 с периодичностью в 1 с (рисунок 2).

Марка дифференциальных манометров 6 и 7 – testo 510i (рисунок 2). Технические характеристики измерительных приборов: диапазон измерений от -150 до +150 гПа, погрешность составляет $\pm 0,05$ гПа (0–1 гПа), $\pm (0,02$ гПа + 1,5 % от изм. знач.) (1–150 гПа).

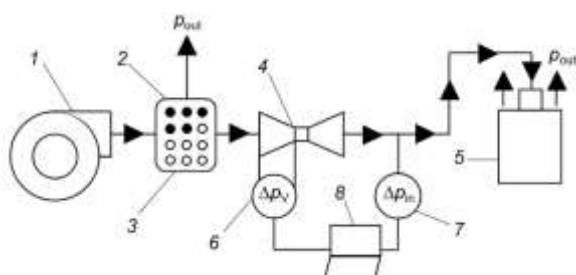


Рисунок 2 – Схема экспериментальной установки для определения гидравлического сопротивления упрощенной модели мультивихревого классификатора: 1 – вентилятор; 2 – линия движения газового потока; 3 – ресивер; 4 – труба Вентури; 5 – упрощенная модель мультивихревого классификатора; 6, 7 – дифференциальные манометры; 8 – вычислительный компьютер

Figure 2 - Scheme of an experimental installation for determining the hydraulic resistance of a simplified model of a multi-vortex classifier: 1 - fan, 2 - gas flow line, 3 - receiver, 4 - Venturi pipe, 5 - simplified model of a multi-vortex classifier, 6, 7 - differential pressure gauges, 8 - computer

Следует отметить, что труба Вентури 4 в экспериментальной установке также была распечатана на 3D принтере (рисунок 2). Ее конструирование осуществлялось по ГОСТу 8.586.4-2005 ГСИ. «Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 4. Трубы Вентури» [21].

Массовый расход газового потока определялся по следующей формуле:

$$G_m = 0,00077C\varepsilon\Delta p^{0,5}, \quad (1)$$

где C – коэффициент истечения; ε – коэффициент расширения.

Коэффициент истечения C рассчитывался по выражению (2):

$$\begin{cases} C = 1,009 \left(\beta \frac{10^6}{Re} \right)^{-0,013} & Re < 5 \cdot 10^5 \beta; \\ C = 0,9950 & \text{при } 5 \cdot 10^5 \beta \leq Re < 10^6 \beta; \\ C = 1,000 & \text{при } 10^6 \beta \leq Re < 2 \cdot 10^6 \beta; \\ C = 1,010 & \text{при } 2 \cdot 10^6 \beta \leq Re < 10^8 \beta, \end{cases} \quad (2)$$

где β – относительный диаметр отверстия, принимался равным 0,5; Re – число Рейнольдса.

Коэффициент расширения ε рассчитывался по следующей формуле:

$$\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{kT^{\frac{2}{k}}}{k-1} \right) \left(\frac{1-\beta^4}{1-\beta^4 T^{\frac{2}{k}}} \right) \left(\frac{1-T^{\frac{k-1}{k}}}{1-T} \right)}, \quad (3)$$

где $T = 1 - \Delta p / p_{out}$; k – показатель адиабаты.

Число Рейнольдса Re рассчитывалось по выражению:

$$Re = \frac{4 G_m}{\pi D \mu}, \quad (4)$$

где D – внутренний диаметр входного патрубка; μ – динамическая вязкость газа, Па·с.

Среднерасходная скорость газового потока в экспериментальной установке рассчитывалась по выражению (5):

$$W = \frac{4G_m}{\rho \pi D^2}, \quad (5)$$

где ρ – плотность газовой среды, кг/м³.

Гидравлическое сопротивление упрощенной модели мультивихревого классификатора с соосно расположенными трубами Δp Па рассчитывалось по формуле:

$$\Delta p = p_{in} - p_{out}, \quad (6)$$

где p_{in} – давление на входе в мультивихревой классификатор, Па (рисунок 2).

Коэффициент гидравлического сопротивления ξ упрощенной модели мультивихревого классификатора рассчитывался по выражению:

$$\xi = \frac{2\Delta p}{\rho W^2}. \quad (7)$$

Результаты экспериментальных исследований показали, что потери давления в рассмотренных упрощенных моделях мультивихревого классификатора составляют от 6 до 670,5 Па при входной средней скорости газового потока от 4,1 до 23,6 м/с. Максимальное гидравлическое сопротивление соответствует 1 модели с наименьшей площадью межтрубного пространства и наибольшим количеством прямоугольных щелей. С одной стороны, относительно высокое гидравлическое сопротивление 1 модели относительно двух других объясняется более сложной конструкцией: наличием большего количества местных сопротивлений – прямоугольных щелей в количестве 8 шт. в нижней части внутренней цилиндрической трубы. С другой стороны, создается 16 упорядоченных вихрей в межтрубном пространстве с минимальным диаметром, так как площадь межтрубного пространства является

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 2 2022

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ УПРОЩЕННОЙ МОДЕЛИ МУЛЬТИВИХРЕВОГО КЛАССИФИКАТОРА С СООСНО РАСПОЛОЖЕННЫМИ ТРУБАМИ

наименьшей среди всех моделей, что позволяет достигать центробежные силы высоких значений. Анализ значений гидравлических сопротивлений 2 и 3 моделей свидетельствует о том, что увеличение диаметра внешней цилиндрической трубы при неизменном диаметре внутренней трубы, соответственно, и увеличению площади межтрубного пространства и уменьшению количества прямоугольных щелей не всегда приводит к увеличению потери давления в устройстве. Например, для 1 модели при скорости газа, равной 4,1–12,1 м/с, потери давления составляют 74,9–670,5 Па, для 2 модели при скорости газа в диапазоне 4,8–23,1 м/с потери давления составляют 6–148 Па, для 3 модели при скорости газа, равной 5,1–23,6 м/с, потери давления составляют 7–165 Па (рисунки 3–5).

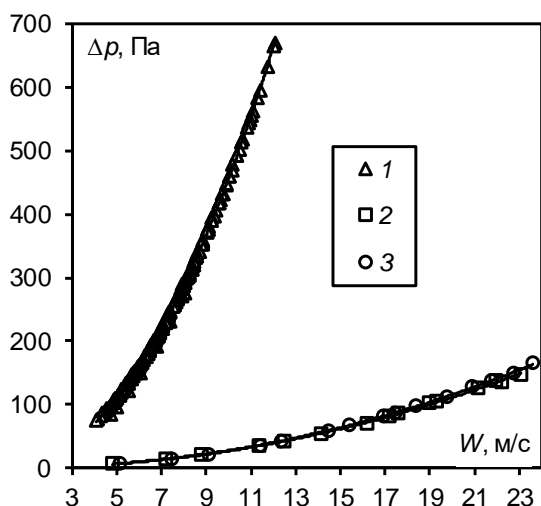


Рисунок 3 – Зависимость гидравлического сопротивления упрощенной модели мультивихревого классификатора от средней входной скорости газового потока: 1 – первая модель; 2 – вторая модель; 3 – третья модель

Figure 3 - The dependence of the hydraulic resistance of the simplified model of the multi-vortex classifier on the average input velocity of the gas flow: 1 - the first model, 2 - the second model, 3 - the third model

Сравнение гидравлических сопротивлений 1 и 2 моделей показывает, что уменьшение количества прямоугольных щелей приводит к снижению потери давления в устройствах. При сравнении 2 и 3 моделей эффект обратный. Это объясняется нарушением вихревой структуры в межтрубном пространстве – часть вихрей приобретают неупорядоченную структуру. В результате газ начинает

двигаться сплошным хаотичным потоком, что приводит к увеличению трения между газом и поверхностями стенок цилиндрических труб (рисунки 3–5).

Гидравлические сопротивления Δp_1 , Δp_2 и Δp_3 упрощенных моделей 1, 2 и 3 мультивихревого классификатора от входной скорости газового потока описываются следующими уравнениями (рисунок 3):

$$\begin{cases} \Delta p_1 = 4,12W^{2,05}; \\ \Delta p_2 = 0,22W^{2,07}; \\ \Delta p_3 = 0,23W^{2,08}. \end{cases} \quad (8)$$

Для наглядной визуализации значений коэффициентов гидравлических сопротивлений 1, 2 и 3 моделей результаты были представлены на двух отдельных графиках (рисунки 4 и 5).

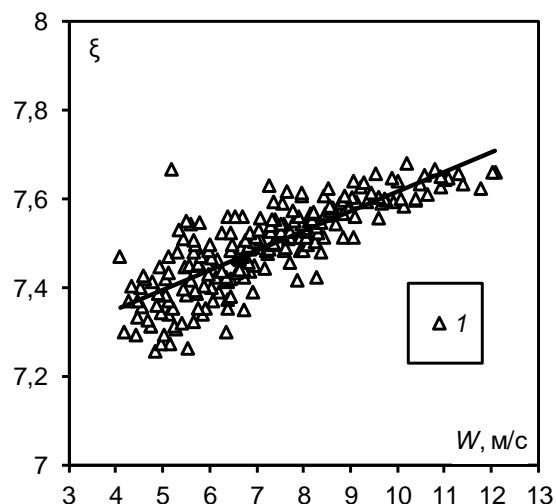


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления упрощенной модели мультивихревого классификатора от средней входной скорости газового потока: 1 – первая модель

Figure 4 - The dependence of the hydraulic resistance coefficient of the simplified model of the multi-vortex classifier on the average input velocity of the gas flow: 1 - the first model

Коэффициенты гидравлических сопротивлений ξ_1 , ξ_2 и ξ_3 упрощенных моделей 1, 2 и 3 мультивихревого классификатора от входной скорости газового потока описываются следующими уравнениями (рисунки 4 и 5):

$$\begin{cases} \xi_1 = 0,045W + 7,17; \\ \xi_2 = 0,003W + 0,41; \\ \xi_3 = 0,003W + 7,43. \end{cases} \quad (9)$$

Таким образом, проведенные исследования показали, что устойчивость и структурированность вихревой структуры в межтрубном пространстве упрощенной модели мультивихревого классификатора непосредственным образом влияет на гидравлическое сопротивление аппарата в целом. Иными словами, существует критический эквивалентный диаметр межтрубного пространства, отражающий начало разрушения вихревой структуры в мультивихревом классификаторе. В данной работе этот аспект был продемонстрирован качественно на основе экспериментов.

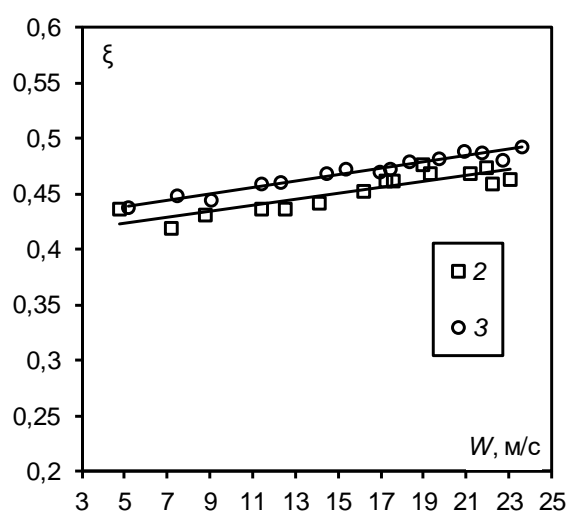


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления упрощенной модели мультивихревого классификатора от средней входной скорости газового потока: 2 – вторая модель; 3 – третья модель

Figure 5 - The dependence of the hydraulic resistance coefficient of the simplified model of the multi-vortex classifier on the average input velocity of the gas flow: 2 - the second model, 3 - the third model

В перспективе на основе численного моделирования данный параметр можно получить в числовом диапазоне. При этом верификация численной модели будет производиться сравнением с экспериментальными данными, полученными в этой работе.

На основе проведенной работы можно сделать следующие выводы:

1) потери давления в упрощенных моделях мультивихревого классификатора составляют от 6 до 670,5 Па при входной средней скорости газового потока от 4,1 до 23,6 м/с;

2) максимальное гидравлическое сопротивление соответствует 1 модели с наибольшим количеством местных сопротивлений – прямоугольных щелей;

3) получены уравнения гидравлического сопротивления и коэффициентов гидравлического сопротивления от средней скорости движения газового потока для 3 моделей мультивихревого классификатора;

4) качественно получено, что существует критический эквивалентный диаметр межтрубного пространства, отражающий начало разрушения вихревой структуры в мультивихревом классификаторе. Данный фактор приводит к увеличению гидравлического сопротивления аппарата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ширинова Д.Б. Классификация полидисперсного порошка молебденита // Евразийский научный журнал. 2016. № 2. С. 127–128.
2. Капустин Ф.Л., Пономарев В.Б. Получение обогащенного песка из отсеков дробления горных пород на пневматическом классификаторе // Обогащение руд. 2016. № 4(364). С. 56–60. DOI 10.17580/or.2016.04.09.
3. Мякинков А.Г. Технологические возможности многофракционного гравитационного классификатора [Для разделения сыпучих материалов на фракции в комбикормовом производстве] // Пищевая и перерабатывающая промышленность. Реферативный журнал. 2000. № 1. С. 66.
4. Рыбалко Р.И., Гуцин О.В. Исследования процессов аэродинамической классификации сыпучих материалов в двухстадийном сепараторе // Интерстроймех-2016 (Internationalbuilding technics-2016). 2016. С. 129–136.
5. Use of Silica Gel Chemically Modified with Mercapto Groups for the Extraction, Preconcentration, and Spectroscopic Determination of Palladium / V.N. Losev, Yu.V. Kudrina, N.V. Maznyak, A.K. Trofimchuk // Journal of Analytical Chemistry. 2003. Vol. 58. No 2. P. 124–128. DOI 10.1023/A:1022345702703.
6. Пахнутаева Е.А., Слизов Ю.Г. Физико-химические свойства сорбента на основе силикагеля с привитым комплексом медьацетоуксусного эфира // Сорбционные и хроматографические процессы. 2021. Т. 21. № 4. С. 529–539. DOI 10.17308/sorpchrom.2021.21/3637.
7. Скот 3 обеспечил перевод экспортных газопроводов "Газпрома" на российский адсорбент // Газовая промышленность. 2018. № 5 (768). С. 69.
8. Повышение эффективности аспирационных систем при обработке крахмалистого сырья / В.Э. Зинуров, А.В. Дмитриев, Р.Р. Мубаракшина // Ползуновский вестник. 2020. № 2. С. 18–22.
9. Classification of bulk material from the gas flow in a device with coaxially arranged pipes / V.E. Zinurov, A.V. Dmitriev, M.A. Ruzanova, O.S. Dmitrieva // E3S Web of Conferences. 2020. P. 01056. DOI 10.1051/e3sconf/202019301056.

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ
УПРОЩЕННОЙ МОДЕЛИ МУЛЬТИВИХРЕВОГО КЛАССИФИКАТОРА
С СООСНО РАСПОЛОЖЕННЫМИ ТРУБАМИ**

10. Influence of process parameters on capturing efficiency of rectangular separator / V. Zinurov, A. Dmitriev, V. Kharkov // Proceedings of ITNT 2020 6th IEEE International Conference on Information Technology and Nanotechnology. 2020. P. 9253320. DOI: 10.1109/ITNT49337.2020.9253320.

11. Подоляко, В.И., Тарасов Б.Т. Совершенствование процесса воздушной классификации проб зерна // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2010. Т. 63. №. 1. С. 61–66.

12. Численное моделирование газодинамики в центробежном классификаторе / В.Э. Зинуров, А.В. Дмитриев, Н.Ф. Сахибгареев, Д.Н. Латыпов, М.Г. Гарипов // Вестник технологического университета. 2021. Т. 24. № 12. С. 128–132.

13. Двухпоточный гравитационный пневматический классификатор сыпучих смесей / И.М. Старшов, М.И. Старшов, Х.Э. Харлампики // Вестник Казанского технологического университета. 2009. № 5. С. 327–332.

14. Влияние поперечной неоднородности потока газа на кривую разделения гравитационного классификатора / Е.А. Шуина, В.Е. Мизонов, Р.Ш. Мисбахов // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2015. № 5. С. 60–63. DOI 10.17588/2072-2672.2015.5.060-063.

15. Повышение производительности ситовых барабанных классификаторов / А.Л. Фалько, А.В. Крывошея, Е.А. Чернышева, В.Ю. Щербаков // Вестник Донского государственного аграрного университета. 2015. № 4–1(18). С. 54–61.

16. Анализ качества измельченного зерна при использовании дробилок открытого и закрытого типов / В.И. Ширококов, О.С. Федоров, А.Г. Ипатов // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. 2019. № 2(58). С. 69–74.

17. Шуляк В.А., Киркор М.А. Центробежная классификация пищевых порошков // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2005. № 2–3. С. 91–93.

18. Численные исследования закрученного турбулентного течения в сепарационной зоне воздушно-центробежного классификатора / А.В. Шваб, П.Н. Зятиков, Ш.Р. Садретдинов, А.Г. Чепель // Прикладная механика и техническая физика. 2010. Т. 51. № 2(300). С. 39–48.

19. Патент на полезную модель № 201604 U1 Российская Федерация, МПК В01D 45/04, В04С 5/103. Пылеуловитель-классификатор с соосно расположенными трубами: № 2020128520: заявл. 26.08.2020: опубл. 23.12.2020 / А.В. Дмитриев, О.С. Дмитриева, И.Н. Мадышев [и др.].

20. Разработка классификатора с соосно расположенными трубами для разделения сыпучего материала на основе силикагеля / В.Э. Зинуров, И.Н. Мадышев, А.Р. Ивахненко, И.В. Петрова // Ползунковский вестник. 2021. № 2. С. 205–211.

21. ГОСТ 8.586.4-2005. ГСИ. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Трубы Вентури. Дата введения 2007-01-01. Москва: Стандартинформ.

Информация об авторах

В. Э. Зинуров – ассистент кафедры «Теоретические основы теплотехники» Казанского государственного энергетического университета.

И. Н. Мадышев – кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры «Оборудование пищевых производств» Казанского национального исследовательского технологического университета.

А. А. Каюмова – студент кафедры «Экономика и организация производства» Казанского государственного энергетического университета.

К. С. Моисеева – студент кафедры «Теоретические основы теплотехники» Казанского государственного энергетического университета.

REFERENCES

1. Shirinova, D.B. (2016). Classification of poly-dispersed molybdenite powder. *Eurasian Scientific Journal*, (2). 127-128. (In Russ.).

2. Kapustin, F.L. & Ponomarev, V.B. (2016). Obtaining enriched sand from rock crushing screenings on a pneumatic classifier. *Ore enrichment*, 4(364), 56-60. DOI 10.17580/or.2016.04.09. (In Russ.).

3. Myakinkov, A.G. (2000). Technological capabilities of a multi-fractional gravity classifier [For separating bulk materials into fractions in feed production]. *Food and processing industry. Abstract journal*, (1), P. 66. (In Russ.).

4. Rybalko, R.I. & Gushchin O.V. (2016). Studies of the processes of aerodynamic classification of bulk materials in two-tiers in a two-stage separator. *Interstroyemeh-2016 (International building techniques-2016)*. 129-136. (In Russ.).

5. Losev, V.N., Kudrina, Yu.V., Maznyak, N.V. & Trofimchuk A.K. (2003). Use of Silica Gel Chemically Modified with Mercapto Groups for the Extraction, Preconcentration, and Spectroscopic Determination of Palladium. *Journal of Analytical Chemistry*, 58(2), 124-128. DOI 10.1023/A:1022345702703.

6. Pakhnutova, E.A. & Slizhov, Yu.G. (2021). Physico-chemical properties of a sorbent based on silica gel with a grafted complex of copper acetoacetic ether. *Sorption and chromatographic processes*, 21(4), 529-539. DOI 10.17308/sorpchrom.2021.21/3637. (In Russ.).

7. Scat 3 ensured the transfer of Gazprom's export gas pipelines to the Russian adsorbent. (2018). *Gas Industry*, 5(768), 69. (In Russ.).

8. Zinurov, V.E., Dmitriev, A.V. & Mubarakshina, R.R. (2020). Improving the efficiency of aspiration systems in the processing of starchy raw materials. *Polzunovsky Vestnik*, (2), 18-22. (In Russ.).

9. Zinurov, V.E., Dmitriev, A.V., Ruzanova, M.A. & Dmitrieva, O.S. (2020). Classification of bulk material from the gas flow in a device with coaxially ar-

ranged pipes. *E3S Web of Conferences*. P. 01056. DOI 10.1051/e3sconf/202019301056.

10. Zinurov, V., Dmitriev, A. & Kharkov V. (2020). Influence of process parameters on capturing efficiency of rectangular separator. *Proceedings of ITNT 2020 - 6th IEEE International Conference on Information Technology and Nanotechnology*. P. 9253320. DOI: 10.1109/ITNT49337.2020.9253320.

11. Podolyako, V.I. & Tarasov, B.T. (2010). Improvement of the process of air classification of grain samples. *Bulletin of the Altai State Agrarian University*, 63(1), 61-66. (In Russ.).

12. Zinurov, V.E., Dmitriev, A.V., Sahibgareev, N.F., Latypov, D.N. & Garipov, M.G. (2021). Numerical modeling of gas dynamics one in a centrifugal classifier. *Bulletin of the Technological University*, 24(12), 128-132. (In Russ.).

13. Starshov, I.M., Starshov, M.I. & Kharlampidi H.E. (2009). Two-flow gravitational pneumatic classifier of bulk mixtures. *Bulletin of the Kazan Technological University*, (5), 327-332. (In Russ.).

14. Shuina, E.A., Mizonov, V.E. & Misbakhov, R.S. (2015). The influence of transverse inhomogeneity of the gas flow on the separation curve of the gravitational classifier. *Bulletin of the Ivanovo State Power Engineering University*, (5), 60-63. DOI 10.17588/2072-2672.2015.5.060-063. (In Russ.).

15. Falko, A.L., Kryvosheya, A.V., Chernysheva, E.A. & Shcherbakov, V.Y. (2015). Improving the performance of network drum classifiers. *Bulletin of the Don State Agrarian University*, 4-1(18), 54-61. (In Russ.).

16. Shirobokov, V.I., Fedorov, O.S. & Ipatov A.G. (2019). Analysis of the quality of crushed grain when using open and closed type crushers. *Bulletin of the Izhevsk State Agricultural Academy*, 2(58), 69-74. (In Russ.).

17. Shulyak, V.A. & Kirkor M.A. (2005). Centrifugal classification of food powders. *Izvestia of higher educational institutions. Food technology*, (2-3), 91-93. (In Russ.).

18. Shvab, A.V., Zyatikov, P.N., Sadretdinov, Sh.R. & Chepel A.G. (2010). Numerical studies of swirling turbulent flow in the separation zone of the air-centrifugal classifier. *Applied Mechanics and technical Physics*, 51(2(300)), 39-48. (In Russ.).

19. Dmitriev, A.V., Dmitrieva, O.S., Madyshev, I.N. [et al.] (2020). Dust collector-classifier with coaxially arranged pipes. Patent 201604 U1. *Russian Federation publ. of 23.12.2020*. (In Russ.).

20. Zinurov, V.E., Madyshev, I.N., Ivakhnenko, A.R. & Petrova, I.V. (2021). Development of a classifier with coaxially arranged pipes for separating a silicate-based material. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 205-211. (In Russ.).

21. State system for ensuring the uniformity of measurements. Measurements of liquids and gases flow rate and quantity by means of orifice instruments. Part 4. Venturi tubes. Technical requirements (2007). *HOST 8.586.4-2005 from 1 Jan. 2007*. Moscow : Standartinform. (In Russ.).

Information about the authors

V. E. Zinurov - assistant of the Department "Theoretical foundations of heat engineering" of Kazan State Power Engineering University.

I. N. Madyshev - candidate of technical Sciences, senior researcher of the Department "Equipment for food industry" of Kazan National Research Technological University.

A. A. Kayumova - student of the Department "Economics and organization of production" of Kazan State Power Engineering University.

K. S. Moiseeva - graduate student of the Department "Theoretical foundations of heat engineering" of Kazan State Power Engineering University.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.*

Статья поступила в редакцию 28.03.2022; одобрена после рецензирования 17.04.2022; принята к публикации 17.05.2022.

The article was received by the editorial board on 28 Mar 22; approved after reviewing on 17 Apr 22; accepted for publication on 17 May 22.