



Научная статья

2.6.13 – Процессы и аппараты химических технологий (технические науки)

УДК 621.928.6

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.035

EDN: HBOPON

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАПРАВЛЯЮЩИХ ДУГООБРАЗНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ МУЛЬТИВИХРЕВОГО ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЯ-КЛАССИФИКАТОРА

Вадим Эдуардович Зинуров ¹, Мария Арнольдовна Прец ²

^{1,2} Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

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

² precmari@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0009-4434-3906>

Аннотация. Одним из приоритетных направлений в области процессов и аппаратов химических технологий является разработка высокоэффективных аппаратов для фракционирования мелкодисперсных материалов. Актуальность темы обусловлена необходимостью повышения селективности при разделении частиц в таких отраслях, как нефтехимия и каталитическое производство. В статье предложена конструкция мультивихревого пылеуловителя-классификатора типа «труба в трубе». Разделение фракций осуществляется за счёт формирования серии закрученных вихрей в кольцевом пространстве между внутренней и наружной трубами, под действием которых более крупные частицы выносятся к периферии и осаждаются в бункере. Предполагается, что одним из факторов, ограничивающих эффективность такого аппарата, является отражение частиц от стенок кольцевого канала с последующим повторным захватом их потоком. Целью работы является оценка влияния направляющих дугообразных элементов, установленных в кольцевом пространстве аппарата, на эффективность мультивихревого пылеуловителя-классификатора. Выполнено численное моделирование газопылевого потока и траекторий движения частиц в трехмерной постановке с использованием программного комплекса ANSYS Fluent. Варьировались ключевые геометрические параметры: диаметр внутренней трубы (от 43 до 66 мм), степень раскрытия прямоугольных прорезей в стенке трубы (k от 0,2 до 1). В качестве критериев оценки использовались фракционная эффективность улавливания частиц в диапазоне размеров 5–100 мкм и потери давления на входе и выходе из аппарата. Результаты моделирования показали, что введение направляющих дугообразных элементов позволяет повысить фракционную эффективность классификатора в среднем на 10,9 % по сравнению с базовой конструкцией. Кроме того, зафиксировано снижение потери давления на 6,3 % за счёт стабилизации мультивихревой структуры потока и уменьшения рециркуляционных зон. Наибольший эффект наблюдается при расчетном диаметре вихрей 29 мм и степени раскрытия щелей $k = 0,6$, где эффективность улавливания частиц $a > 7$ мкм превышает 90 %.

Ключевые слова: мультивихревой классификатор, фракционирование, дисперсные частицы, направляющие элементы, вихревое течение, численное моделирование, эффективность улавливания частиц, потери давления, статический классификатор.

Для цитирования: Зинуров В. Э., Прец М. А. Численное исследование влияния направляющих дугообразных элементов на эффективность мультивихревого пылеуловителя-классификатора // Ползуновский вестник. 2026. № 2, С. 248–255. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.035. EDN: <https://elibrary.ru/HBOPON>.

Original article

NUMERICAL STUDY OF INFLUENCE OF ARC-SHAPED GUIDE ELEMENTS ON EFFICIENCY OF A MULTIVORTEX DUST COLLECTOR-CLASSIFICATOR

Vadim E. Zinurov ¹, Mariia A. Prets ²

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

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

² precmari@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0009-4434-3906>

Abstract. One of the priority areas in the field of chemical engineering processes and equipment is the development of high-efficiency devices for the fractionation of fine-dispersed materials. The relevance of this topic is due to the need to improve selectivity in particle separation in industries such as petrochemicals and catalyst manufacturing. This article proposes the design of a multivortex dust collector-classifier of the "pipe-in-pipe" type. Fractional separation is achieved by generating a series of swirling vortices in the annular space between the inner and outer pipes, under the influence of which larger particles are carried to the periphery and deposited in a collection hopper. It is assumed that one of the factors limiting the efficiency of such a device is particle reflection from the channel walls, followed by their re-entrainment into the flow.

© Зинуров В. Э., Прец М. А., 2026

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАПРАВЛЯЮЩИХ ДУГООБРАЗНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ МУЛЬТИВИХРЕВОГО ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЯ-КЛАССИФИКАТОРА

The aim of this study is to evaluate the influence of arc-shaped guide elements installed in the annular space on the efficiency of the multivortex dust collector-classifier. Numerical modeling of the gas-particle flow and particle trajectories was carried out in a three-dimensional formulation using the ANSYS Fluent software package. Key geometric parameters were varied: the inner pipe diameter (from 43 to 66 mm) and the slot opening ratio in the pipe wall (k from 0.2 to 1). The evaluation criteria included the fractional efficiency of particle capture within the 5-100 μm range and the pressure drop across the device. Simulation results demonstrated that the integration of arc-shaped guide elements increases fractional efficiency by an average of 10.9 % compared to the baseline design. Additionally, pressure losses were reduced by 6.3 % due to stabilization of the multivortex flow structure and reduction of recirculation zones. The best performance was observed at a calculated vortex diameter of 29 mm and slot opening $k = 0.6$, where the capture efficiency for particles larger than 7 μm exceeds 90 %.

Keywords: multivortex classifier, fractionation, dispersed particles, guide elements, vortex flow, numerical modeling, particle capture efficiency, pressure drop, static classifier.

For citation: Zinurov, V. E. & Prets, M. A. (2026). Numerical study of influence of arc-shaped guide elements on efficiency of a multivortex dust collector-classifier. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 248-255. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2026.02.035. EDN: <https://elibrary.ru/HBOPON>.

ВВЕДЕНИЕ

Современное химико-технологическое производство предъявляет высокие требования к эффективности процессов разделения дисперсных систем, особенно к фракционированию тонкодисперсных порошков по гранулометрическим характеристикам [1, 2]. Актуальна данная проблема в нефтехимии, где во многих процессах используются твердые каталитические и адсорбционные материалы в виде мелкодисперсных частиц. Например, в установках каталитического крекинга (FCC) применяется циркулирующий порошкообразный катализатор со средним размером частиц порядка 50–100 мкм [3].

Не менее важен контроль гранулометрического состава адсорбентов, применяемых в газоразделении и очистке продуктов нефтехимии [4]. Пористые материалы на основе силикагеля широко используются в качестве носителей катализаторов и адсорбентов осушителей газа. За последние годы активно ведутся исследования по модификации и улучшению свойств таких адсорбентов. В частности, показано, что химически модифицированный мелкопористый силикагель эффективно извлекает благородные металлы из растворов [5]. В то же время для обеспечения высокой сорбционной емкости и пропускной способности адсорбционных колонн необходимо поддерживать оптимальный размер зерен адсорбента. Слишком крупные частицы приводят к снижению скорости массообмена, а чрезмерно мелкие – к росту гидравлического сопротивления слоя и уносу порошка газовым потоком [6].

Задача фракционирования сыпучих материалов на узкие фракции актуальна как для каталитических систем, так и для адсорбентов в нефтегазопереработке. Для разделения частиц по размерам применяются различные типы аппаратов, каждый из которых имеет свои преимущества и ограничения [7, 8]. Традиционным методом фракционирования относительно крупных порошков является механический рассев (грохоты, вибросита) [9, 10]. Однако эффективность ситовых классификаторов резко падает при уменьшении размера частиц к десяткам микрометров из-за явлений слипания, агломерации и пыления материала. В пищевой и микробиологической промышленности, где зачастую требуется разделять порошки в диапазоне 50–100 мкм, повышение производительности барабанных сит достигается за счет оптимизации их конструкции и режима работы, но для мелкодисперсных материалов размером менее 50 мкм данный подход малоприменим.

В этих случаях предпочтение отдается аэродинамическим методам классификации. Широко используются пневматические (гравитационные) воздушные классификаторы, в которых восходящий поток газа

разделяет частицы по их эквивалентной скорости оседания. Достоинствами таких устройств являются простота конструкции, отсутствие движущихся частей и возможность одновременного получения нескольких фракций. Тем не менее, даже при оптимизации режима их эффективность может снижаться из-за неравномерности распределения газового потока [11]. В частности, установлено, что поперечная неоднородность скорости воздуха приводит к существенному ухудшению разделяющей способности гравитационного классификатора.

Высокой эффективностью и регулируемым диаметром граничного зерна характеризуются центробежные динамические классификаторы. В них используются вращающиеся лопаточные роторы, создающие интенсивное закручивание потока и контролирующее отбор частиц требуемой крупности. Динамические классификаторы широко применяются, например, в производстве цемента, минеральных и химических порошков. Исследования показывают возможность существенного повышения селективности подобных аппаратов за счет оптимизации конструкции ротора [12]. В работе [13] приведен пример улучшения точности разделения тонких порошков 10–50 мкм на 10–40 % путем модификации формы и угла установки лопаток ротора.

Тем не менее, наличие движущихся частей усложняет конструкцию и эксплуатацию таких классификаторов [14]. Поэтому для многих задач (в том числе в нефтехимии, где часто требуется непрерывная и надежная работа аппарата при высокотемпературных газовых потоках) актуально применение статических схем разделения, не имеющих вращающихся элементов [15]. Среди статических пылеуловителей наиболее распространены циклонные сепараторы, в которых отделение твердых частиц происходит за счет центробежной силы закрученного потока [16]. Циклоны отличаются конструктивной простотой, компактностью и способностью работать при высоких температурах и больших расходах газа [17]. Однако у типового циклона рост степени улавливания мелкодисперсных фракций происходит медленно и монотонно, без резкого увеличения.

В ранее проведенных исследованиях была разработана конструкция статического мультивихревого воздушного классификатора, представляющего собой аппарат типа «труба в трубе» [18]. Принцип его действия основан на формировании серии устойчивых завихрений в кольцевом пространстве между внутренней и наружной трубами корпуса (рис. 1). Газовый поток, поступающий через центральное входное отверстие во внутреннюю трубу, движется по осевому каналу и далее, проходя через прямоугольные щели в её стенке, перераспределяется в кольцевой зазор. В результате формируется множество упорядоченных вихрей [19]. Возникающие центробежные силы обеспечивают вынесение

более тяжёлых частиц к периферии, где они теряют кинетическую энергию и осаждаются в нижнюю часть аппарата – бункер, тогда как более лёгкие фракции уносятся вверх выходящим газовым потоком [20, 21].

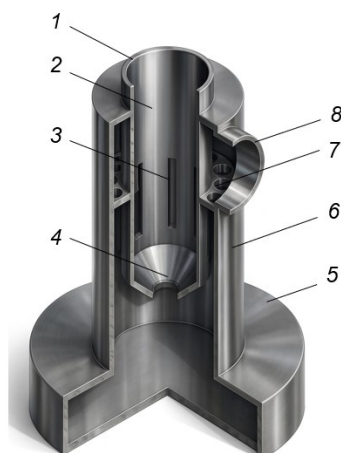


Рисунок 1 – Мультивихревой воздушный пылеуловитель-классификатор: 1 – входное отверстие; 2 – внутренняя труба; 3 – прорези прямоугольной формы; 4 – конический переход; 5 – бункер для сбора пыли; 6 – корпус; 7 – экран, состоящий из поперечной перегородки; 8 – выходное отверстие

Figure 1 – Multivortex Air Dust Collector-Classificator: 1 – inlet port; 2 – inner pipe; 3 – rectangular slots; 4 – conical transition; 5 – dust collection hopper; 6 – housing; 7 – screen consisting of the transverse baffle; 8 – outlet opening

Экспериментальные и численные исследования подтвердили образование устойчивой мультивихревой структуры потока в кольцевом пространстве классификатора. В ходе испытаний на производственной площадке «Салаватский катализаторный завод» была продемонстрирована работоспособность аппарата при фракционировании порошков с граничным размером частиц до 40 мкм [22].

Однако в ряде случаев наблюдалась недостаточная селективность разделения, особенно в области частиц среднего размера. Анализ показал, что при определённых условиях частицы, выходя из вихревой зоны, могут отражаться от стенок кольцевого канала аппарата и попадать в соседние вихри. Это повышает вероятность повторного вовлечения частиц в циркуляционный поток, что приводит к снижению эффективности разделения.

Для устранения указанного недостатка и стабилизации структуры потока предлагается усовершенствовать конструкцию пылеуловителя-классификатора путём введения направляющих дугообразных элементов в кольцевое пространство. Эти элементы (рис. 2) предназначены для снижения вероятности отражения частиц от стенок и формирования более упорядоченного мультивихревого течения. Ожидается, что данное конструктивное решение позволит повысить эффективность разделения и стабилизировать работу аппарата в широком диапазоне эксплуатационных режимов.

Целью настоящей работы является оценка влияния направляющих дугообразных элементов, установленных в кольцевом пространстве аппарата, на эффективность мультивихревого пылеуловителя-классификатора.

МЕТОДЫ

Для реализации поставленной цели была выполнена серия численных экспериментов, направленных на сопоставление характеристик пылеулови-

телей-классификаторов с направляющими дугообразными элементами и без них. Основное внимание уделялось анализу фракционной эффективности осаждения частиц различной дисперсности, а также определению потери давления при различных конструктивных конфигурациях. Моделирование осуществлялось в трёхмерной постановке.

Численное моделирование аэродинамики и поведения частиц в мультивихревом классификаторе проводилось с использованием программного комплекса ANSYS Fluent. В основе расчётов лежало решение системы уравнений Навье-Стокса совместно с уравнением сплошности среды, что позволило воспроизвести трёхмерное течение газа в условиях вихревой структуры. Для адекватного описания турбулентных явлений, характерных для локальных зон с интенсивными градиентами скорости, применялась модель турбулентности $k-\omega$ SST, зарекомендовавшая себя при расчётах сильно завихрённых потоков.

На первом этапе в CAD-среде КОМПАС-3D была разработана параметрическая модель, на базе которой были созданы из 24 твердотельных моделей классификатора. Основные геометрические параметры: диаметр внешнего корпуса – 101 мм, высота прямоугольных прорезей – 60 мм, диаметр отверстий в экране – 12 мм (рис. 1). Варьировались два параметра: внутренний диаметр трубы d (в диапазоне 43–66 мм) и степень раскрытия прорезей k (0,2; 0,6 и 1). На рисунке 2, а представлен вариант с $k = 1$.

Расчётный диаметр одиночного вихря d_s в кольцевом пространстве (без учёта толщины стенок) определялся из геометрического соотношения между d и наружным диаметром D , и изменялся в диапазоне от 17,5 до 29 мм:

$$d_s = \frac{D-d}{2}. \quad (1)$$

Направляющие дугообразные элементы моделировались по всей высоте кольцевого канала до уровня экрана 7 (рис. 1) и различались по геометрической форме (рис. 2, а–б).

На втором этапе из твердотельных моделей создавались проточные объёмы. Учитывая, что основная часть сепарации частиц из газа происходит в пределах активной вихревой зоны, расчётная область ограничивалась уровнем экрана. Ввиду того, что 3D-модель приобретала осесимметричный вид, то моделировался лишь один сектор, что позволило существенно снизить вычислительные ресурсы при сохранении достоверности результатов.

На третьем этапе генерировалась расчётная сетка. В ходе предварительного анализа было установлено, что стабилизация результатов по перепаду давления Δp наступает при числе ячеек не менее 437 000. Параметры, при которых создавалась данная сеточная модель, были выбраны в качестве базовых [23].

Для моделирования движения дисперсной фазы использовалась модель DPM (Discrete Phase Model) с односторонней связью: частицы не оказывали влияния на газовую среду, но подвергались её воздействию. Геометрия частиц – сферическая, плотность принималась 1000 кг/м³. Размер частиц варьировался от 5 до 100 мкм. На стенках бункера применялось граничное условие прилипания частиц; на прочих стенках – отражение. На входе в мультивихревой пылеуловитель-классификатор задавалась скорость воздуха 12 м/с, на выходе из него – атмосферное давление.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАПРАВЛЯЮЩИХ ДУГООБРАЗНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ МУЛЬТИВИХРЕВОГО ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЯ-КЛАССИФИКАТОРА

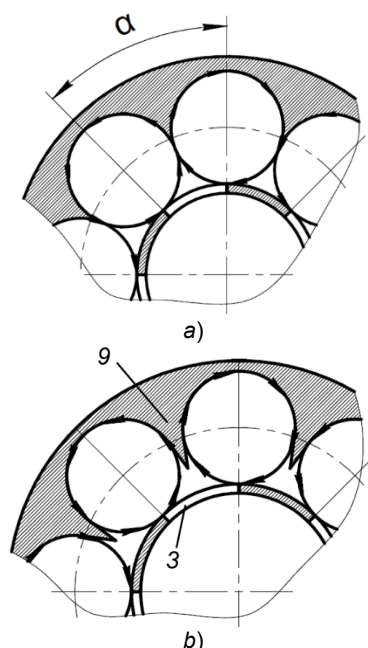


Рисунок 2 – Конструктивные варианты направляющих дугообразных элементов 9 для 3D-моделей с различным диаметром внутренней трубы d : а) 43 и 66 мм; б) 46, 54 и 59 мм

Figure 2 – Structural variants of arc-shaped guide elements 9 for 3D-models with different inner pipe diameters d : а) 43 and 66 mm; б) 46, 54, and 59 mm

Фракционная эффективность пылеуловителя-классификатора определялась как доля частиц, осевших в бункере, от общего числа запущенных частиц. Потери давления рассчитывались как разность статических давлений на входе в аппарат и выходе из него.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализ полученных численных данных показал, что интеграция направляющих дугообразных элементов в конструкцию мультिवихревого пылеуловителя-классификатора способствует увеличению его фракционной эффективности (рис. 3–7). Основной причиной данного эффекта является снижение вероятности отражения частиц от стенок в кольцевом пространстве в соседние вихревые зоны, с последующим уносом из аппарата восходящим газовым потоком. Также установлено, что применение направляющих дугообразных элементов приводит к снижению потери давления Δp в среднем на 6,3 % по сравнению с конструкциями, не содержащими направляющих дугообразных элементов (рис. 8). Данный эффект является следствием стабилизации структуры мультिवихревого потока. Упорядоченное вихревое течение снижает интенсивность нежелательных рециркуляционных зон, что способствует снижению вероятности повторного вовлечения частиц и их уноса восходящим газом.

Как отмечалось ранее, варьирование внутреннего диаметра трубы d от 43 до 66 мм при постоянном наружном диаметре корпуса $D = 101$ мм приводило к изменению расчетного диаметра одиночного вихря d_s в пределах от 29 до 17,5 мм в соответствии с выражением (1). С теоретической точки зрения, уменьшение d_s должно приводить к росту центробежных сил, что, аналогично эффекту, наблюдаемому в циклонах, должно обеспечивать более эффективное отделение

твёрдых частиц от газового потока. Однако проведенный численный анализ показал обратную тенденцию: при уменьшении расчетного диаметра вихрей d_s от 29 до 17,5 мм наблюдается снижение фракционной эффективности как для базовой конструкции, так и для модифицированной с направляющими дугообразными элементами (рис. 3–7). Это указывает на то, что при определенном уровне центробежных воздействий частицы приобретают значительный импульс, в результате чего многократно соударяются со стенками аппарата в кольцевом пространстве. Такое поведение повышает вероятность их повторного вовлечения в циркуляционный поток и последующего уноса, что приводит к снижению селективности мультिवихревого пылеуловителя-классификатора.

Большинство экспериментальных кривых (рис. 3–7), соответствующих как базовой конструкции аппарата, так и модифицированной с направляющими дугообразными элементами, демонстрируют наличие двух выраженных экстремумов. Подобная форма объясняется в основном отражением частиц от стенок в кольцевом пространстве. На данный эффект оказывают влияние размер частиц, их плотность, скорость выхода из вращающегося потока, диаметр вихря и степень раскрытия прямоугольных прорезей. Сначала фракционная эффективность возрастает, поскольку частицы с увеличением размера легче отделяются от газового потока под действием центробежных сил. Однако при дальнейшем увеличении размера и, как следствие, повышении импульса частиц возрастает вероятность их отражения от стенок, что приводит к снижению эффективности. Минимум на кривой соответствует области, где отражения частиц наиболее интенсивны. Последующий рост эффективности объясняется тем, что при достижении ещё больших размеров частиц начинают преобладать гравитационные силы, способствующие их осаждению в бункер независимо от траектории движения.

Изменение степени раскрытия прямоугольных прорезей k от 0,2 до 1 оказывает существенное влияние на скорость истечения запылённого газа и, как следствие, на характер формирования вихревой структуры в кольцевом пространстве. Очевидно, что при минимальном раскрытии $k = 0,2$ достигается наибольшее гидравлическое сопротивление, при этом величина потери давления Δp варьируется в диапазоне от 824,9 до 1472,3 Па. При полном раскрытии $k = 1$ достигается минимальное сопротивление, Δp уменьшается до значений 485,9–776,2 Па (рис. 8). С точки зрения фракционной эффективности наилучшие результаты, как показывают расчёты (рис. 3–7), достигаются при промежуточном значении $k = 0,6$, для которого наблюдается высокая степень улавливания частиц и наименьшее количество экстремумов на кривых. Это указывает на то, что при среднем раскрытии прорезей $k \rightarrow 0,5$ формируется оптимальное соотношение геометрических и гидродинамических параметров: скорость газа через прорези достаточна для генерации устойчивых вихрей, но не приводит к их дестабилизации или разрушению.

При диаметре внутренней трубы $d = 66$ мм, соответствующем расчетному диаметру вихрей $d_s = 17,5$ мм формируются наибольшие центробежные силы, но фракционная эффективность классификатора остается на минимальном уровне и не превышает 0,6. Можно отметить, что при степени раскрытия прорезей $k = 0,2$ (рис. 3) наблюдается два явно выраженных экстремума: при $a = 12$ фракционная эффектив-

ность $E = 0,58$ (конструкция с направляющими дугообразными элементами) и при $a = 15$ фракционная эффективность $E = 0,35$ (базовая конструкция).

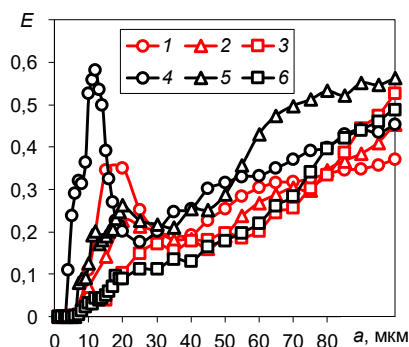


Рисунок 3 – Фракционная эффективность мультивихревого пылеуловителя-классификатора при различной степени раскрытия щелей k : 1, 4 – 0,2; 2, 5 – 0,6; 3, 6 – 1. Красные линии (1–3) соответствуют варианту без направляющих дугообразных элементов в кольцевом пространстве, чёрные линии (4–6) – с установленными направляющими элементами. Диаметр внутренней трубы $d = 66$ мм ($d_s = 17,5$ мм)

Figure 3 – Fractional efficiency of the multivortex dust collector-classifier at different slot opening levels k : 1, 4 – 0,2; 2, 5 – 0,6; 3, 6 – 1. Red curves (1–3) correspond to the configuration without arc-shaped guide elements in the annular space; black curves (4–6) represent the configuration with installed guide elements. Inner pipe diameter $d = 66$ mm ($d_s = 17,5$ mm)

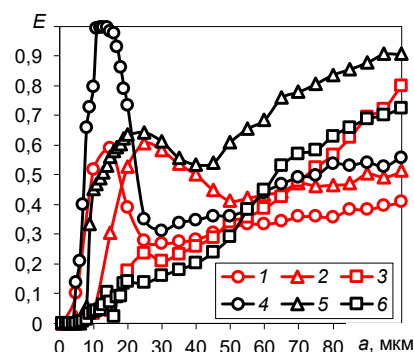


Рисунок 4 – Фракционная эффективность мультивихревого пылеуловителя-классификатора при различной степени раскрытия щелей k : 1, 4 – 0,2; 2, 5 – 0,6; 3, 6 – 1. Красные линии (1–3) соответствуют варианту без направляющих дугообразных элементов в кольцевом пространстве, чёрные линии (4–6) – с установленными направляющими элементами. Диаметр внутренней трубы $d = 59$ мм ($d_s = 21$ мм)

Figure 4 – Fractional efficiency of the multivortex dust collector-classifier at different slot opening levels k : 1, 4 – 0,2; 2, 5 – 0,6; 3, 6 – 1. Red curves (1–3) correspond to the configuration without arc-shaped guide elements in the annular space; black curves (4–6) represent the configuration with installed guide elements. Inner pipe diameter $d = 59$ mm ($d_s = 21$ mm)

При уменьшении диаметра внутренней d до 59 мм расчетный диаметр вихрей d_s составил 21 мм (рис. 4), что способствовало повышению средней фракционной эффективности мультивихревого пылеуловителя-классификатора в диапазоне размера частиц a от 1 до 100 мкм на 15,8 % по сравнению с конфигурацией, представленной на рисунке 3. Использование направляющих дугообразных элементов обеспечило дополнительное повышение эффективности: среднее значение для модифицированной конструкции оказалось выше на 5,2 % по сравнению с базовым вариантом без направляющих.

Также следует отметить появление множественных экстремумов на кривых, что может свидетельствовать о формировании более упорядоченной вихревой структуры в кольцевом пространстве (рис. 4).

Уменьшение внутренней трубы d до 54 мм привело к увеличению расчетного диаметра вихрей d_s до 23,5 мм (рис. 5), что обеспечило заметный рост фракционной эффективности, особенно для конструкции с направляющими дугообразными элементами. При степени раскрытия прорезей k от 0,6 до 1 (для конструкции с дугообразными элементами) не наблюдается выраженных экстремумов, что свидетельствует о снижении влияния отражения частиц от стенок и стабилизации мультивихревой структуры. Для $k = 0,2$ (кривая 4) пик сохраняется, однако он характеризуется более широким диапазоном частиц. В случае базовой конструкции (красные кривые) экстремумы фиксируются при всех значениях k . Средняя эффективность классификатора с направляющими элементами составила 0,55, базовой конструкции составила 0,47 (рис. 5), что в среднем на 12,1 % выше по сравнению с конфигурацией, представленной на рисунке 4.

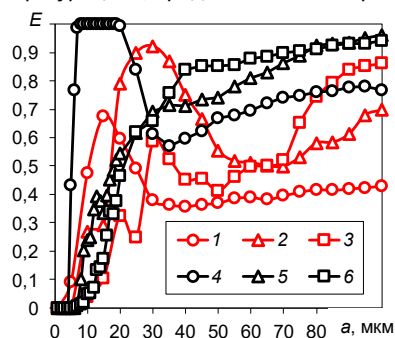


Рисунок 5 – Фракционная эффективность мультивихревого пылеуловителя-классификатора при различной степени раскрытия щелей k : 1, 4 – 0,2; 2, 5 – 0,6; 3, 6 – 1. Красные линии (1–3) соответствуют варианту без направляющих дугообразных элементов в кольцевом пространстве, чёрные линии (4–6) – с установленными направляющими элементами. Диаметр внутренней трубы $d = 54$ мм ($d_s = 23,5$ мм)

Figure 5 – Fractional efficiency of the multivortex dust collector-classifier at different slot opening levels k : 1, 4 – 0,2; 2, 5 – 0,6; 3, 6 – 1. Red curves (1–3) correspond to the configuration without arc-shaped guide elements in the annular space; black curves (4–6) represent the configuration with installed guide elements. Inner pipe diameter $d = 54$ mm ($d_s = 23,5$ mm)

При диаметре внутренней трубы $d = 46$ мм, что соответствует расчетному диаметру вихрей d_s 27,5 мм на кривых фракционной эффективности для базовой конструкции мультивихревого классификатора сохраняются выраженные экстремумы (рис. 6). В конструкции с направляющими элементами при $k = 0,2$ наблюдается увеличение ширины пика, соответствующего диапазону частиц a от 9 до 15 мкм. Средняя эффективность классификатора с направляющими элементами составила 0,71, для базовой конструкции – 0,57 (рис. 6), что на 13,3 % выше по сравнению с предыдущей конфигурацией (рис. 5).

При уменьшении внутренней трубы d до 43 мм расчетный диаметр вихрей d_s составил 29 мм (рис. 7), наблюдается дальнейшее повышение фракционной эффективности мультивихревого пылеуловителя-классификатора по сравнению с предыдущими конфигурациями (рис. 3–6). Средняя эффективность составила 0,78 для конструкции с направляющими

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАПРАВЛЯЮЩИХ ДУГООБРАЗНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ МУЛЬТИВИХРЕВОГО ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЯ-КЛАССИФИКАТОРА

дугообразными элементами и 0,62 для базовой конструкции. Следует отметить, что при $k = 0,2$ снижение фракционной эффективности у модифицированной конструкции (чёрная кривая) выражено значительно слабее (рис. 7), чем в предыдущих случаях (рис. 3–6).

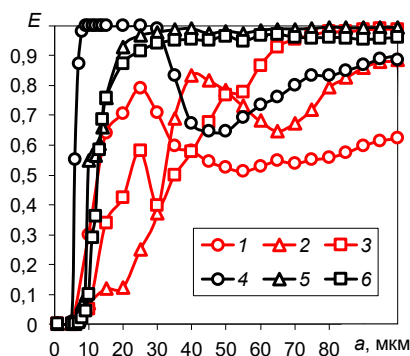


Рисунок 6 – Фракционная эффективность мультिवихревого пылеуловителя-классификатора при различной степени раскрытия щелей k : 1, 4 – 0,2; 2, 5 – 0,6; 3, 6 – 1. Красные линии (1–3) соответствуют варианту без направляющих дугообразных элементов в кольцевом пространстве, чёрные линии (4–6) – с установленными направляющими элементами. Диаметр внутренней трубы $d = 46$ мм ($d_s = 27,5$ мм)

Figure 6 – Fractional efficiency of the multivortex dust collector-classifier at different slot opening levels k : 1, 4 – 0,2; 2, 5 – 0,6; 3, 6 – 1. Red curves (1–3) correspond to the configuration without arc-shaped guide elements in the annular space; black curves (4–6) represent the configuration with installed guide elements. Inner pipe diameter $d = 46$ mm ($d_s = 27,5$ mm)

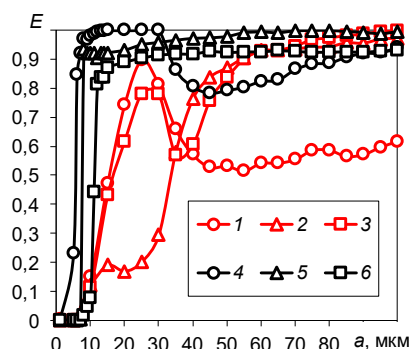


Рисунок 7 – Фракционная эффективность мультिवихревого пылеуловителя-классификатора при различной степени раскрытия щелей k : 1, 4 – 0,2; 2, 5 – 0,6; 3, 6 – 1. Красные линии (1–3) соответствуют варианту без направляющих дугообразных элементов в кольцевом пространстве, чёрные линии (4–6) – с установленными направляющими элементами. Диаметр внутренней трубы $d = 43$ мм ($d_s = 29$ мм)

Figure 7 – Fractional efficiency of the multivortex dust collector-classifier at different slot opening levels k : 1, 4 – 0,2; 2, 5 – 0,6; 3, 6 – 1. Red curves (1–3) correspond to the configuration without arc-shaped guide elements in the annular space; black curves (4–6) represent the configuration with installed guide elements. Inner pipe diameter $d = 43$ mm ($d_s = 29$ mm)

Потери давления в мультिवихревом пылеуловителе-классификаторе с направляющими дугообразными элементами при степени раскрытия прорезей k от 0,2 до 1 снижались от 824,9 до 485,9, от 1297,2 до 731,1 и от 992,2 до 548,6 Па при расчетном диаметре вихрей d_s , равным 29, 23,5 и 17,5 мм соответственно. Для базовой конструкции аппарата поте-

ри давления Δp изменялись от 843,2 до 500,1, от 1472,2 до 776,2 и от 1020,6 до 612,1 Па при расчетном диаметре вихрей d_s , равным 29, 23,5 и 17,5 мм соответственно (рис. 8).

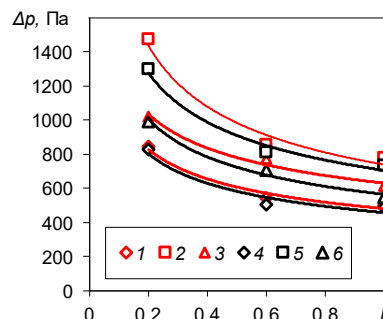


Рисунок 8 – Потери давления в мультिवихревом пылеуловителе-классификаторе от степени раскрытия щелей при различном значении диаметра внутренней трубы d , мм: 1, 4 – 43 ($d_s = 29$ мм); 2, 5 – 54 ($d_s = 23,5$ мм); 3, 6 – 66 ($d_s = 17,5$ мм). Красные линии (1–3) соответствуют варианту без направляющих дугообразных элементов в кольцевом пространстве, чёрные линии (4–6) – с установленными направляющими элементами

Figure 8 – Pressure loss in the multivortex dust collector-classifier depending on the slot opening at different inner pipe diameters d , mm: 1, 4 – 43 ($d_s = 29$ mm); 2, 5 – 54 ($d_s = 23,5$ mm); 3, 6 – 66 ($d_s = 17,5$ mm). Red curves (1–3) correspond to the configuration without arc-shaped guide elements in the annular space; black curves (4–6) represent the configuration with installed guide elements

ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ кривых фракционной эффективности (рис. 3–7) показывает, что конструкция аппарата с направляющими дугообразными элементами обладает высокой гибкостью применения и может быть адаптирована под различные задачи. В режиме работы в качестве классификатора устройство позволяет эффективно выделять узкие фракции. Так, при $d_s = 21$ мм, $k = 0,2$ достигается высокая эффективность улавливания частиц в диапазоне от 11 до 20 мкм (рис. 4), при $d_s = 23,5$ мм, $k = 0,2$ – от 4 до 20 мкм (рис. 5). В режиме пылеуловителя-классификатора аппарат демонстрирует эффективность выше 0,85 при улавливании частиц крупнее 20 мкм для случая $d_s = 27,5$ мм, $k = 0,6–1$ (рис. 6) и эффективность выше 0,9 при улавливании частиц размером более 7 мкм при $d_s = 29$ мм, $k = 0,6$ (рис. 7).

Полученные результаты подтверждают гипотезу о том, что введение направляющих дугообразных элементов в кольцевое пространство способствует стабилизации мультिवихревой структуры потока и снижению отражения частиц от стенок аппарата в сторону соседних вихрей. Это, в свою очередь, позволяет исключить формирование экстремумов на кривых фракционной эффективности или значительно их сгладить. Однако данный эффект имеет свои ограничения: при определённых значениях расчетного диаметра вихрей d_s (например, при $d_s < 21$ мм) и степени раскрытия прорезей (например, при $k = 0,2$) даже наличие направляющих элементов не всегда предотвращает многократное соударение частиц и повторный захват потоком. Таким образом, степень влияния направляющих дугообразных элементов на формирование устойчивой вихревой структуры и эффективность аппарата определяется совокупностью

геометрических и технологических параметров.

Практическое значение результатов заключается в возможности использования модифицированного мультивихревого пылеуловителя-классификатора для задач селективного фракционирования в нефтехимии, фармацевтике, производстве катализаторов и других отраслях, где требуется точное разделение дисперсных частиц.

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что наличие направляющих дугообразных элементов способствует формированию более упорядоченной мультивихревой структуры потока, снижает вероятность отражения частиц от стенок и увеличивает фракционную эффективность в среднем на 10,9 % по сравнению с базовой конструкцией.

2. Наибольшая эффективность достигается при расчетном диаметре вихрей d_s , равным 29 мм, и степени раскрытия прорезей k , равным 0,6, которая составляет более 0,9 для частиц $a > 7$ мкм.

3. При среднем раскрытии прорезей $k \rightarrow 0,5$ формируется оптимальное соотношение геометрических и гидродинамических параметров.

4. При уменьшении d_s ниже 21 мм эффективность мультивихревого пылеуловителя-классификатора снижается, несмотря на рост центробежных сил, что связано с усилением отражения частиц и их повторным вовлечением в поток. Это указывает на существование предельных геометрических условий, при которых эффективность модификации снижается.

5. Введение направляющих дугообразных элементов оказывает положительное влияние на гидравлические характеристики аппарата. В среднем потери давления снижаются на 6,3 %, что связано с уменьшением рециркуляционных зон и стабилизацией течения. Потери давления при $k = 0,6$ в среднем составляют 671,1 Па (конструкция с направляющими элементами) и 720,8 Па (базовая конструкция).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ширинова Д.Б. Классификация полидисперсного порошка молибдита // Евразийский научный журнал. 2016. № 2. С. 127–128.
2. Экспериментальное определение гидравлического сопротивления упрощенной модели мультивихревого 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.
3. Kim S.W., Yeo C.E., Lee D.Y. Effect of fines content on fluidity of FCC catalysts for stable operation of fluid catalytic cracking unit // Energies. 2019. Т. 12, № 2. С. 293. DOI: 10.3390/en12020293.
4. Пахнutowa Е.А., Слизов Ю.Г. Физико-химические свойства сорбента на основе силикагеля с привитым комплексом медь-ацетоуксусного эфира // Сорбционные и хроматографические процессы. 2021. Т. 21. № 4. С. 529–539. DOI: 10.17308/sorpchrom.2021.21/3637.
5. Videira-Quintela D., Martin O., Montalvo G. Emerging opportunities of silica-based materials within the food industry // Microchemical Journal. 2021. № 167. С. 106318. DOI: 10.1016/j.microc.2021.106318.
6. Silica Gel as a Sorbent and Catalyst Support: Improvement of Technologies and Search for Alternative Production Routes / G.V. Mamontov [et al.] // Catalysis in Industry. 2023. № 3. С. 221–228. DOI: 10.1134/S2070050423030054.
7. Shapiro M., Galperin V. Air classification of solid particles: a review // Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. 2005. № 2. С. 279–285. DOI: 10.1016/j.cep.2004.02.022.
8. CFD simulation and parameter optimization of the

internal flow field of a disturbed air cyclone centrifugal classifier / L. Huang [et al.] // Separation and Purification Technology. 2023. Т. 307. С. 122760. DOI: 10.2139/ssrn.4227862.

9. Ахмадиев Ф.Г., Гиззятов Р.Ф., Назипов И.Т. Расчет многоруких ситовых классификаторов для разделения зернистых материалов по размерам // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. 2019. Т. 8. С. 54–61.

10. Повышение производительности ситовых барабанных классификаторов / А.Л. Фалько [и др.] // Вестник Донского государственного аграрного университета. 2015. № 4–1(18). С. 54.

11. Lanzerstorfer C. Application of air classification for improved recycling of sinter plant dust // Resources, Conservation and Recycling. 2015. № 94. С. 66–71. DOI: 10.1016/j.resconrec.2014.11.013.

12. CFD-based structural optimization of rotor cage for high-efficiency rotor classifier / X. Mou [et al.] // Processes. 2021. № 9(7). С. 1148. DOI: 10.3390/pr9071148.

13. Computational fluid dynamics simulation and performance study of a three-separation combined air classifier / C. Hui [et al.] // Thermal Science. 2024. № 28 (2 Part C). С. 1589–1603.

14. Yu Y., Liu J., Li G. Empirical study of classification process for two-stage turbo air classifier in series // Chinese Journal of Mechanical Engineering. 2013. № 26(3). С. 526–531. DOI: 10.3901/CJME.2013.03.526.

15. Cyclone separator for air particulate matter personal monitoring: a patent review / M.O. Rivera-García [et al.] // Atmosphere. 2023. № 14(4). С. 624. DOI: 10.3390/atmos14040624.

16. A new static cyclonic classifier: Flow characteristics, performance evaluation and industrial applications / Z. Sun [et al.] // Chemical Engineering Research and Design. 2019. № 145. С. 141–149. DOI: 10.1016/j.cherd.2019.03.018.

17. Investigation into the effects of various parameters on the performance and classification potential of a cyclone classifier / M.E. Caliskan [et al.] // Powder Technology. 2019. № 356. С. 102–111. DOI: 10.1016/j.powtec.2019.07.104.

18. Разработка классификатора с соосно расположенными трубами для разделения сыпучего материала на основе силикагеля / В.Э. Зинуров [и др.] // Ползуновский вестник. 2021. № 2. С. 205–211. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.02.029.

19. Zinurov, V.E., Kharkov, V.V., Madyshev, I.N. Numerical simulation of pressure loss in a classifier with coaxial pipes // Mining Information and Analytical Bulletin. 2022. № 10–1. С. 173–181. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_101_0_173.

20. Numerical Study of Vortex Flow in a Classifier with Coaxial Tubes / V. Zinurov [et al.] // International Journal of Engineering & Technology Innovation. 2022. Т. 12, № 4. DOI: 10.46604/ijeti.2022.9568.

21. The Influence of the Design of a Static Multi-Vortex Classifier on the Efficiency Fractionation of Silica Gel Particles / V.E. Zinurov [et al.] // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2024. С. 1–6. DOI: 10.1134/S0040579524600992.

22. Промышленные испытания фракционирования сыпучего материала в мультивихревом классификаторе-сепараторе / В.Э. Зинуров [и др.] // Вестник Технологического университета. 2022. Т. 25, № 4. С. 58–63. DOI: 10.55421/1998-7072_2022_25_4_58.

23. Численное исследование влияния геометрических параметров мультивихревого классификатора на эффективность фракционирования частиц / М.А. Прец [и др.] // Вестник Технологического университета. 2025. Т. 28, № 4. С. 63–68. DOI: 10.55421/3034-4689_2025_28_4_63.

Информация об авторах

В. Э. Зинуров – и. о. зав. кафедры «Инженерная графика» Казанского государственного энергетического университета.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАПРАВЛЯЮЩИХ ДУГООБРАЗНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ МУЛЬТИВИХРЕВОГО ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЯ-КЛАССИФИКАТОРА

М. А. Прец – старший преподаватель кафедры
«Инженерная графика» Казанского государственного
энергетического университета.

REFERENCES

1. Shirinova, D.B. Classification of polydisperse molybdenite powder // *Eurasian Scientific Journal*. 2016. (2), 127-128. (In Russ.).
2. 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.
3. Kim, S.W., Yeo, C.E. & Lee, D.Y. (2019). Effect of fines content on fluidity of FCC catalysts for stable operation of fluid catalytic cracking unit. *Energies*, 12(2), 293. DOI: 10.3390/en12020293.
4. Pakhnutova, E.A. & Slizhov, Yu.G. (2021). Physico-chemical properties of a sorbent based on silica gel with a grafted copper-acetoacetic ester complex. *Sorption and Chromatographic Processes*, (4), 529-539. (In Russ.). DOI: 10.17308/sorpchrom.2021.21/3637.
5. Videira-Quintela, D., Martin, O. & Montalvo, G. (2021). Emerging opportunities of silica-based materials within the food industry. *Microchemical Journal*, (167), 106318. DOI: 10.1016/j.microc.2021.106318.
6. Mamontov, G.V., Evdokimova, E.V., Savel'eva, A.S., Zubkov, A.V., Mikheeva, N.N., Mazov, I.N. & Knyazev, A.S. (2023). Silica Gel as a Sorbent and Catalyst Support: Improvement of Technologies and Search for Alternative Production Routes. *Catalysis in Industry*, 15(3), 221-228. DOI: 10.1134/S2070050423030054.
7. Shapiro, M. & Galperin, V. (2005). Air classification of solid particles: a review. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 44(2), 279-285. DOI: 10.1016/j.cep.2004.02.022.
8. Huang, L., Yuan, J., Pan, M., Wu, J., Qiao, J., Jiang, H. & Duan, C. (2023). CFD simulation and parameter optimization of the internal flow field of a disturbed air cyclone centrifugal classifier. *Separation and Purification Technology*, 307, 122760. DOI: 10.2139/ssm.4227862.
9. Akhmadiev, F.G., Gizzatov, R.F. & Nazipov, I.T. (2019). Calculation of multistage screen classifiers for separating granular materials by size. *Matematicheskie Metody v Tekhnike i Tekhnologiyakh - MMTT*, 8, 54-61. (In Russ.).
10. Falko, A.L., Kryvosheya, A.V., Chemysheva, E.A. & Shcherbakov, V.Yu. (2015). Improving the productivity of drum screen classifiers. *Vestnik Donskogo Gosudarstvennogo Agramogo Universiteta*, (4-1(18), 54. (In Russ.).
11. Lanzerstorfer, C. (2015). Application of air classification for improved recycling of sinter plant dust. *Resources, Conservation and Recycling*, (94), 66-71. DOI: 10.1016/j.resconrec.2014.11.013.
12. Mou, X., Jia, F., Fang, Y. & Chen, C. (2021). CFD-based structural optimization of rotor cage for high-efficiency rotor classifier. *Processes*, 9(7), 1148. DOI: 10.3390/pr9071148.
13. Hui, C., Li, Q., Peng, J. & Fang, Y. (2024). Computational fluid dynamics simulation and performance study of a three-separation combined air classifier. *Thermal Science*, 28(2 Part C), 1589-1603.
14. Yu, Y., Liu, J. & Li, G. (2013). Empirical study of classification process for two-stage turbo air classifier in series. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 26(3), 526-531. DOI: 10.3901/CJME.2013.03.526.
15. Rivera-García, M.O., Reyna, M.A., Camarillo-Ramos, M.A., Reyna-Vargas, M.A., Avitia, R.L., Cuevas-González, D. & Osorio Vargas, A.R. (2023). Cyclone separator for air particulate matter personal monitoring: a patent review. *Atmosphere*, 14(4), 624. DOI: 10.3390/atmos14040624.
16. Sun, Z., Sun, G., Peng, P., Liu, Q. & Yu, X. (2019). A new static cyclonic classifier: Flow characteristics, performance evaluation and industrial applications. *Chemical Engineering Research and Design*, 145, 141-149. DOI: 10.1016/j.cherd.2019.03.018.
17. Caliskan, M.E., Karagoz, I., Avci, A. & Surmen, A. (2019). Investigation into the effects of various parameters on the performance and classification potential of a cyclone classifier. *Powder Technology*, 356, 102-111. DOI: 10.1016/j.powtec.2019.07.104.
18. Zinurov, V.E., Madyshev, I.N., Ivakhnenko, A.R. & Petrova, I.V. (2021). Development of a classifier with coaxially arranged pipes for the separation of bulk silica gel-based material. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 205-211. (In Russ.). DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.02.029.
19. Zinurov, V.E., Kharkov, V.V. & Madyshev, I.N. (2022). Numerical simulation of pressure loss in a classifier with coaxial pipes. *Mining Informational and Analytical Bulletin*, (10-1), 173-181. (In Russ.). DOI: 10.25018/0236_1493_2022_101_0_173.
20. Zinurov, V., Kharkov, V., Pankratov, E. & Dmitriev, A. (2022). Numerical study of vortex flow in a classifier with coaxial tubes. *International Journal of Engineering & Technology Innovation*, 12(4). DOI: 10.46604/ijeti.2022.9568.
21. Zinurov, V. E., Dmitriev, A. V., Dmitrieva, O. S. & Muginov, A. M. (2024). The influence of the design of a static multi-vortex classifier on the efficiency fractionation of silica gel particles. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 1-6. DOI: 10.1134/S0040579524600992.
22. Zinurov, V. E., Dmitriev, A. V., Dmitrieva, O. S. & Moiseeva, K. S. (2022). Industrial testing of bulk material fractionation in a multi-vortex classifier-separator. *Vestnik Tekhnologicheskogo Universiteta*, 25(4), 58-63. (In Russ.). DOI: 10.55421/1998-7072_2022_25_4_58.
23. Prets, M. A., Zinurov, V. E., Dmitriev, A. V. & Muginov, A. M. (2025). Numerical study of the influence of geometric parameters of a multivortex classifier on particle fractionation efficiency. *Vestnik Tekhnologicheskogo Universiteta*, 28(4), 63-68. (In Russ.). DOI: 10.55421/3034-4689_2025_28_4_63.

Information about the authors

V. E. Zinurov - Candidate of Technical Sciences, Acting Head of the Department of «Engineering Graphics» of the Kazan State Power Engineering University.

M. A. Prets - Senior Lecturer of the Department of «Engineering Graphics» of the 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 17 декабря 2025; одобрена после рецензирования 24 апреля 2026; принята к публикации 18 мая 2026.

The article was received by the editorial board on 17 Dec 2025; approved after editing on 24 Apr 2026; accepted for publication on 18 May 2026.