

М. А. Прец, В. Э. Зинуров, А. В. Дмитриев,
В. А. Вдовина

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФРАКЦИОНИРОВАНИЯ МЕЛКОДИСПЕРСНОГО СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА В МУЛЬТИВИХРЕВОМ КЛАССИФИКАТОРЕ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ

Ключевые слова: мультिवихревой классификатор, фракционирование, сыпучие материалы, сепарация, конструктивные параметры, эффективность классификации, CFD-моделирование.

Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения эффективности процессов классификации в химической промышленности, использующей порошкообразные катализаторы и адсорбенты в диапазоне размеров 10-60 мкм. Существующие методы разделения, включая механическое просеивание, гравитационные и инерционные устройства, циклоны и роторные классификаторы, имеют ограничения по селективности, надёжности или эксплуатационной сложности. В качестве альтернативы предложена конструкция мультिवихревого классификатора с коаксиально расположенными трубами. В кольцевом канале аппарата формируется мультिवихревая система. Твёрдые частицы под действием инерционных сил сепарируются из газа и оседают в бункере классификатора. Целью работы является численное моделирование фракционирования частиц в классификаторе с оценкой фракционной эффективности и гидравлического сопротивления при изменении геометрических параметров. Моделирование выполнено в программной среде ANSYS Fluent с применением стационарной трёхмерной постановки, турбулентной модели $k-\omega$ SST и модели дискретной фазы DPM. Исследовались влияние диаметра вихря и степени раскрытия щели, варьируемых в диапазонах 17,5-29 мм и 0-1 соответственно. На входе в аппарат задавалась входная скорость газового потока равной 12 м/с, размер частиц варьировался от 1 до 200 мкм. Для оценки фракционной эффективности на стенках бункера задавалось условие прилипания частиц. Получено, что увеличение диаметра завихрений способствует росту эффективности. Уменьшение степени раскрытия прямоугольных щелей приводит к ослаблению вихревой структуры, снижению тангенциальной скорости газа и росту сопротивления. Наилучшие результаты достигнуты при диаметре завихрений равном 27,5-29 мм и степени раскрытия щелей в диапазоне 0,4-1. Эффективность фракционирования частиц размером 20-25 мкм превышает 95 %.

M. A. Prets, V. E. Zinurov, A. V. Dmitriev,
V. A. Vdovina

EFFICIENCY OF FRACTIONATION OF FINELY DISPERSED BULK MATERIAL IN A MULTI-VORTEX CLASSIFIER WITH CHANGING DESIGN PARAMETERS

Keywords: multi-vortex classifier, fractionation, bulk materials, separation, design parameters, classification efficiency, CFD modeling.

The relevance of this study is determined by the need to improve the efficiency of classification processes in the chemical industry, which utilizes powdered catalysts and adsorbents in the particle size range of 10-60 μm . Existing separation methods, including mechanical sieving, gravitational and inertial devices, cyclones, and rotary classifiers, are limited in terms of selectivity, reliability, or operational complexity. As an alternative, a multi-vortex classifier design with coaxially arranged tubes is proposed. A multi-vortex system is formed in the annular channel of the device, where solid particles are separated from the gas flow under the action of inertial forces and settle in the classifier's collection bin. The aim of the study is to perform numerical modeling of particle fractionation in the classifier and to evaluate fractional efficiency and hydraulic resistance under varying geometric parameters. The simulation was conducted in the ANSYS Fluent software environment using a steady-state three-dimensional approach, the $k-\omega$ SST turbulence model, and the Discrete Phase Model. The study investigated the effects of vortex diameter and slit opening ratio, which were varied in the ranges of 17,5-29 mm and 0-1, respectively. The inlet gas velocity was set to 12 m/s, and particle sizes ranged from 1 to 200 μm . To evaluate fractional efficiency, a particle trap condition was applied to the walls of the collection bin. It was found that increasing the vortex diameter enhances separation efficiency. A decrease in the slit opening ratio leads to a weakened vortex structure, reduced tangential gas velocity, and increased hydraulic resistance. The best performance was observed at vortex diameters of 27,5-29 mm and slit opening ratios of 0,4-1. The fractional separation efficiency for particles sized 20-25 μm exceeds 95%.

Введение

В производственных процессах химической промышленности широкое распространение получили мелкодисперсные сыпучие материалы, такие как порошковые катализаторы и адсорбенты, используемые в процессах нефтепереработки и органического синтеза, газоразделения и сушке [1]. Эффективность указанных процессов в значительной степени определяется гранулометрическим составом: более крупные частицы уменьшают удельную активную поверхность, чрезмерно мелкие

– способствуют агрегации, выносу и нарушению устойчивости потоков [2]. В связи с этим особую актуальность приобретает задача фракционирования частиц в диапазоне 10-60 мкм как с точки зрения стабильности процессов, так и повышения их эффективности.

В настоящий момент существует широкий спектр методов разделения твёрдых частиц в газовых потоках. Каждый из них обладает определёнными преимуществами и недостатками, ограничивающими область применения. Механическое просеивание

через сито обеспечивает конструктивно простое разделение по граничному размеру частиц, однако теряет эффективность при классификации частиц размером менее 50 мкм и приводит к ускоренному износу сетчатых элементов [3,4]. Гравитационные методы, основанные на действии силы тяжести, отличаются конструктивной простотой и отсутствием движущихся компонентов, однако демонстрируют низкую степень селективности и требуют значительных пространственных ресурсов. Инерционные аппараты, включающие вихревые, позволяют эффективно отделять частицы с размером более 20-30 мкм, но не обеспечивают высокой чёткости граничного разделения. Центробежные классификаторы без подвижных элементов, в том числе циклоны, характеризуются высокой надежностью и устойчивостью к агрессивным условиям, однако ограничены в селективности. Более эффективны роторные системы с вращающимися элементами, однако их сложность, наличие быстроизнашиваемых элементов и высокая стоимость обслуживания ограничивают внедрение в производственные процессы [5]. Методы фильтрации и электрофизического улавливания обеспечивают практически полное удаление твёрдых примесей из газовых потоков, в большинстве случаев применяются преимущественно для конечной очистки [6].

Современные исследования сосредоточены на усовершенствовании геометрии классификаторов и разработке новых конструкций, сочетающих высокую эффективность с простотой исполнения. Перспективные направления включают создание статических циклонов с многовихревой структурой [7], компактных классификаторов с отдельным выходом фракций [8] и численное моделирование роторных аппаратов [9, 10]. С учётом трудоёмкости экспериментальных исследований, численное моделирование стало основным инструментом анализа и проектирования классификаторов. Однако задачи точного фракционирования мелкодисперсных частиц по-прежнему остаются открытыми.

Авторами разработан мультिवихревой классификатор с коаксиально расположенными трубами (рис. 1), в кольцевом канале которого образуются система из упорядоченных вихрей. Ввиду их небольшого диаметра происходит усиление центробежных и инерционных сил, что способствует сепарации более мелких частиц из газа [11].

Целью работы является численное моделирование процессов фракционирования мелкодисперсного сыпучего материала в мультिवихревом классификаторе с оценкой его фракционной эффективности и гидравлического сопротивления при изменении конструктивных параметров [12,13].

Объекты и методы исследования

В качестве основного инструмента численного анализа использовался программный пакет ANSYS Fluent, применяемый для моделирования турбулентного течения газа и диспергированных частиц. Трёхмерная геометрическая модель

классификатора была создана в учебной версии КОМПАС-3D, с последующим экспортом в ANSYS Fluent в формате step. На основе разработанной твердотельной модели был создан проточный объём классификатора, геометрически разделённый на несколько равных секторов [14, 15]. С учётом их осевой симметрии и идентичности, для построения расчётной сетки использовался один характерный сектор, что позволило снизить вычислительные затраты без потери достоверности моделирования [16]. Схема данного классификатора способствует образованию устойчивых многовитковых вихрей, интенсифицирующих отделение частиц под действием центробежных и инерционных сил.

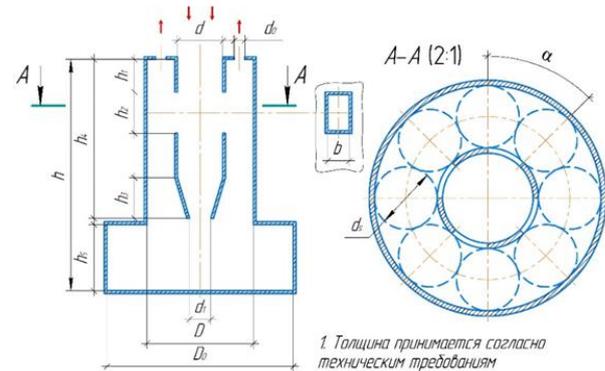


Рис. 1 — Схема конструкции мультिवихревого классификатора с обозначением основных геометрических параметров

Fig. 1 — Diagram of the multi-vortex classifier design with the designation of the main geometric parameters

Численное моделирование осуществлялось в рамках стационарной трёхмерной постановки задачи с применением турбулентной модели $k-\omega$ SST (Shear Stress Transport), которая сочетает преимущества стандартной $k-\varepsilon$ и $k-\omega$ моделей. Данный подход обеспечивает надёжное воспроизведение развитых вихревых течений и точное описание градиентных явлений вблизи твёрдых стенок, что особенно актуально для систем с интенсивным закручиванием потока и наличием приповерхностных слоёв.

Движение твёрдой фазы описывалось на основе модели дискретной фазы DPM. Этот подход реализует отслеживание индивидуальных траекторий частиц, введённых в поток, путём решения уравнений движения с учётом аэродинамического сопротивления, гравитационных и инерционных воздействий. Модель DPM особенно эффективна при низких концентрациях твёрдой фазы, когда возможно использование односторонней связи между фазами.

При построении численной модели были приняты следующие допущения, направленные на снижение вычислительных затрат при сохранении физической достоверности [17, 18]:

- взаимодействие частиц между собой в потоке газа не учитывалось, т. к. массовая концентрация частиц не превышала 10 %, применялась односторонняя связь между фазами (one-way coupling);

– газовый поток на входе в область расчёта моделировался как равномерный, без начальной закрутки и колебательных составляющих.

Особое внимание в исследовании было уделено конструктивным параметрам, влияющим на возникновение вихрей в кольцевом пространстве и интенсивность их вращения [19]. Это степень раскрытия прямоугольных щелей k и ширина кольцевого пространства, иными словами, диаметр каждого отдельного вихря d_s , который можно рассчитать по формуле:

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

где D – диаметр внешней трубы, d – диаметр внутренней трубы.

Параметр k может изменяться от 0 до 1. В случае 100 % раскрытия щелей ($k = 1$) формула выглядит следующим образом:

$$k = \frac{\pi d}{n}, \quad (2)$$

где n – количество отверстий для вихрей, определяемое по выражению (3):

$$n = \frac{l_{cp}}{d_s}, \quad (3)$$

где l_{cp} – длина окружности, проходящая через центры вихрей в кольцевом пространстве, рассчитываемая по выражению (4):

$$l_{cp} = \pi d_{cp}, \quad (4)$$

где d_{cp} – диаметр окружности, проходящей через центры вихрей в кольцевом пространстве, определяемый как

$$d_{cp} = \frac{D+d}{2}. \quad (5)$$

В ходе моделирования варьировались значения диаметра вихря d_s в пределах от 17,5 до 29 мм путем изменения диаметра внутренней трубы d от 43 до 66 мм при постоянном значении диаметра наружной трубы $D = 101$ мм. и степени раскрытия щели k – от 0 до 1. Геометрические параметры классификатора принимались следующие: $h_1 = 0$, $h_2 = 60$ мм, $h_3 = 22$ мм, $h_4 = 100$ мм, $d_2 = 16$ мм. Выбор данных параметров обусловлен их влиянием на структуру формирующегося внутри классификатора потока [20]. Диаметр вихря влияет на распределение центробежных сил и степень отклонения частиц в зависимости от их инерционности. Степень раскрытия щели определяет равномерность закрутки потока: при недостаточном раскрытии возможна потеря устойчивости вихревой структуры, тогда как чрезмерное раскрытие снижает скорость газа в щелях. Поиск наиболее эффективных размеров параметров является ключевым для повышения эффективности фракционирования мелкодисперсных частиц. При численном моделировании на стенках бункера применялось условие прилипания (trap), на остальных стенках конструкции использовалось условие отражения частиц (reflect), предполагающее упругое взаимодействие твёрдой фазы с поверхностями без потерь кинетической энергии.

В ходе работы рассчитывались значения гидравлического сопротивления аппарата,

рассчитываемые по перепаду давления между входным и выходным участками классификатора и эффективность фракционирования частиц в классификаторе, рассчитываемый по выражению (6):

$$E = \frac{n_t - n_{es}}{n_t}, \quad (6)$$

где n_t – количество частиц данного размера, осевших на стенках бункера, n_{es} – количество фракций, не подвергшихся сепарации.

Для обоснования выбора расчетной сетки и обеспечения достоверности получаемых результатов было проведено исследование сеточной независимости. В рамках численного моделирования в ANSYS Fluent последовательно изменялись параметры поверхностной сетки: минимальный и максимальный размеры ячеек уменьшались в кратное количество раз, что привело к росту числа элементов в ортогональных сечениях и общий объём расчетной сетки. Их анализ показал, что сеточная независимость достигается при 437 480 элементах, расхождение результатов между 437 480 и 1 973 411 элементами не превышает 2,19 %. Это позволило использовать настройки сеточной модели для дальнейшего параметрического анализа, как обеспечивающую баланс между точностью моделирования и вычислительными затратами.

Результаты и их обсуждение

В процессе численного моделирования установлено, что изменение диаметра вихрей d_s в диапазоне от 17,5 до 29 мм и степени раскрытия щелей k от 0 до 1 оказывает значительное влияние на характер и скорость возрастания фракционной эффективности. Анализ полученных зависимостей показал, что в большинстве случаев форма кривой фракционной эффективности в зависимости от диаметра частиц a имеет сложную структуру, включающую два выраженных экстремума. Первый пик эффективности наблюдается для частиц диаметром до 40 мкм, за которым следует резкое снижение значений до локального минимума в диапазоне 50-65 мкм, затем – постепенный рост с выходом на условно стабильное плато при $a > 85$ мкм.

Предполагается, что такая форма кривых обусловлена совокупным влиянием двух физических факторов. Во-первых, при контакте частиц со стенками конструкции происходит упругое взаимодействие с возможным их последующим возвращением в вихревой поток или попаданием в соседний. Во-вторых, восходящий газовый поток, формирующийся в нижней части конструкции за счёт выхода через центральное отверстие, способен повторно захватывать осаждающиеся частицы в кольцевом пространстве, что дополнительно способствует их рециркуляции.

Выявленная структура кривой позволяет условно выделить три характерные зоны. В первой зоне (мелкодисперсные частицы, до 25-30 мкм) наблюдается рост эффективности, обусловленный действием центробежных сил, достаточных для вывода частиц из газового потока. При этом их инерционности недостаточно для преодоления

аэродинамического сопротивления и возвращения в вихревую область после взаимодействия с твёрдой поверхностью. Фракционная эффективность частиц размером 30-65 мкм снижается, так как частицы обладают достаточным импульсом для отражения от поверхности и вовлечения в повторную циркуляцию, что снижает вероятность осаждения. Затем эффективность снова возрастает за счёт преобладания гравитационного и инерционного воздействия, обеспечивающего осаждение крупнозернистых фракций.

Отдельные кривые фракционной эффективности имеют иной вид и характеризуют монотонный рост без выраженных экстремумов. Такая форма кривой, вероятно, обусловлена дестабилизацией вихревой структуры в кольцевом пространстве при определённых геометрических параметрах. В этих случаях траектория движения частиц, обусловленная инерцией и гравитацией процесса разделения приобретает черты инерционного осаждения с меньшей степенью влияния закрутки, что снижает эффективность разделения по размеру частиц.

Анализ графиков (рис. 2-5) показал, что получение кривых с 2 экстремумами преимущественно зависит от диаметра завихрений d_s , в меньшей степени от k . При увеличении d_s от 17,5 до 29 мм максимальное значение эффективности первых пиков в среднем составляет 0,28 (рис. 2), 0,53 (рис. 3), 0,73 (рис. 4), 0,83 (рис. 5).

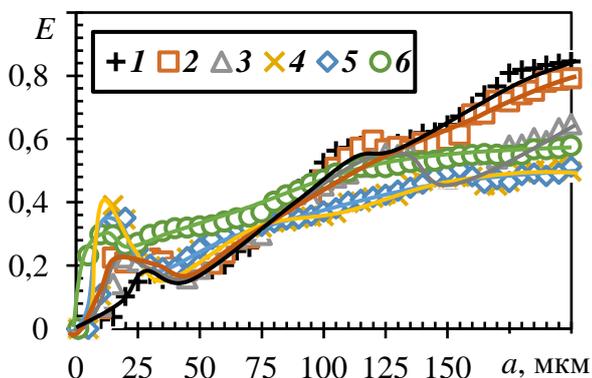


Рис. 2 – Фракционная эффективность мультивихревого классификатора при различной степени раскрытия щели k : 1 – 1; 2 – 0,8; 3 – 0,6; 4 – 0,4; 5 – 0,2; 6 – 0,1 ($d_s = 17,5$ мм, $d_0 = 12$ мм)

Fig. 2 – Fractional efficiency of a multi-vortex classifier with varying degrees of slit opening k : 1 – 1; 2 – 0,8; 3 – 0,6; 4 – 0,4; 5 – 0,2; 6 – 0,1 ($d_s = 17,5$ мм, $d_0 = 12$ мм)

При k равной 0,1, 0,2, 0,4, 0,6, 0,8 и 1 точка максимума первого пика соответствует E равной 0,29, 0,35, 0,39, 0,22, 0,21 и 0,17 соответственно. При этом точка минимума второго пика соответствует E равной 0,26, 0,19, 0,17, 0,18, 0,18 и 0,17 при k равной 0,1, 0,2, 0,4, 0,6, 0,8 и 1 соответственно (рис. 2).

Точка максимума первого пика на рис. 3 соответствует E равной 0,45, 0,59, 0,59, 0,6, 0,55 и 0,39, минимума – 0,31, 0,26, 0,33, 0,41, 0,42 и 0,35, при k равной 0,1, 0,2, 0,4, 0,6, 0,8 и 1 соответственно.

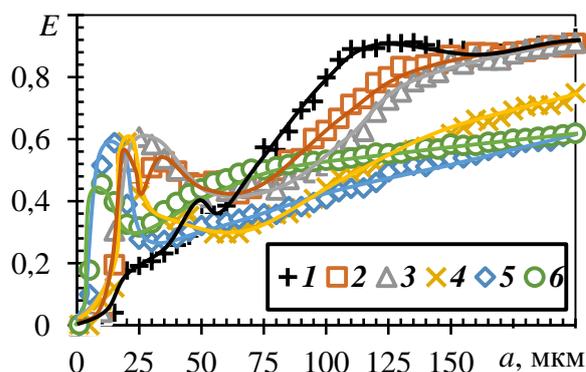


Рис. 3 – Фракционная эффективность мультивихревого классификатора при различной степени раскрытия щели k : 1 – 1; 2 – 0,8; 3 – 0,6; 4 – 0,4; 5 – 0,2; 6 – 0,1 ($d_s = 21$ мм, $d_0 = 12$ мм)

Fig. 3 – Fractional efficiency of a multi-vortex classifier with varying degrees of slit opening k : 1 – 1; 2 – 0,8; 3 – 0,6; 4 – 0,4; 5 – 0,2; 6 – 0,1 ($d_s = 21$ мм, $d_0 = 12$ мм)

При k равном 0,1, 0,2, 0,4, 0,6, 0,8 и 1 эффективность достигает точки максимума, соответствующей значению E равной 0,67, 0,79, 0,59, 0,83, 0,68 и 0,58 соответственно, точка минимума соответствует значению E равной 0,47, 0,51, 0,69, 0,64, 0,46 и 0,39 соответственно. (рис. 4)

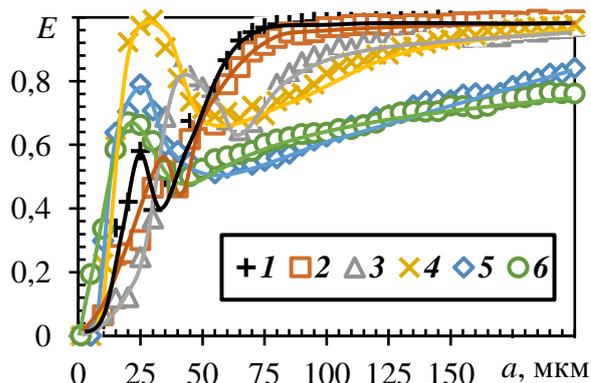


Рис. 4 – Фракционная эффективность мультивихревого классификатора при различной степени раскрытия щели k : 1 – 1; 2 – 0,8; 3 – 0,6; 4 – 0,4; 5 – 0,2; 6 – 0,1 ($d_s = 27,5$ мм, $d_0 = 12$ мм)

Fig. 4 – Fractional efficiency of a multi-vortex classifier with varying degrees of slit opening k : 1 – 1; 2 – 0,8; 3 – 0,6; 4 – 0,4; 5 – 0,2; 6 – 0,1 ($d_s = 27,5$ мм, $d_0 = 12$ мм)

На рис. 5 точка максимума первого пика соответствует E равной 0,65, 0,89, 0,99, 0,73, 0,81 и 0,78 при k равном 0,1, 0,2, 0,4, 0,6, 0,8 и 1 соответственно, точка минимума второго пика соответствует E равной 0,57, 0,51, 0,71, 0,47, 0,47 и 0,56 соответственно.

В ходе исследований установлено, что потери давления в классификаторе составляют от 500,1 Па при диаметре вихря $d_s = 29$ и степени раскрытия щели $k = 1$ до 3706,8 Па при диаметре вихря $d_s = 17,5$ и степени раскрытия щели $k = 0,1$.

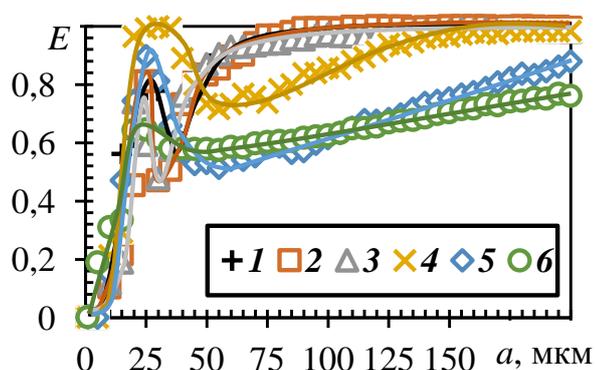


Рис. 5 – Фракционная эффективность мультивихревого классификатора при различной степени раскрытия щели k : 1 – 1; 2 – 0,8; 3 – 0,6; 4 – 0,4; 5 – 0,2; 6 – 0,1 ($d_s = 29$ мм, $d_0 = 12$ мм)

Fig. 5 – Fractional efficiency of a multi-vortex classifier with varying degrees of slit opening k : 1 – 1; 2 – 0,8; 3 – 0,6; 4 – 0,4; 5 – 0,2; 6 – 0,1 ($d_s = 29$ mm, $d_0 = 12$ mm)

Таким образом, результаты проведённого исследования свидетельствуют о том, что за счёт подбора конструктивных параметров классификатора можно отделять фракции с заданным граничным размером и требуемой степенью чистоты. В частности, при значении параметров $d_s = 27,5$ мм, $k = 0,4$ и $d_s = 29$ мм, $k = 0,4$ достигается фракционная эффективность, превышающая 95 % для частиц размером 20-40 мкм и частиц размером более 60 мкм, что указывает на высокую степень селективности аппарата в данном размерном диапазоне.

Выводы

1. Анализ формы полученных кривых фракционной эффективности показал наличие характерных экстремумов, обусловленных сложной динамикой движения частиц в классификаторе. Выявленная структура кривой, включающая локальный максимум, минимум и выход на плато, возникает из-за частиц, которые могут испытывать упругое соударение, в результате чего часть из них может попасть в соседний вихрь или вернуться обратно, и влияния восходящего газового потока, возникающего при выходе газа через нижнее отверстие внутренней трубы.

2. Увеличение диаметра вихря d_s сопровождается ростом фракционной эффективности классификатора. Такая зависимость обусловлена расширением радиуса закручивания частиц, что обеспечивает более продолжительное пребывание твёрдой фазы в зоне действия центробежных и инерционных сил. Кроме того, увеличение диаметра вихревого потока способствует снижению импульса частиц в момент их отклонения к периферии, что снижает вероятность их последующего отражения от стенок аппарата и возврата в основное течение.

3. Получено, что при $k > 0,8$ ($d_s = 27,5$ мм и $d_s = 29$ мм) достигается более быстрый рост фракционной эффективности улавливания твердых частиц до $E \approx 1$ (при размере частиц $a > 75$ мкм), при $0,4 < k < 0,6$ (d_s

= 27,5 мм и $d_s = 29$ мм) достигается эффективное улавливание узких фракций частиц.

4. Снижение степени раскрытия щели k приводит к увеличению гидравлического сопротивления классификатора Δp .

Полученные результаты подтверждают возможность регулирования граничного размера разделения и чистоты выделения фракций путём вариации конструктивных параметров.

Литература

1. В. Э. Зинуров, А. В. Дмитриев, О. С. Дмитриева, А. М. Мугинов, *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 58(3), 645–650 (2024).
2. Н. А. Марцулевич, О. М. Флисюк, У. Г. Чиркунова, *Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института*, 53(79), 61-64 (2020). DOI 10.36807/1998-9849-2020-53-79-61-64
3. И. Н. Мадышев, В. В. Харьков, В. Г. Болотов и А. В. Дмитриев, *IOP Conference. Earth and Environmental Science*, 988, 4, 042069 (2022).
4. В. С. Францкевич, А. М. Волк, *Труды БГТУ. Серия 2: Химические технологии, биотехнология, геоэкология*, 1(217), 62-66 (2019).
5. В. Э. Зинуров, И. Н. Мадышев, А. Р. Ивахненко, И. Р. Петрова, *Ползуновский вестник*, 2, 205-211 (2021)
6. А. В. Шваб, П. Н. Зятиков, Ш. Р. Садретдинов, А. Г. Чепель, *Прикладная механика и техническая физика*, 51, 2(300), 39-48 (2010).
7. S. A. Maslov, V. L. Natyaganov, *Fiz.-Khim. Kinet. Gazov. Din.*, 20, 2, 1-8 (2019).
8. А. В. Жук, *Искусственный интеллект*, 168-179 (2005).
9. М. Н. Орешина, *Информационные системы и технологии*, 2, 56-60 (2019).
10. В. М. Червяков, *Тамбов: ТГУ*, 31 (2007).
11. Z. Sun, L. Liang, C. Liu, Y. Zhu, L. Zhang, G. Yang, *Advanced Powder Technology*, 32, 4, 977-986 (2021).
12. В. Э. Зинуров, В. В. Харьков, Е. В. Панкратов, А. В. Дмитриев, *International Journal of Engineering and Technology Innovation*, 12, 4, 336-346 (2022).
13. А. В. Шваб, А. Е. Соломаха, *Известия вузов. Физика*, 64, 2-2(759), 155-161 (2021). DOI 10.17223/00213411/64/2-2/155
14. H. A. Petit, C. I. Paulo, O. A. Cabrera, E. F. Irassar, *Applied Mathematical Modelling*, 77, 617-634 (2020).
15. P. Fu, F. Wang, L. Ma, X. Yang, H. Wang, *Separation and Purification Technology*, 158, 357-366 (2016).
16. Н. А. Марцулевич, О. М. Флисюк, В. П. Мешалкин, А. В. Гарабаджиу, *Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология*, 64, 10, 84-90 (2021). DOI 10.6060/ivkkt.20216410.6455
17. В. И. Гальперин, *Химическая промышленность сегодня*, 3, 33-44 (2006).
18. H. Masuda, K. Higashitani, T. Yoshida, *Powder Technology*, 383, 522-535 (2021).
19. В. Э. Зинуров, А. В. Дмитриев, М. А. Рузанова, О. С. Дмитриева, *E3S Web of Conferences*, 193, 01056 (2020).
20. Z. Sun, L. Liang, C. Liu, Y. Zhu, L. Zhang, G. Yang, *Advanced Powder Technology*, 32, 4, 977-986 (2021).

References

1. V. E. Zinurov, A. V. Dmitriev, O. S. Dmitrieva, A.M. Gribov, *Theoretical foundations of chemical technology*, 58(3), 645-650 (2024).
2. N. A. Martsulevich, O. M. Flisyuk, U. G. Chirkunova, *Izvestiya St. Petersburg State Technological Institute*, 53(79), 61-64 (2020). DOI 10.36807/1998-9849-2020-53-79-61-64

3. I. N. Madychev, V. V. Sharkov, V. G. Bolotov and A.V. Dmitriev, *IG Conference. Earth and Environmental science*, **988**, 4, 042069 (2022).
4. V. S. Frantskevich, A.M. Volk, *Proceedings of BSTU. Series 2: Chemical technologies, Biotechnology, Geoecology*, **1(217)**, 62-66 (2019).
5. V. E. Zinurov, I. N. Madychev, A. R. Ivahnenko, I. R. Petrova, *Polzunovsky Vestnik*, **2**, 205-211 (2021)
6. A.V. Shvab, P. N. Zyatikov, S. R. Sadretdinov, A. G. Chepel, *Applied mechanics and technical physics*, **51**, 2(300), 39-48 (2010).
7. S. A. Maslov, V. L. Natyaganov, *Fiz.-Khim. Kinet. Gazov. Din.*, **20**, 2, 1-8 (2019).
8. A. V. Zhuk, *Artificial Intelligence*, 168-179 (2005).
9. M. N. Oreshina, *Information Systems and Technologies*, **2**, 56-60 (2019).
10. V. M. Chervyakov, *Tambov: TSU*, **31** (2007).
11. Z. Song, L. Liang, K. Liu, Y. Zhu, L. Zhang, G. Yang, *Advanced powder technology*, **32**, 4, 977-986 (2021).
12. V. E. Zinurov, V. V. Sharkov, E. V. Pankratov, A.V. Dmitry, *International Journal of Engineering and Technological Innovations*, **12**, 4, 336-346 (2022).
13. A.V. Shvab, A. E. Solomakha, *Izvestiya vuzov. Physics*, **64**, 2-2(759), 155-161 (2021). DOI 10.17223/00213411/64/2-2/155
14. H. A. Petit, K. I. Paulo, O. A. Cabrera, E. F. Irassar, *Applied mathematical modeling*, **77**, 617-634 (2020).
15. P. Fu, F. Wang, L. Ma, H. Yang, H. Wang, *Separation and purification technology*, **158**, 357-366 (2016).
16. N. A. Martsulevich, O. M. Flisyuk, V. P. Meshalkin, A.V. Garabagiu, *Izvestiya vysshikh educational institutions. Chemistry and Chemical technology*, **64**, 10, 84-90 (2021). DOI 10.6060/ivkkt.20216410.6455
17. V. I. Galperin, *Chemical Industry today*, **3**, 33-44 (2006).
18. H. Masuda, K. Higashitani, T. Yoshida, *Powder Technology*, **383**, 522-535 (2021).
19. V. E. Zinurov, A.V. Dmitriev, M. A. Ruzanova, O. S. Dmitrieva, *E3S Web Conferences*, **193**, 01056 (2020).
20. Z. Sun, L. Liang, K. Liu, Y. Zhu, L. Zhang, G. Yang, *Advanced powder technology*, **32**, 4, 977-986 (2021).

© **М. А. Прец** – ст. преп., Казанский государственный энергетический университет (КГЭУ), Казань, Россия, precmari@gmail.com; **В. Э. Зинуров** – к.т.н, и.о. зав. кафедрой Инженерной графики, КГЭУ, vadd_93@mail.ru; **А. В. Дмитриев** – д.т.н., проф., зав. кафедрой Автоматизации технологических процессов и производств, КГЭУ, ieremiada@gmail.com; **В. А. Вдовина** – студент КГЭУ, vik.ktor.ria@mail.ru.

© **M. A. Prets** – Senior Lecturer, Kazan State Power Engineering University (KSPEU), Kazan, Russia, precmari@gmail.com; **V. E. Zinurov** – PhD (Technical Sci.), Acting Head of the Department of Engineering Graphics, KSPEU, vadd_93@mail.ru; **A. V. Dmitriev** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Prof., Head of the Department of Automation of Technological Processes and Production, KSPEU, ieremiada@gmail.com; **V. A. Vdovina** – Student, KSPEU, vik.ktor.ria@mail.ru.

Дата поступления рукописи в редакцию – 04.04.25.

Дата принятия рукописи в печать – 15.06.25.