

М. А. Прец (ст. преп.)^а, В. Э. Зинуров (к.т.н., зав.каф.)^а,
А. В. Дмитриев (д.т.н., зав.каф.)^б, А. М. Мугинов (магистрант)^б

ФРАКЦИОНИРОВАНИЕ ТВЕРДОЙ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ В ВОЗДУШНОМ ПОТОКЕ В МУЛЬТИВИХРЕВОМ КЛАССИФИКАТОРЕ

Казанский государственный энергетический университет,

^а кафедра «Инженерная графика», ^б кафедра «Автоматизация технологических процессов и производств»
420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51; e-mail: ieremiada@gmail.com

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

FRACTIONATION OF THE SOLID DISPERSED PHASE IN AN AIR FLOW IN A MULTI-VORTEX CLASSIFIER

Kazan State Power Engineering University

51, Krasnoselskaya Str., 420066, Kazan, Russia; e-mail: ieremiada@gmail.com

Рассмотрено фракционирование мелкодисперсных частиц в воздушном потоке с использованием мультिवихревого классификатора новой конструкции. Численный эксперимент проведен в среде Ansys Fluent с применением модели турбулентности *k- ω SST*, обеспечивающей точный учет высоких градиентов скорости в зоне завихрений. На основе трехмерных моделей аппарата было выполнено 35 численных экспериментов, охватывающих широкий диапазон варьируемых параметров, проанализировано поведение фракционной эффективности в диапазоне размеров частиц от 1 до 200 мкм и выделены пять характеристических точек на кривой, отражающих граничные и переходные состояния процесса сепарации. Установлено, что повышение диаметра вихрей способствует формированию устойчивой мультिवихревой структуры и увеличивает итоговую эффективность разделения. Наиболее высокие показатели эффективности и выраженная экстремальная форма кривой наблюдаются при диаметре вихрей 27.5–29 мм. Получены степенные зависимости корреляции между характеристическими размерами частиц и отношением скоростей потока, что позволяет использовать результаты для инженерной оптимизации классификаторов, работающих в условиях переработки порошковых систем нефтехимии.

Ключевые слова: вихревая структура; воздушный классификатор; граничный размер зерна; крупность граничного зерна; мультिवихревой классификатор; процентиль; сепарация частиц; фракционирование частиц; центробежный классификатор; эффективность сепарации

This article examines the fractionation of fine particles in an air stream using a novel multivortex classifier. Numerical experiments were conducted in Ansys Fluent using the *k- ω SST* turbulence model, which ensures accurate modeling of high velocity gradients in vortex zones. The study aims to numerically investigate the fractionation of a solid dispersed phase in an air stream by varying the structural parameters of the multivortex classifier. Based on 3D-models of the apparatus, 35 numerical experiments were performed, covering a wide range of adjustable parameters. The simulation analyzed the behavior of fractional efficiency for particle sizes ranging from 1 to 200 μm , identifying five characteristic points on the curve that reflect boundary and transitional states of the separation process. It was established that increasing the vortex diameter promotes the formation of stable multivortex structures and enhances overall separation efficiency. The highest efficiency and a pronounced extremal curve shape were observed at vortex diameters of 27.5–29 mm. Power-law correlations were derived between characteristic particle sizes and flow velocity ratios, enabling the application of these results for engineering optimization of classifiers operating in petrochemical powder processing.

Key words: air classifier; boundary grain size; centrifugal classifier; cut-off size; multivortex classifier; particle fractionation; particle separation; percentile; separation efficiency; vortex structure

Дата поступления 24.04.25

Фракционирование мелкодисперсных частиц является ключевым процессом в химической промышленности, определяющим качество и функциональность конечных продуктов¹. Узкий гранулометрический состав материалов критически важен для таких областей, как производство катализаторов, адсорбентов, керамики, полимерных композитов и функциональных покрытий. Например, в работах²⁻⁴ подчеркивается, что однородность частиц силикагеля или керамических порошков напрямую влияет на их адсорбционную емкость, механическую прочность и термическую стабильность. Кроме того, эффективное разделение частиц снижает потери ценных компонентов, минимизирует энергозатраты на повторную переработку и уменьшает экологическую нагрузку, что особенно актуально в контексте устойчивого развития^{5, 6}.

Классификация мелкодисперсных частиц в химических технологиях включает сухие и мокрые методы. Сухая классификация, например ситовые грохоты, воздушные классификаторы, отличается низкими энергозатратами и простотой эксплуатации, но имеет ограничения при работе с частицами меньше 10 мкм из-за агломерации и низкой точности разделения⁷⁻⁹. Мокрая классификация, например гидроциклоны, седиментация, обеспечивает высокую эффективность для наночастиц и предотвращает пылеобразование, однако требует значительных водных ресурсов, сложной утилизации отходов, а также не подходит для гидрофильных веществ¹⁰⁻¹².

Сухая классификация мелкодисперсных частиц в химических технологиях включает несколько методов, каждый из которых обладает уникальными преимуществами и ограничениями. Гравитационная классификация частиц отличается энергоэффективностью и экологичностью, что делает ее привлекательной для химических технологий, однако аппараты гравитационной классификации зачастую имеют относительно крупные габариты и низкую эффективность классификации частиц вне диапазона от 0.1 до 1 мм¹³. Преимущества метода включают низкие затраты и простоту интеграции в технологические процессы, но он ограничен зависимостью от плотности частиц и низкой скоростью обработки. Турбинные классификаторы, основанные на вращающихся лопастях, достигают сверхтонкого разделения (до 0.5 мкм), но их эксплуатация сопряжена с высокими энергозатратами и чувствительностью к механическому износу¹⁴. Струйные классификаторы применяют эффект Коанда и инерцию частиц, демонстрируя эффективность для наноразмерных фракций, однако их калибровка усложняется зависимостью от стабильности скорости га-

зового потока¹⁵. Центробежные классификаторы, использующие вихревое движение, имеют относительно простую конструкцию, что обеспечивает низкие эксплуатационные затраты. Также данные аппараты эффективны при фракционировании частиц до 100 мкм, но их производительность снижается для фракций менее 10 мкм из-за ограниченных центробежных сил.

Актуальной задачей в области обработки дисперсных систем остается оптимизация методологических подходов к фракционному разделению частиц по заданному размерному диапазону. Совершенствование аппаратных решений для классификации частиц, включая модернизацию действующих установок и разработку инновационных классифицирующих систем, сохраняет свою научно-прикладную значимость в контексте повышения эффективности технологических циклов¹⁶.

На основе ранее проведенных исследований была предложена конструкция мультивихревого классификатора (рис. 1)¹⁷.

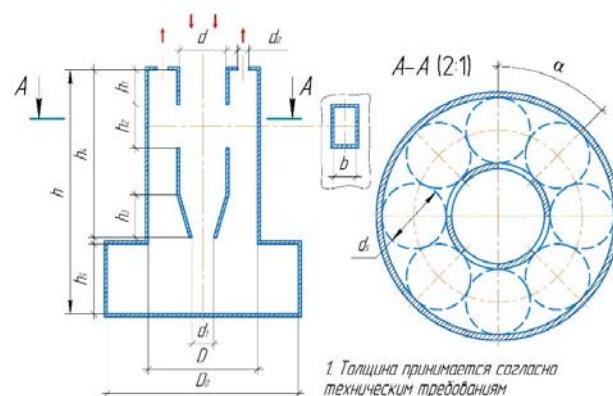


Рис. 1. Мультивихревой классификатор: d – диаметр входной трубы; d_0 – диаметр отверстий, равномерно расположенных по окружности в поперечной пластине; d_1 – диаметр нижнего отверстия внутренней трубы, предназначенного для сыпания частиц в бункер; d_s – диаметр завихрений в кольцевом пространстве; D – внутренний диаметр наружной трубы; D_0 – диаметр бункера; b – ширина прямоугольных щелей, выполненных во внутренней трубе; α – угловой сектор, определяющий положение щели в кольцевом пространстве; h – высота классификатора; h_1 – расстояние от верхней пластины до прямоугольных щелей; h_2 – высота прямоугольных щелей; h_3 – длина конического патрубка; h_4 – высота внутренней трубы

Принцип его действия основан на формировании в кольцевом зазоре серии устойчивых завихрений. Газовый поток, поступающий через входное отверстие d во внутренней трубе, при прохождении через прямоугольные щели b приобретает вращательное движение в виде множества завихрений¹⁸. Возникающие центробежные силы и инерционные воздействия при резком измене-

нии траектории потока обеспечивают селективное осаждение крупных фракций в бункер аппарата, тогда как более мелкие частицы уносятся вверх выходящим потоком газа.

Особый интерес при эксплуатации аппаратов, предназначенных для фракционирования сыпучих материалов, представляет влияние геометрических параметров на граничный размер разделяемых частиц. В частности, для данной модели мультивихревого классификатора актуально определение зависимости эффективности фракционирования от диаметра завихрений в кольцевом зазоре d_s , степени раскрытия прямоугольных щелей k и диаметра отверстий в поперечной пластине d_0 (рис. 1).

Штриховыми линиями в сечении А–А обозначены области вращения завихрений

Диаметр завихрений d_s рассчитывается по выражению:

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

где δ – толщина стенки входной трубы, мм.

Степень раскрытия прямоугольных щелей k вычисляется по формуле:

$$k = \frac{b}{b_n}, \quad (2)$$

где b_n – ширина щели при полном раскрытии, мм.

Следует отметить, что на рис. 1 в сечении А–А представлен случай с полным раскрытием прямоугольных щелей.

Объекты и методы исследования

Целью работы является численное исследование фракционирования твердой дисперсной фазы в воздушном потоке при варьировании конструктивных параметров мультивихревого классификатора.

Исследование проводилось в программном модуле *Ansys Fluent*, позволяющие моделировать гидрогазодинамические процессы на основе численного решения системы уравнений Навье-Стокса совместно с уравнением сплошности среды. В качестве модели турбулентности применялась $k-\omega$ SST, обеспечивающая корректную оценку зон с интенсивными градиентами скорости, характерных для вихревых течений.

На первом этапе были разработаны 35 3D-моделей мультивихревого классификатора, каждая из которых отличалась одним измененным конструктивным параметром относительно базовых

размеров: $d = 54$ мм, $d_0 = 12$ мм, $d_s = 17.15$ мм, $d_1 = 16$ мм, $h_1 = 0$ мм, $h_2 = 60$ мм, $h_3 = 22$ мм, $h_4 = 100$ мм, $D = 101$ мм. Исследуемые параметры варьировались в заданных диапазонах: d_s от 17.5 до 29 мм, k от 0.1 до 1 и d_0 от 4 до 16 мм. Для изменения конструктивного параметра d_s варьировался диаметр внутренней трубы d в пределах 43–66 мм (рис. 1).

На втором этапе на основе твердотельных 3D-моделей создавались их проточные объемы и генерировались расчетные сетки. На данном этапе проводился подбор наиболее подходящих параметров расчетной сетки на основе базовой модели мультивихревого классификатора. Рассматривались три ключевых параметра: максимальный размер ячейки MS , угол нормали к кривизне поверхности CNA (определяет степень детализации сетки в зонах высокой кривизны) и число ячеек на зазор CPG (определяет плотность сетки в узких зазорах геометрии). Критерием сеточной независимости являлись потери давления в классификаторе Δp . В ходе предварительного исследования установлено, что стабилизация Δp начинается при использовании сетки, содержащей около 437 480 ячеек, что соответствует параметрам $MS = 0.86$ мм, $CNA = 12^\circ$ и $CPG = 2$. Расхождение между моделью с 437 480 ($\Delta p = 738.1$ Па при $W = 12$ м/с) и 984 019 ($\Delta p = 745.7$ Па при $W = 12$ м/с) ячейками составило не более 1.02%, что свидетельствует о достижении сеточной независимости.

На третьем этапе задавались начальные и граничные условия: температура воздушного потока $t = 25$ °С, плотность сферических частиц $\rho_a = 1075$ кг/м³, размер частиц a задавался в диапазоне от 1 до 200 мкм, скорость воздушного потока на входе в классификатор $W = 12$ м/с, на выходе из классификатора задавалось давление 105 Па. Взаимодействие частиц со стенками аппарата определялось следующими условиями: на стенках бункера предполагалось их прилипание, на остальных стенках – «отпрыгивание». При моделировании дисперсной фазы использовалась модель *DPM*, частицы рассматривались как односвязные, то есть не взаимодействующие между собой. Учитывая, что модель является осесимметричной, то осуществлялось секторное моделирование.

Для оценки полученных результатов рассчитывалась фракционная эффективность E , вычисляемая по выражению:

$$E = 1 - \frac{G_{\text{out}}}{G_{\text{in}}}, \quad (3)$$

где G_{in} – массовый расход частиц, поступивших в аппарат, кг/с;

G_{out} – массовый расход частиц, покинувших аппарат, кг/с.

Результаты и их обсуждение

В ходе численного моделирования были получены зависимости фракционной эффективности мультивихревого классификатора от размера частиц в диапазоне от 1 до 200 мкм (рис. 2–5). Анализ показал, что форма кривой фракционной эффективности в значительной степени определяется конструктивными параметрами классификатора, в частности диаметром кольцевого вихря d_s и степенью раскрытия прямоугольных щелей k . На рис. 2, а представлены фракционные кривые для различных значений d_s при фиксированных параметрах $d_0 = 12$ мм и $k = 1$.

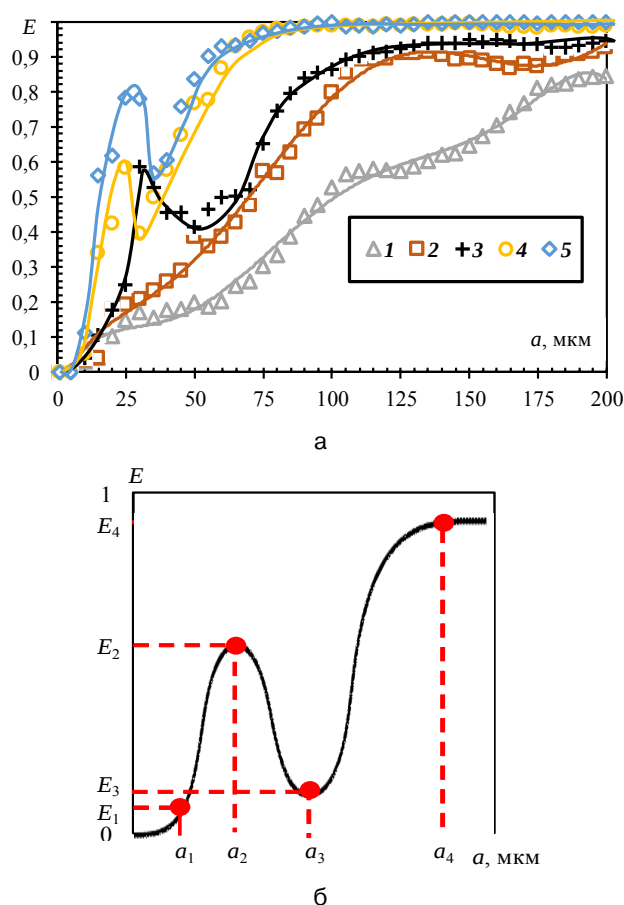


Рис. 2. Фракционная эффективность мультивихревых классификаторов: а – 1 – $d_s = 17.5$ мм; 2 – $d_s = 21$ мм; 3 – $d_s = 23.5$ мм; 4 – $d_s = 27.5$ мм; 5 – $d_s = 29$ мм ($d_0 = 12$ мм, $k = 1$); б – обобщенная кривая фракционной эффективности при развитой вихревой структуре

Установлено, что преимущественно при $d_s \leq 21$ мм (кривые 1 и 2) эффективность возрастает монотонно, что свидетельствует о слабо сформированной вихревой структуре и низкой селективности процесса. Вероятно, это связано с тем, что при уменьшении диаметра вихрей увеличивается их количество в кольцевом пространстве, что, в свою очередь, приводит к недостаточной интенсивности каждого отдельного завихрения и затрудняет фор-

мирование устойчивой мультивихревой структуры. При $d_s \geq 23.5$ мм (кривые 3, 4 и 5) кривые приобретают более выраженный характер: формируются два пика эффективности, за которыми следует участок выравнивания (плато), что соответствует более качественному разделению частиц по размеру. Для интерпретации полученных кривых предложена схема обобщенной формы фракционной зависимости (рис. 2б), в которой введены характерные размеры частиц: a_1 – критический размер, при котором эффективность E_1 составляет менее 5%, a_2 – размер частиц, при котором достигается максимальная эффективность первого пика E_2 , a_3 – размер частиц, при котором достигается локальный минимум фракционной эффективности E_3 , a_4 – размер частиц, при котором эффективность E_4 выходит на плато. Дополнительно был введен параметр a_5 – размер частиц, при котором эффективность фракционирования $E_5 \geq 95\%$. Включение данного параметра обусловлено практической значимостью для оценки полноты отделения крупной фракции и обеспечения требуемой чистоты конечного продукта. Следует отметить, что значение $E_5 \geq 95\%$ определено не для всех исследованных кривых, поскольку в ряде случаев фракционная эффективность в диапазоне размеров частиц 1–200 мкм не достигает порогового значения.

Анализ полученных зависимостей, представленных на рис. 2, показал, что даже при формировании устойчивой вихревой структуры в кольцевом пространстве мультивихревого классификатора сохраняется влияние ряда факторов, ограничивающих фракционную эффективность устройства. Выявленные явления требуют комплексного рассмотрения с позиций газодинамики.

Во-первых, существенное влияние на формирование завихрений оказывает восходящий поток газа, образующийся при прохождении части воздушного потока через нижнее отверстие внутренней трубы d_1 (рис. 1). Известно, что газ, содержащий твердую фазу, входящий в мультивихревой классификатор разделяется на два потока¹⁹. Первый из них поступает через прямоугольные щели во внутренней трубе и формирует в кольцевом зазоре мультивихревую структуру. Второй – направляется через отверстие в нижней части внутренней трубы, создавая восходящий поток, который затем проникает в кольцевое пространство. Взаимодействие этих потоков приводит к частичной дестабилизации завихрений. Это снижает эффективность сепарации частиц, нарушая локальные центробежные поля и увеличивая вероятность уноса частиц с восходящим потоком.

Во-вторых, важную роль в механизме фракционирования играет соотношение между цент-

робежными силами и импульсом частиц, определяющим их поведение после выхода из зоны вращения. В рассматриваемой конструкции разделение частиц происходит преимущественно под действием центробежных сил, величина которых возрастает при увеличении скорости газа и/или уменьшении радиуса завихрения. Однако при сепарации частицы из вихревого потока в направлении внутренней цилиндрической стенки она сохраняет значительный импульс, и дальнейшая траектория определяется величиной этого импульса и углом соударения; возможны два сценария:

1. Осаждение. Частица отскакивает от стенки с незначительной скоростью, попадает в пристеночную зону с пониженной турбулентностью и, в большинстве случаев, оседает в бункере классификатора.

2. Рециркуляция. Частица, обладая большим импульсом, возвращается в зону вихря, где вновь вовлекается в циркуляционный поток, что увеличивает вероятность ее повторного уноса.

Подобный механизм объясняет наличие кривых с характерной двойной экстремальной структурой: резким ростом эффективности на начальном участке, последующим падением и последующим выходом на плато. Первоначальный подъем объясняется интенсификацией центробежного воздействия на частицы малых и средних размеров. Спад эффективности в средней области, соответствующий локальному минимуму E_3 обусловлен тем, что частицы с определенным импульсом отскакивают от стенок в область соседних вихрей. Повторный рост эффективности для более крупных частиц обусловлен доминированием гравитационного фактора, при котором масса частиц способствует их осаждению, несмотря на эффект повторного вовлечения.

Установлено (рис. 2а), что при увеличении диаметра вихрей d_s от 17.5 до 29 мм фракционные кривые приобретают более выраженную форму с отчетливыми максимумами и минимумами, и характеризуются ускоренным выходом на плато и повышением итоговой эффективности. Максимальные значения эффективности составили: 84.5% ($d_s = 17.5$ мм), 92.6% ($d_s = 21$ мм), 94.4% ($d_s = 23.5$ мм), 99.5% ($d_s = 27.5$ мм) и 99.6% ($d_s = 29$ мм) при фиксированных $k = 1$ и $d_0 = 12$ мм. В качестве базового значения для дальнейшего анализа был выбран $d_s = 23.5$ мм поскольку при этом числом значении параметра реализуется характерная форма кривой с двумя экстремумами, но итоговая эффективность остается ниже предельных значений. Это позволяет выявить влияние других геометрических параметров на фракционную эффективность. Выбор значений $d_s = 27.5$ мм и $d_s = 29$ мм мог бы привести к изначальной эффективности,

близкой к 100%, и, как следствие, к сглаживанию эффекта от изменения других факторов.

При высоких значениях $k \geq 0.8$ фракционная эффективность демонстрирует сглаженную структуру: первые два пика выражены слабо, выход на плато происходит при более крупных размерах частиц. Такая форма кривой указывает на частичную дестабилизацию завихрений, вероятно связанную с высокой скоростью истечения газа из щелей и разрушением локальной вихревой структуры. Наиболее выраженные пики и четко оформленная форма кривых наблюдаются при $0.4 \leq k \leq 0.6$ (кривые 3 и 4). В этом диапазоне обеспечивается оптимальное сочетание геометрических и гидродинамических условий: скорость газа через щели достаточна для формирования устойчивого завихрения, но при этом не вызывает его разрушения. Кроме того, эффективность фракционирования достигает высоких значений при сохранении информативной формы кривой, что делает данный диапазон k оптимальным с инженерной точки зрения. При понижении степени раскрытия до $k \leq 0.2$ наблюдается снижение эффективности и сдвиг пиков в область меньших размеров частиц. Очевидно, что при столь узких щелях газовый поток недостаточно интенсивен для формирования полноценных завихрений, что приводит к снижению селективности. С целью дальнейшего анализа влияния других конструктивных факторов при сохранении чувствительности модели, в рамках данной работы за базовое значение было принято $k = 1$ (рис. 3).

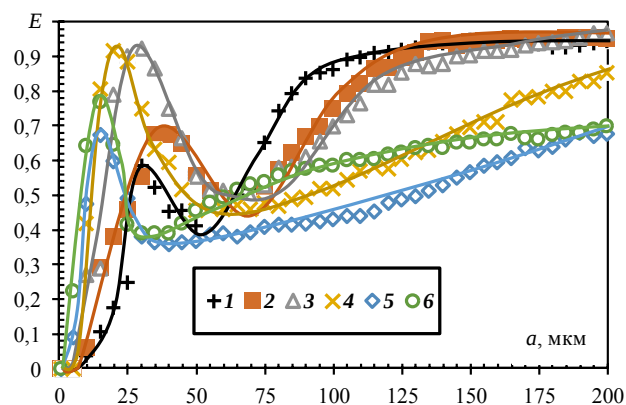


Рис. 3. Фракционная эффективность мультивихревых классификаторов: 1 – $k = 1$; 2 – $k = 0.8$; 3 – $k = 0.6$; 4 – $k = 0.4$; 5 – $k = 0.2$; 6 – $k = 0.1$ ($d_s = 23.5$ мм, $d_0 = 12$ мм)

С уменьшением диаметра отверстий d_0 от 16 до 4 мм прослеживается тенденция роста эффективности в области первого пика. При $d_0 = 16$ мм эффективность в пике составляет около 62%, при $d_0 = 4$ мм она увеличивается до 81%. При этом в области плато (при $a > 100$ мкм) различия между кривыми сглаживаются, и эффективность класси-

фикации для всех вариантов d_0 стремится к сходным значениям около 95–97 % (рис. 4).

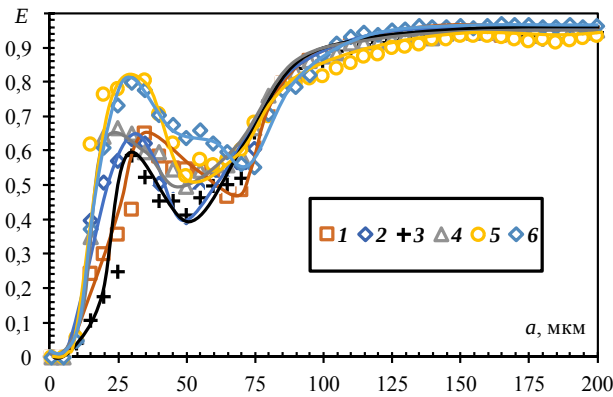


Рис. 4. Фракционная эффективность мультивихревых классификаторов: 1 – $d_0 = 16$ мм; 2 – $d_0 = 14$ мм; 3 – $d_0 = 12$ мм; 4 – $d_0 = 10$ мм; 5 – $d_0 = 8$ мм; 6 – $d_0 = 4$ мм ($d_s = 23.5$ мм; $k = 1$)

В ходе анализа влияния степени раскрытия прямоугольных щелей k на распределение газового потока между прямоугольными щелями и отверстием в нижней части внутренней трубы установлено, что по мере увеличения значения k наблюдается закономерное снижение как скорости газа через щели W_{RS} , так и через нижнее отверстие W_{OIT} . Отношение скоростей W_{RS}/W_{OIT} изменяется от 0.8 до 1.2, что указывает на перераспределение потоков. При малых $k \leq 0.6$ доминирует осевой восходящий поток, при больших значениях $k \geq 0.8$ возрастает вклад потока, проходящего через прямоугольные щели. Это соотношение критически важно, так как определяет не только устойчивость вихрей, но и поведение частиц в зоне классификации. Снижение степени раскрытия щелей k от 1 до 0.1 сопровождается резким увеличением потери давления Δp , что объясняется увеличением локального гидравлического сопротивления, обусловленного уменьшением проходного сечения и усилением турбулентных эффектов в зоне щелей (табл. 1).

При увеличении d_s от 17.5 до 29 мм происходит соответствующее уменьшение диаметра внутренней трубы, что приводит к снижению количества прямоугольных щелей в ней. В результате уменьшается число локальных вихрей, формируемых в кольцевом пространстве, при сохранении

постоянной степени раскрытия $k = 1$. Это изменение геометрии оказывает комплексное влияние на распределение потока. Несмотря на увеличение проходного сечения каждой отдельной щели, суммарная площадь щелевых каналов уменьшается, что приводит к росту скорости газа как через щели W_{RS} , так и через нижнее отверстие W_{OIT} . По мере увеличения d_s от 17.5 до 29 мм наблюдается снижение отношения скоростей W_{RS}/W_{OIT} от 1.3 до 1.1. Это указывает на перераспределение газа в пользу осевого восходящего потока. Важной особенностью является тот факт, что при уменьшении диаметра завихрений d_s центробежные силы в кольцевом пространстве не усиливаются, поскольку фактическая скорость истечения через прямоугольные щели W_{RS} снижается. Это связано с увеличением общего числа щелей при меньшем диаметре внутренней трубы, что приводит к снижению интенсивности крутки вихрей (табл. 1).

Для более детального анализа влияния газодинамических условий на эффективность классификации были построены зависимости характеристических размеров частиц от отношения скоростей газа через щели и нижнее отверстие W_{RS}/W_{OIT} (рис. 5). Для получения необходимого диапазона значений W_{RS}/W_{OIT} варьировалась степень раскрытия прямоугольных щелей k от 0 до 1 при фиксированном диаметре отверстий $d_0 = 12$ мм. Видно, что при $W_{RS}/W_{OIT} > 1$ усиливается влияние щелевого потока на формирование мультивихревой структуры, что приводит к возрастанию центробежных воздействий и, как следствие, к более эффективному отделению частиц. Также при увеличении диаметра вихрей d_s наблюдается закономерное смещение всех характеристических размеров в область меньших значений.

На рис. 5а показано изменение критического размера частиц a_1 , при котором эффективность классификации составляет менее 5%. Наблюдается разрозненное распределение значений, без явно выраженной тенденции, что может быть связано с высокой чувствительностью начального участка кривой к турбулентным возмущениям и неустойчивости начального завихрения. При этом наибольшие значения a_1 фиксируются при $d_s = 23.5$ мм, наименьшее – при $d_s = 29$ мм.

Таблица 1

Анализ скоростей газа через прямоугольные щели и нижнее отверстие во внутренней трубе

$d_s = 23.5$ мм; $d_0 = 12$ мм					$k = 1$; $d_0 = 12$ мм				
k	W_{RS} , м/с	W_{OIT} , м/с	W_{RS}/W_{OIT}	Δp , Па	d_s , мм	W_{RS} , м/с	W_{OIT} , м/с	W_{RS}/W_{OIT}	Δp , Па
0.1	40.4	48.1	0.8	2448.3	17.5	8.8	6.9	1.3	612.1
0.2	29.3	34.4	0.9	1472.3	21	9.1	7.3	1.2	774.8
0.4	15.6	18.1	0.9	966.0	23.5	9.2	7.8	1.2	776.2
0.6	12.0	13.2	0.9	852.0	27.5	9.2	8.6	1.1	660.3
0.8	10.4	9.8	1.1	804.3	29	9.3	8.8	1.1	500.1
1	9.2	7.8	1.2	776.1					

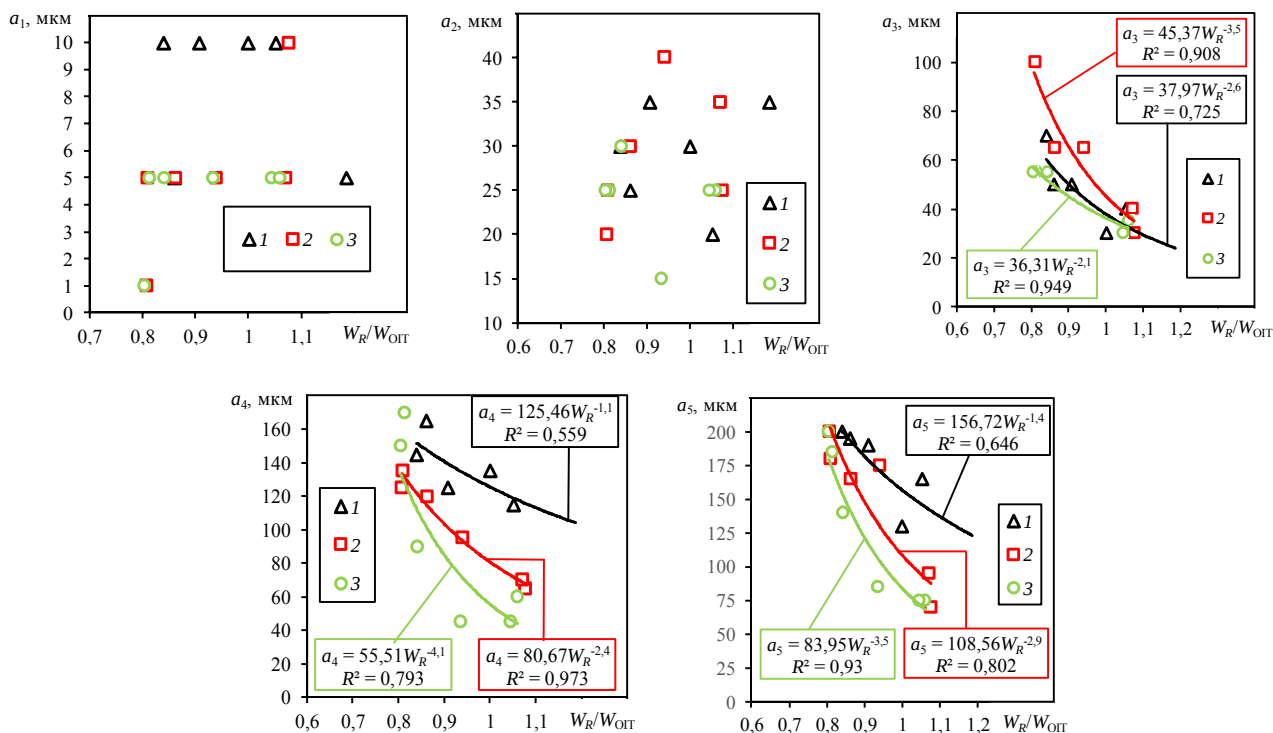


Рис. 5. Зависимость характеристических размеров частиц от W_R/W_{OIT} : а – критический размер фракционирования a_1 , соответствующий эффективности $E < 5\%$; б – размер частиц a_2 , при котором достигается максимальная эффективность первого пика; в – размер частиц a_3 , соответствующий минимуму второго пика; г – размер частиц a_4 , при котором эффективность выходит на плато; д – пороговый размер a_5 , при котором достигается эффективность $E \geq 95\%$; кривые характеризуют различный диаметр вихря d_s , мм: 1 – 23.5; 2 – 27.5; 3 – 29 ($d_0 = 12$ мм)

На рис. 5б показано поведение параметра a_2 – размера частиц, соответствующего первому пику фракционной эффективности. При значении $W_R/W_{OIT} \approx 0.9$ значения a_2 достигают максимума, после чего снижаются. Это может свидетельствовать о существовании оптимального режима взаимодействия между потоком и частицами, при котором обеспечивается наиболее эффективная закрутка газа и их инерционное отделение. Тем не менее, аппроксимация зависимости по a_2 не дает устойчивых трендов, поэтому этот параметр рекомендуется рассматривать как вспомогательный.

На рис. 5в представлена закономерность изменения параметра a_3 , соответствующего локальному минимуму фракционной эффективности. В отличие от предыдущих случаев, на графике прослеживается устойчивая степенная зависимость a_3 от W_R/W_{OIT} , которая подтверждается высокими коэффициентами детерминации R^2 . Во всех трех вариантах геометрии установлено, что увеличение отношения скоростей приводит к смещению локального минимума a_3 в область меньших размеров частиц. Это связано с усилением центробежных воздействий при доминировании потока газа, проходящего через щели, над восходящим потоком из нижнего отверстия. При изменении W_R/W_{OIT} от 0.84 до 1.05 характеристический размер частиц a_3 уменьшается от 70 до 30 мкм ($d_s =$

23.5 мм), от 100 до 30 мкм ($d_s = 27.5$ мм) и от 55 до 30 мкм ($d_s = 29$ мм).

Рис. 5г отражает изменение параметра a_4 , характеризующего начало плато на кривой фракционной эффективности. Снижение значения a_4 при росте W_R/W_{OIT} указывает на ускоренное осаждение частиц в диапазоне средних и крупных размеров. При увеличении W_R/W_{OIT} от 0.81 до 1.18 характеристический размер частиц a_4 уменьшается от 165 до 115 мкм ($d_s = 23.5$ мм), от 135 до 65 мкм ($d_s = 27.5$ мм) и от 170 до 45 мкм ($d_s = 29$ мм).

На рис. 5д, как и в случае с a_3 и a_4 , зависимость описывается степенными уравнениями с высокими значениями R^2 . Установлено, что при увеличении доли потока, проходящего через щели, пороговый размер уменьшается, что свидетельствует о способности аппарата эффективно отделять более мелкие фракции.

Таким образом, форма кривой фракционной эффективности в мультивихревом классификаторе определяется характером газодинамических потоков в кольцевом пространстве. При диаметре вихря $d_s \geq 23.5$ мм формируется наиболее устойчивая мультивихревая структура, обеспечивающая характерную двойную экстремальную зависимость с отчетливыми максимумами и минимумом, что свидетельствует о высокой степени селективности процесса фракционирования.

При увеличении d_s от 17.5 до 29 мм наблюдается выраженное повышение итоговой эффективности (с 84.5 до 99.6 %) и ускорение выхода на плато. При этом происходит смещение всех характеристических размеров частиц a_1 – a_5 в область меньших значений.

Степень раскрытия прямоугольных щелей k оказывает существенное влияние на распределение потоков и, как следствие, на эффективность классификации. Оптимальные характеристики фракционирования наблюдаются при $k = 0.4$ – 0.6 .

Уменьшение d_0 от 16 до 4 мм приводит к увеличению фракционной эффективности первого пика, однако не оказывает значительного влияния на плато, что позволяет гибко настраивать аппарат под требуемую степень очистки.

Отношение W_{RS}/W_{OIT} является универсальным параметром, характеризующим распределение потока между щелями и нижним отверстием. При $W_{RS}/W_{OIT} > 1$ усиливается центробежное воздействие и ускоряется процесс осаждения частиц, что подтверждается снижением характеристических размеров a_3 – a_5 .

Степенные зависимости характеристических размеров частиц a_3 – a_5 от W_{RS}/W_{OIT} при различных значениях d_s рекомендуется использовать для прогнозирования эффективности аппарата и определения граничных размеров отделяемых фракций.

В целом можно отметить, что граничный размер разделяемых частиц и результирующая фракционная эффективность классификатора формируются как результат сложного взаимодействия центробежных и гравитационных сил и влияния восходящего потока на устойчивость мультивихревых структур. Это подчеркивает необходимость комплексного моделирования и дальнейшего уточнения конструктивных параметров аппарата с целью повышения его эффективности в заданных условиях эксплуатации. В перспективе планируется провести дополнительное численное исследование при более широком спектре скоростей газа и нагрузок по твердой фазе, что позволит уточнить рабочие режимы классификатора под разные типы дисперсных материалов.

Литература

1. Евсеев Н. С., Жуков И. А., Бельчиков И. А. Исследование аэродинамики и процесса фракционного разделения мелкодисперсных частиц в сепарационной камере // Вестн. Том. гос. ун-та. Математика и механика. – 2023. – №83. – С.74-85.
2. Зинуров В. Э., Дмитриев А. В., Дмитриева О. С., Мугинов А. М. Влияние конструктивного оформления статического мультивихревого классификатора на эффективность фракционирования частиц силикагеля // Баш. хим. ж. – 2023. – Т.30, №4. – С.99-106.
3. Kasina M., Telk A., Wendorff-Belon M. Comprehensive characterization and environmental implications of industrial and hazardous incineration ashes: insights into chemistry, mineralogy, elements' fractionation and leaching potential // Sci Rep. – 2024. – V.14. – P.29010.
4. Xu Q., Hu W., Zhang M. High-turbulence fine particle flotation cell optimization and verification // Sci Rep. – 2024. – V.14. – P.23124.
5. Gundupalli S. P., Hait S., Thakur A. A review on automated sorting of source-separated municipal solid waste for recycling // Waste Management. – 2017. – V.60. – Pp.56-74.
6. Ермолаева В. А., Рулькова К. С. Обеспечение экологической безопасности при производстве ацетилена // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2021. – №12-3. – С.122-126.
7. Ахматиев Ф. Г., Гиззятов Р. Ф. Стохастическое моделирование процесса разделения зернистых материалов по крупности на ситовых классификаторах // Теоретические основы химической технологии. – 2020. – Т.54, №5. – С.554-564.
8. Францкевич В. С., Волк А. М. Определение граничного размера разделения в воздушных динамических классификаторах // Труды БГТУ. Серия 2: Хи-

References

1. Evseev N.S., Zhukov I.A., Belchikov I.A. *Issledovanie aerodinamiki i protsessa fraktsionnogo razdeleniya melkodispersnykh chastits v separatsionnoy kamere* [Investigation of aerodynamics and fractional separation process of fine particles in a separation chamber]. *Vestn. Tom. gos. un-ta. Matematika i mekhanika* [Bulletin of Tomsk State University. Mathematics and Mechanics], 2023, no.83, pp.74-85.
2. Zinurov V.E., Dmitriev A.V., Dmitrieva O.S., Muginov A.M. *Vliyanie konstruktivnogo oformleniya staticheskogo multivikhrevogo klassifikatora na effektivnost fraktsionirovaniya chastits silikagelya* [Influence of structural design of a static multivortex classifier on the efficiency of silica gel particle fractionation]. *Bashkirskii khimicheskii zhurnal* [Bashkir Chemical Journal], 2023, vol.30, no.4, pp.99-106.
3. Kasina M., Telk A., Wendorff-Belon M. [Comprehensive characterization and environmental implications of industrial and hazardous incineration ashes: insights into chemistry, mineralogy, elements' fractionation and leaching potential]. *Sci Rep*, 2024, vol.14, p.29010.
4. Xu Q., Hu W., Zhang M. [High-turbulence fine particle flotation cell optimization and verification]. *Sci Rep*, 2024, vol.14, p.23124.
5. Gundupalli S.P., Hait S., Thakur A. [A review on automated sorting of source-separated municipal solid waste for recycling]. *Waste Management*, 2017, vol.60, pp.56-74.
6. Ermolaeva V.A., Rulkova K.S. *Obespechenie ekologicheskoy bezopasnosti pri proizvodstve atsetilena* [Ensuring environmental safety in acetylene production]. *Mezhdunarodnyy zhurnal gumanitarnykh i estestvennykh nauk* [International Journal of Humanities and Natural Sciences], 2021, no.12-3, pp.122-126.
7. Akhmadiev F.G., Gizzyatov R.F. [Stochastic simulation of the process of size separation of granular materials on sieve classifiers]. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2020, vol.54, no.5, pp.828-837.

- мические технологии, биотехнология, геоэкология. – 2019. – №1 (217). – С.62-66.
9. Свердлик Г. И., Атаева А. Ю., Атаев А. Р., Хадзарогова Е. А., Вазиева Л. Т. Анализ методов исследования размеров наночастиц // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2021. – Вып.13. – С.358-367.
10. Moraes M. N., Galery R., Mazzinghy D. B. A review of process models for wet fine classification with high frequency screens // Powder Technology. – 2021. – V.394. – Pp.525-532.
11. Ni L. et al. Optimizing geometric parameters in hydrocyclones for enhanced separations: a review and perspective // Separation & Purification Reviews. – 2019. – V.48, №1. – Pp.30-51.
12. Старостин А. Г., Федотова О. А., Кобелева А. Р. Очистка сточных вод от мелкодисперсных частиц на гидроциклоне // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. – 2020. – №1. – С.99-112.
13. Galvin K. P., Iveson S. M. New challenges for gravity concentration and classification of fine particles // Minerals Engineering. – 2022. – V.190. – P.107888.
14. Sun Z. et al. CFD simulation and performance optimization of a new horizontal turbo air classifier // Advanced Powder Technology. – 2021. – V.32, №4. – Pp.977-986.
15. Сысоев И. А., Кондратьев В. В., Ржечицкий А. Э. Исследование применения эффекта Коанды для сепарации целевой фракции микрочастиц кварца // iPolytech Journal. – 2011. – №11 (58). – С.174-178.
16. Зинуров В. Э., Дмитриев А. В., Насырова И. И., Дмитриева О. С. Газодинамика проточной части классификатора с соосно расположенными трубами // Вестник Технологического университета. – 2022. – Т.25, №4. – С.71-76.
17. Зинуров В. Э., Дмитриев А. В., Дмитриева О. С., Моисеева К. С. Промышленные испытания фракционирования сыпучего материала в мультивихревом классификаторе-сепараторе // Вестник Технологического университета. – 2022. – Т.25, №4. – С.58-63.
18. Зинуров В. Э., Галимова А. Р., Ахметова И. Г., Мадышев И. Н. Технико-экономическое обоснование применения мультивихревого классификатора-сепаратора // Вестник Самарского государственного экономического университета. – 2022. – №7. – С. 33-44.
19. Зинуров В. Э., Дмитриев А. В., Сахибгареев Н. Ф., Латыпов Д. Н., Гарипов М. Г. Численное моделирование газодинамики в центробежном классификаторе // Вестник технологического университета. – 2021. – Т.24, №12. – С.128-132.
8. Frantskevich V.S., Volk A.M. *Opređenje granichnogo razmera razdeleniya v vozdushnykh dinamicheskikh klassifikatorakh* [Determination of the boundary separation size in air dynamic classifiers]. *Trudy BGTU. Seriya 2: Khimicheskie tekhnologii, biotekhnologiya, geokologiya* [Proceedings of BSTU. Series 2: Chemical Technologies, Biotechnology, Geoecology], 2019, no.1(217), pp.62-66.
9. Sverdlik G.I., Ataeva A.Yu., Ataev A.R., Khadzaragova E.A., Vazieva L.T. *Analiz metodov issledovaniya razmerov nanochastits* [Analysis of methods for studying nanoparticle sizes]. *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov* [Physicochemical Aspects of Studying Clusters, Nanostructures, and Nanomaterials], 2021, is.13, pp.358-367.
10. Moraes M.N., Galery R., Mazzinghy D.B. [A review of process models for wet fine classification with high frequency screens]. *Powder Technology*, 2021, vol.394, pp.525-532.
11. Ni L. et al. [Optimizing geometric parameters in hydrocyclones for enhanced separations: a review and perspective]. *Separation & Purification Reviews*, 2019, vol.48, no.1, pp.30-51.
12. Starostin A.G., Fedotova O.A., Kobelyeva A.R. *Ochistka stochnykh vod ot melkodispersnykh chastits na gidrotsiklone* [Treatment of wastewater from fine particles in a hydrocyclone]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Khimicheskaya tekhnologiya i biotekhnologiya* [Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Chemical Technology and Biotechnology], 2020, no.1, pp.99-112.
13. Galvin K.P., Iveson S.M. [New challenges for gravity concentration and classification of fine particles]. *Minerals Engineering*, 2022, vol.190, p. 107888.
14. Sun Z. et al. [CFD simulation and performance optimization of a new horizontal turbo air classifier]. *Advanced Powder Technology*, 2021, vol.32, no.4, pp.977-986.
15. Sysoev I.A., Kondratyev V.V., Rzhchitskiy A.E. *Issledovanie primeneniya effekta Koandy dlya separatsii tselevoy fraktsii mikrochastits kvartsa* [Study of the Coanda effect application for target fraction separation of quartz microparticles]. *iPolytech Journal*, 2011, no.11 (58), pp.174-178.
16. Zinurov V.E., Dmitriev A.V., Nasyrova I.I., Dmitrieva O.S. *Gazodinamika protochnoy chasti klassifikatora s soosno raspolzozhennymi trubami* [Gas dynamics of the flow part of a classifier with coaxially arranged pipes]. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Technological University], 2022, vol.25, no.4, pp.71-76.
17. Zinurov V.E., Dmitriev A.V., Dmitrieva O.S., Moiseeva K.S. *Proyshlennyye ispytaniya fraktsionirovaniya syuchego materiala v multivikhrevom klassifikatore-separatore* [Industrial tests of bulk material fractionation in a multivortex classifier-separator]. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Technological University], 2022, vol.25, no.4, pp.58-63.
18. Zinurov V.E., Galimova A.R., Akhmetova I.G., Madyshev I.N. *Tekhniko-ekonomicheskoe obosnovanie primeneniya multivikhrevogo klassifikatora-separatora* [Technical and economic justification for the use of a multivortex classifier-separator]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta* [Bulletin of Samara State Economic University], 2022, no.7, pp.33-44.
19. Zinurov V.E., Dmitriev A.V., Sakhibgarayev N.F., Latypov D.N., Garipov M.G. *Chislennoe modelirovaniye gazodinamiki v tsentrifugalnom klassifikatore* [Numerical simulation of gas dynamics in a centrifugal classifier]. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Technological University], 2021, vol.24, no.12, pp.128-132.