

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

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МУЛЬТИВИХРЕВОГО КЛАССИФИКАТОРА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФРАКЦИОНИРОВАНИЯ ЧАСТИЦ

*Ключевые слова:* фракционирование частиц, мультिवихревой классификатор, классификация частиц, вихревая структура, сепарация мелкодисперсных частиц, центробежный классификатор.

Современные задачи химической технологии требуют эффективных решений для разделения сыпучих материалов на фракции с заданными гранулометрическими характеристиками. Это особенно важно для процессов, связанных с обработкой мелкодисперсных материалов, где разделение частиц играет ключевую роль в повышении качества конечного продукта и снижении затрат. В статье представлен мультिवихревой классификатор для фракционирования частиц по размерам. Целью работы является численное исследование влияния геометрических параметров аппарата на эффективность его работы. Численное моделирование было выполнено в программной среде Ansys Fluent с использованием модели турбулентности  $k-\omega$  SST и модели дискретной фазы DPM для отслеживания движения частиц в потоке газа. В ходе расчетов изменялись диаметр внутренней трубы  $d$  и степень раскрытия прямоугольных щелей  $k$ . Установлено, что эффективность разделения сыпучего материала в мультिवихревом классификаторе определяется взаимодействием потоков воздуха через нижнее отверстие внутренней трубы и прямоугольные щели. Поток через нижнее отверстие формирует восходящее течение, которое дестабилизирует вихревую структуру, а поток через прямоугольные щели отвечает за стабильность завихрений в кольцевом пространстве. Увеличение диаметра внутренней трубы  $d$  приводит к снижению эффективности улавливания частиц. Так, при увеличении  $d$  с 43 до 66 мм средняя эффективность  $E$  снижается с 79,7 % до 32,1 %, что связано с усилением дестабилизирующего восходящего потока, т. к. количество прямоугольных щелей увеличивается от 4 до 8 шт. (суммарная площадь сечений прямоугольных щелей возрастает), что снижает действие центробежных сил. Уменьшение диаметра  $d$  способствовало стабилизации завихрений, в результате чего появились дополнительные выраженные пики роста эффективности в мелкодисперсных диапазонах частиц до 40 мкм. Уменьшение степени раскрытия щелей  $k$  до значений  $k \leq 20$  % обеспечивало резкий рост эффективности фракционирования частиц, достигая более 95 % для частиц размером  $a > 55$  мкм. При значениях  $k \geq 40$  % наблюдалось значительное снижение эффективности аппарата.

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

## NUMERICAL STUDY OF THE INFLUENCE OF GEOMETRIC PARAMETERS OF A MULTIVORTEX CLASSIFIER ON PARTICLE FRACTIONATION EFFICIENCY

*Keywords:* particle fractionation, multivortex classifier, particle classification, vortex structure, fine particle separation, centrifugal classifier.

Modern challenges in chemical technology require effective solutions for separating bulk materials into fractions with specified granulometric characteristics. This is especially important for processes involving the handling of fine-dispersed materials, where particle separation plays a key role in improving the quality of the final product and reducing costs. The article presents a multivortex classifier designed for particle size fractionation. The aim of the study is to numerically investigate the influence of the geometric parameters of the classifier on its efficiency. Numerical modeling was performed in the Ansys Fluent software environment using the  $k-\omega$  SST turbulence model and the Discrete Phase Model (DPM) to track particle motion in the gas flow. During the calculations, the inner pipe diameter  $d$  and the degree of rectangular slot opening  $k$  were varied. It was found that the efficiency of bulk material separation in the multivortex classifier is determined by the interaction of airflows through the lower opening of the inner pipe and the rectangular slots. The flow through the lower opening forms an upward current that destabilizes the vortex structure, while the flow through the rectangular slots ensures the stability of vortices in the annular space. An increase in the inner pipe diameter  $d$  leads to a decrease in particle capture efficiency. For example, as  $d$  increases from 43 to 66 mm, the average efficiency  $E$  decreases from 79.7% to 32.1%, which is associated with the intensification of the destabilizing upward flow. This occurs because the number of rectangular slots increases from 4 to 8 (resulting in a larger total cross-sectional area of the slots), which reduces the effect of centrifugal forces. A decrease in  $d$  contributes to the stabilization of vortices, resulting in additional pronounced efficiency peaks in the fine particle range up to 40  $\mu\text{m}$ . Reducing the degree of rectangular slot opening  $k$  to values of  $k \leq 20$  % ensures a sharp increase in particle fractionation efficiency, achieving values greater than 95 % for particles with sizes  $a > 55$   $\mu\text{m}$ . At  $k \geq 40$  %, a significant decrease in the classifier's efficiency was observed.

### Введение

В химической промышленности сыпучие материалы с различной дисперсностью играют важную роль в процессах производства и переработки химических веществ. Эти материалы находят применение в таких

областях, как каталитические процессы, адсорбция, а также используются в качестве наполнителей и стабилизаторов [1-3]. В зависимости от области применения требования к гранулометрическим характеристикам частиц могут варьироваться [4,5]. Однако для

обеспечения стабильных характеристик процесса необходима однородность гранулометрического состава сухого сыпучего материала [6].

Процессы подготовки и измельчения материала не всегда позволяют получить частицы с заданными параметрами гранулометрического состава [7]. В связи с этим актуальной задачей является применение классификаторов, которые способны эффективно разделять сыпучие материалы на фракции с требуемыми характеристиками [8,9]. Среди множества технологий воздушные классификаторы занимают ведущие позиции благодаря своей простоте и универсальности.

На сегодняшний день разработано множество конструкций воздушных классификаторов, предназначенных для достижения определенной степени эффективности разделения [10-12]. Однако высокие показатели эффективности требуют либо усложнения конструкции, либо применения многоступенчатых систем, что значительно увеличивает затраты на производство [13, 14]. Это обуславливает необходимость поиска новых подходов и оптимизации параметров существующих устройств, направленных на повышение их эффективности при минимизации затрат.

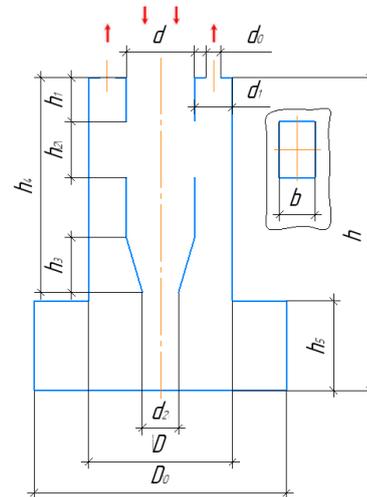
В работах [15-17] была представлена конструкция мультивихревого классификатора, предназначенного для фракционирования частиц силикагеля с граничным размером зерна 40 мкм. Процесс сепарации частиц от газа происходит под действием инерционных сил (при резком изменении направления газового потока в прямоугольные щели) и центробежных сил (в результате закрутки завихрений в кольцевом пространстве). Крупная фракция ссыпается в бункер аппарата. Мелкая фракция удаляется из него совместно с газовым потоком.

Одной из актуальных задач для возможности применения классификатора на различных предприятиях является разработка инженерной методики, позволяющей оптимизировать геометрические параметры конструктивных элементов классификатора для эффективного разделения сыпучих материалов с различной заданной крупностью граничного зерна. Создание такой методики требует проведения исследований, направленных на качественную и количественную оценку их влияния на эффективность работы классификатора. Целью данной работы является численное моделирование процесса разделения частиц по размерам в мультивихревом классификаторе при изменении его геометрических параметров.

### Объекты и методы исследования

Исследование проводилось в программной среде Ansys Fluent, позволяющей моделировать газодинамические процессы и траектории движения частиц. В ходе работы осуществлялось трехмерное численное моделирование. 3D CAD-модели классификатора были выполнены в программе КОМПАС-3D. Базовые геометрические параметры CAD-модели классификатора (рис. 1):  $d = 54$  мм,  $d_0 = 12$  мм,  $d_1 = 17,15$  мм;  $h_1 = 0$  мм,  $h_2 = 60$  мм,  $h_3 = 22$  мм,  $h_4 = 100$  мм,  $d_2 = 16$  мм,  $D = 101$  мм. Следует отметить, что в отличие от предыдущих исследований [18], геометрия 3D-модели классификатора была упрощена путем удаления в верхней части выходного патрубка. Это упрощение

позволило разделить геометрию 3D-модели классификатора по окружности на несколько одинаковых секторов. С точки зрения численного моделирования такой подход позволяет рассчитывать только один сектор (рис. 2, а). На боковых стенках, ограничивающих его по окружности, задавалось условие симметрии. Для получения качественных и количественных результатов некоторые геометрические параметры изменялись в следующих диапазонах:  $d$  от 43 до 66 мм и  $k$  от 10 до 80 %.



**Рис. 1 – Мультивихревой классификатор:**  $d$  – диаметр трубы для подачи газового потока с частицами в аппарат;  $D$  – диаметр цилиндрического корпуса;  $d_2$  – диаметр отверстия внутренней трубы для ссыпания частиц в бункер;  $D_0$  – диаметр бункера;  $h$  – высота аппарата;  $b$  – ширина щелей прямоугольного сечения, проделанных во внутренней трубе;  $d_1$  – диаметр завихрений в кольцевом пространстве;  $d_0$  – диаметр отверстий проделанных в пластине, предназначенных для выхода газового потока из аппарата;  $h_1$  – расстояние от верхней пластины до прямоугольных щелей;  $h_2$  – высота прямоугольных щелей;  $h_3$  – длина конического патрубка;  $h_4$  – высота внутренней трубы

**Fig. 1 – Multivortex Classifier:**  $d$  – diameter of the pipe for supplying the gas flow with particles into the apparatus;  $D$  – diameter of the cylindrical housing;  $d_2$  – diameter of the opening in the inner tube for discharging particles into the hopper;  $D_0$  – diameter of the hopper;  $h$  – height of the apparatus;  $b$  – width of the rectangular slots made in the inner tube;  $d_1$  – diameter of the vortices in the annular space;  $d_0$  – diameter of the openings in the plate intended for the gas flow to exit the apparatus;  $h_1$  – distance from the top plate to the rectangular slots;  $h_2$  – height of the rectangular slots;  $h_3$  – length of the conical nozzle;  $h_4$  – height of the inner tube

Варьирование диаметра трубы для подачи газового потока с частицами в аппарат  $d$  влияет на размеры кольцевого пространства, соответственно, и на диаметр завихрений в нем. Степень раскрытия прямоугольной щели  $k$  влияет на формирование и устойчивость завихрений в кольцевом пространстве (рис. 2, б). Ширина прямоугольной щели, соответствующая ее

полному раскрытию, можно рассчитать по выражению (1):

$$b = \frac{\pi Da}{360^\circ}, \quad (1)$$

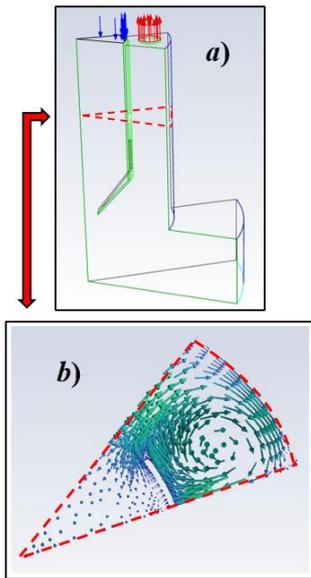
где  $\alpha$  – центральный угол, задающий угловой сектор щели в кольцевом пространстве мультивихревого классификатора.

Для расчета степени раскрытия прямоугольной щели  $k$  применялось выражение (2):

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

где  $b_k$  – ширина щели при полном раскрытии, мм.

Для описания турбулентных процессов применялась модель  $k$ - $\omega$  SST (Shear Stress Transport), обеспечивающая высокую точность расчетов в областях с сильными градиентами скорости, характерными для завихрений в кольцевом пространстве классификатора. Для учета движения частиц использовалась модель дискретной фазы DPM, позволяющая отслеживать траектории отдельных частиц в газовом потоке. В рамках данной модели учитывались основные силы, действующие на частицы, такие как аэродинамическое сопротивление, гравитационные и инерционные силы. Предполагалось, что взаимодействие между частицами отсутствует, поскольку их концентрация в потоке была достаточно низкой (менее 10 %).



**Рис. 2 – Секторная модель мультивихревого классификатора (а) и формирование завихрения в его кольцевом пространстве (b)**

**Fig. 2 – Sector model of the multivortex classifier (a) and vortex formation in its annular space (b)**

В качестве текучей среды (газа) использовался воздух при температуре 25 °С. При численном моделировании задавалась скорость газового потока  $W$  в аппарате, равная 12 м/с. На входе в аппарат в поток воздуха вводились сферические частицы плотностью  $\rho$  1075 кг/м<sup>3</sup>, диаметром  $a$  от 10 до 140 мкм и начальной скоростью  $W_a$  0 м/с. На выходе из аппарата задавалось давление, равное атмосферному. На стенках аппарата

задавалось условие отражения, что позволяло учитывать их вторичное движение в завихрениях кольцевого пространства. На стенках бункера задавалось условие прилипания частиц, что позволило учитывать осаждение крупной фракции в процессе численного моделирования. Таким образом, эффективность разделения сыпучего материала, вводимого в аппарат совместно с воздухом, оценивалась на основе эффективности улавливания частиц мультивихревым классификатором, которая рассчитывалась по выражению (3):

$$E = \frac{m_y}{m_{вв}}, \quad (3)$$

где  $m_y$  – масса частиц, осевших на стенках бункера, кг,  $m_{вв}$  – масса частиц, введенных в аппарат, кг.

## Результаты и их обсуждение

Для численного моделирования проводилось исследование на сеточную независимость с целью определения влияния размера расчетной сетки на точность расчетов и стабильность результатов. На основе базовой модели было создано восемь различных мозаичных полиэдрических сеточных моделей. Общее количество ячеек в сеточной модели варьировалось от 141 366 до 1 973 411 шт. При увеличении количества ячеек уменьшался их максимальный размер от 3,65 до 0,43 мм.

Основным критерием оценки являлась зависимость потери давления  $\Delta p$  от размеров сетки. Из таблицы 1 видно, что оцениваемый параметр  $\Delta p$  стабилизировался начиная с сетки, содержащей около 437 480 ячеек, при этом максимальный размер ячейки (Max size) составлял 0,86 мм. Расхождение между соседними результатами в данном случае составило не более 1,02 %, что свидетельствует о достижении сеточной независимости.

Для расчета неопределенности  $\gamma$  использовалось выражение (4):

$$\Delta p = \frac{|\Delta p_k - \Delta p_{k-1}|}{\Delta p_k} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где  $\Delta p_k$  – значение потери давления для текущей сетки, Па,  $\Delta p_{k-1}$  – значение потери давления для предыдущей сетки, Па.

Таким образом, последующие расчеты осуществлялись на сеточных моделях с максимальным размером ячейки, равным 0,86 мм, обеспечивающим баланс между точностью и вычислительными затратами.

Результаты численного моделирования показали, что изменение двух исследуемых параметров (диаметра внутренней трубы  $d$  и степени раскрытия прямоугольной щели  $k$ ) оказывает значительное влияние на эффективность разделения сыпучего материала вводимого в мультивихревой классификатор (рис. 3 и рис. 4).

Увеличение диаметра внутренней трубы  $d$  от 43 до 66 мм приводило к снижению эффективности улавливания частиц  $E$ , что является неочевидным следствием (рис. 3). С одной стороны, уменьшение расстояния в кольцевом пространстве между внутренней и наружной трубами должно было способствовать ро-

сту центробежных сил, т. к. радиус каждого завихрения уменьшался. Поэтому логично предположить, что увеличение центробежных сил должно было привести к росту эффективности  $E$ . С другой стороны, увеличение диаметра трубы  $d$  от 43 до 66 мм сопровождалось ростом количества щелей прямоугольного сечения от 4 до 8 шт. (суммарная площадь сечений прямоугольных щелей возрастает). Учитывая, что скорость на входе в аппарат была постоянной, результирующем эффектом являлось снижение центробежных сил. При меньших значениях параметра  $d$  (завихрения в кольцевом пространстве наиболее стабильны) наблюдалось несколько пиков (рис. 3), характеризующих резкий рост эффективности  $E$ . Первые из них проявлялись при размере частиц  $a \geq 10$  мкм. Также отмечалось смещение первого пика в зависимости от значения параметра  $d$ . При его уменьшении пик смещался в область меньших размеров частиц.

**Таблица 1 – Результаты исследования сеточной независимости**

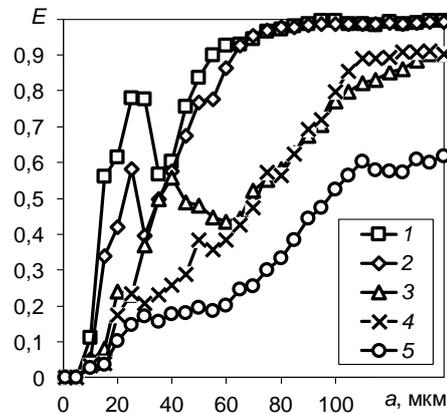
**Table 1 – Results of the grid independence study**

| № | $n$ , шт. | Max size, мм | $\Delta p$ , Па | $\gamma$ , % |
|---|-----------|--------------|-----------------|--------------|
| 1 | 141 366   | 3,65         | 716,8           | 1,28         |
| 2 | 176 167   | 2,73         | 726,1           |              |
| 3 | 190 512   | 2,05         | 741,1           | 2,01         |
| 4 | 222 274   | 1,53         | 742,5           | 0,19         |
| 5 | 287 329   | 1,15         | 738,5           | 0,54         |
| 6 | 437 480   | 0,86         | 738,1           | 0,04         |
| 7 | 984 019   | 0,6          | 745,7           | 1,02         |
| 8 | 1 973 411 | 0,43         | 754,6           | 2,18         |

Наиболее значительное влияние на работу мультивихревого классификатора оказывала степень раскрытия прямоугольной щели  $k$  (рис. 4). При уменьшении данного параметра эффективность  $E$  возрастала наиболее резко, что позволяло более точно отделять фракции частиц заданного размера, минимизируя захват частиц других фракций. Такой эффект обусловлен усилением стабильности вихревых структур в кольцевом пространстве при меньших значениях параметра  $k$ . Следует отметить, что для данного случая диаметр нижнего отверстия внутренней трубы оставался постоянным ( $d = 54$  мм). Таким образом, уменьшение параметра  $k$  приводило к снижению суммарной площади прямоугольных щелей относительно площади отверстия в нижней части внутренней трубы. Однако сужение прямоугольных щелей сопровождалось увеличением скорости воздушного потока, проходящего через них, что, в свою очередь, способствовало формированию более стабильной вихревой структуры. В результате негативное влияние восходящего потока выражалось в меньшей степени, что приводило к значительному повышению эффективности  $E$ . Видно, что при  $k \leq 20$  % достигается наилучший результат с точки зрения фракционирования сыпучего материала на заданные фракции.

Анализ рисунка 3 показывает, что максимальные значения первых пиков достигаются при размере частиц  $a = 30$  мкм ( $E = 78,1$  %,  $d = 43$  мм),  $a = 25$  мкм ( $E = 58,1$  %,  $d = 46$  мм) и  $a = 40$  мкм ( $E = 55,9$  %,  $d = 54$

мм). При значениях параметра  $d > 54$  мм рост эффективности происходил более плавно, без явно выраженных пиков. С уменьшением диаметра внутренней трубы  $d$  скорость повышения эффективности  $E$  снижалась. В среднем для диапазона частиц  $a$  от 5 до 140 мкм эффективность аппарата  $E$  составила 79,7 %, 74,6 %, 53,9 %, 50,5 % и 32,1 % при диаметре трубы  $d$  равным 43, 46, 54, 59 и 66 мм соответственно.



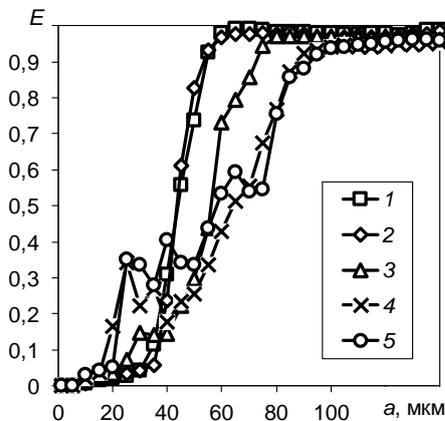
**Рис. 3 – Эффективность улавливания частиц мультивихревым классификатором от их размера при различном значении диаметра внутренней трубы  $d$ , мм: 1 – 43, 2 – 46; 3 – 54; 4 – 59; 5 – 66**

**Fig. 3 – Particle capture efficiency of the multivortex classifier as a function of particle size at different inner pipe diameters  $d$ , mm: 1 – 43; 2 – 46; 3 – 54; 4 – 59; 5 – 66**

Анализ рисунка 4 показывает, что резкий рост эффективности  $E$  наблюдается при диаметре частиц  $a = 35$  мкм для конструкций мультивихревого классификатора с заданной степенью раскрытия прямоугольной щели  $k$ , равной 10 и 20 %. Для данных значений  $k$  эффективность аппарата  $E$  составляет менее 5 % при  $a < 35$  мкм и более 95 % при  $a > 55$  мкм. При значении  $k$  равным 40 % увеличение эффективности аппарата от  $E < 5$  % до  $E > 95$  % происходит при изменении размера частиц  $a$  от 25 до 75 мкм. Это свидетельствует о снижении скорости роста эффективности в 2,5 раза, по сравнению со случаями при  $k \leq 20$  %. При значении  $k$  равным 60 % и 80 % резкого роста эффективности не наблюдается, что указывает на нецелесообразность применения данных значений при проектировании классификатора. Следует отметить, что при изменении  $k$  от 10 до 80 % пиков, аналогичных тем, которые были получены на рисунке 3, не обнаружено. В среднем для диапазона частиц  $a$  от 5 до 140 мкм эффективность аппарата  $E$  составила 67,1 %, 66,7 %, 60,1 %, 55,9 % и 57,9 % при степени раскрытия прямоугольной щели  $k$  равной 10 %, 20 %, 40 %, 60 % и 80 % соответственно.

Таким образом, эффективность разделения сыпучего материала в мультивихревом классификаторе определяется взаимодействием потоков воздуха через нижнее отверстие внутренней трубы и прямоугольные щели. Поток через нижнее отверстие формирует восходящее течение, которое дестабилизирует вихревую структуру, а поток через прямоугольные щели от-

вечает за стабильность завихрений в кольцевом пространстве. Полученные данные могут быть использованы для оптимизации геометрических параметров классификатора в зависимости от задач фракционирования. Потери давления в аппарате составляют около 738 Па при скорости на входе в него 12 м/с (табл. 1).



**Рис. 4 – Эффективность улавливания частиц мультивихревым классификатором от их размера при различной степени раскрытия прямоугольных щелей  $k$ , %: 1 – 10, 2 – 20; 3 – 40; 4 – 60; 5 – 80**

**Fig. 4 – Particle capture efficiency of the multivortex classifier as a function of particle size at different degrees of rectangular slot opening  $k$ , %: 1 – 10; 2 – 20; 3 – 40; 4 – 60; 5 – 80**

### Выводы

1. Увеличение диаметра внутренней трубы  $d$  приводит к снижению эффективности улавливания частиц. Так, при увеличении  $d$  с 43 до 66 мм средняя эффективность  $E$  снижается с 79,7 % до 32,1 %, что обусловлено усилением дестабилизирующего восходящего потока. Это связано с увеличением количества прямоугольных щелей с 4 до 8 шт. (суммарная площадь сечений прямоугольных щелей возрастает), что снижает действие центробежных сил и ухудшает фракционирование частиц.

2. При уменьшении диаметра внутренней трубы  $d$  появляются дополнительные выраженные пики роста эффективности в мелкодисперсных диапазонах частиц до 40 мкм, что указывает на стабилизацию завихрений. Максимальные значения первых пиков по эффективности  $E$  достигаются при размере частиц  $a = 30$  мкм ( $E = 78,1$  %,  $d = 43$  мм),  $a = 25$  мкм ( $E = 58,1$  %,  $d = 46$  мм) и  $a = 40$  мкм ( $E = 55,9$  %,  $d = 54$  мм).

3. Уменьшение степени раскрытия прямоугольных щелей  $k$  значительно повышает эффективность фракционирования, что выражается в резком увеличении эффективности улавливания частиц  $E > 95$  %.

4. При  $k \leq 20$  % достигается наилучший результат с точки зрения фракционирования сыпучего материала на заданные фракции. Для данных значений  $k$  эффективность аппарата  $E$  составляет менее 5 % при  $a < 35$  мкм и более 95 % при  $a > 55$  мкм.

### Литература

1. М.Д. Мордасов, Д.М. Мордасов, Вестник Башкирского университета, 23, 2, 305-310 (2018).

2. Е.А. Mamchenkov, V.Yu. Prokof'ev, Известия ВУЗов. Химия и химическая технология, 3 (2019).
3. М.А. Ульянова, А.С. Гурова, В.Е. Шредер, Вестник ТГТУ, 1 (2006).
4. С.А. Carrero, R. Schlögl, I.E. Wachs, R. Schomaecker, ACS Catalysis, 4, 3357–3380 (2014).
5. Е.М. Barsky, Refractories and Industrial Ceramics, 61, 134–137 (2020). DOI: 10.1007/s11148-020-00444-w.
6. P. Kube, B. Frank, S. Wrabetz, J. Krčhner, M. Havecker, J. Velasco-Velez, J. Noack, R. Schlögl, A. Trunschke, ChemCatChem, 9, 573–585 (2017).
7. В.А. Бадоев, М.В. Волков, М.Ю. Таршис, А.И. Зайцев, Известия ВУЗов. Химия и химическая технология, 8 (2013).
8. Y.T. Selivanov, Chemical and Petroleum Engineering, 59, 355–362 (2023). DOI: 10.1007/s10556-024-01251-7.
9. W. Xing, Y. Wang, Y. Zhang, Y. Yamane, M. Saga, J. Lu, H. Zhang, Y. Jin, Powder Technology (2015). DOI: 10.1016/j.powtec.2015.06.044.
10. Z. Sun, L. Liang, C. Liu, G. Yang, Chemical Engineering Research and Design, 166, 220-226 (2021). DOI: 10.1016/j.cherd.2020.12.008.
11. Н.А. Марцулевич, О.М. Флисюк, В.П. Мешалкин, А.В. Гарабаджи, Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология, 64, 10, 84-90 (2021). DOI: 10.6060/ivkkt.20216410.6455.
12. В.С. Топталов, Ю.Г. Чесноков, В.П. Мешалкин, В.В. Кулов, О.М. Флисюк, Н.А. Марцулевич, И.Г. Лихачев, Теоретические основы химической технологии, 57, 4, 363-370 (2023). DOI: 10.31857/S0040357123040139.
13. А. Каас, Т. Мütze, U. Peuker, Processes, 10, 764 (2022). DOI: 10.3390/pr10040764.
14. Z. Sun, L. Liang, C. Liu, Y. Zhu, L. Zhang, G. Yang, Advanced Powder Technology (2021). DOI: 10.1016/j.appt.2021.01.041.
15. В.Э. Зинуров, А.В. Дмитриев, О.С. Дмитриева, К.С. Моисеева, Вестник Технологического университета, 25, 4, 58-63 (2022). DOI: 10.55421/1998-7072\_2022\_25\_4\_58.
16. В.Э. Зинуров, А.В. Дмитриев, Н.Ф. Сахибгареев, Д.Н. Латыпов, М.Г. Гарипов, Вестник Технологического университета, 24, 12, 128-132 (2021). EDN: CPGASD.
17. В.Э. Зинуров, А.В. Дмитриев, И.И. Насырова, О.С. Дмитриева, Вестник Технологического университета, 25, 4, 71-76 (2022). DOI: 10.55421/1998-7072\_2022\_25\_4\_71.
18. В.Э. Зинуров, И.Н. Мадышев, А.Р. Ивахненко, И.В. Петрова, Ползуновский вестник, 2, 205-211 (2021). DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.02.029.

### References

1. M.D. Mordasov, D.M. Mordasov, Vestnik Bashkirskogo Universiteta, 23, 2, 305-310 (2018).
2. Е.А. Mamchenkov, V.Yu. Prokof'ev, Izvestiya VUZov. Khimiya i Khimicheskaya Tekhnologiya, 3 (2019).
3. М.А. Ulyanova, A.S. Gurova, V.E. Shreder, Vestnik TG TU, 1 (2006). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vodostoykiesilikageli-i-oblasti-ih-primeneniya> (accessed: 21.01.2025).
4. С.А. Carrero, R. Schlögl, I.E. Wachs, R. Schomaecker, ACS Catalysis, 4, 3357–3380 (2014).
5. Е.М. Barsky, Refractories and Industrial Ceramics, 61, 134–137 (2020). DOI: 10.1007/s11148-020-00444-w.
6. P. Kube, B. Frank, S. Wrabetz, J. Krčhner, M. Havecker, J. Velasco-Velez, J. Noack, R. Schlögl, A. Trunschke, ChemCatChem, 9, 573–585 (2017).
7. В.А. Badoev, M.V. Volkov, M.Yu. Tarshis, A.I. Zaitsev, Izvestiya VUZov. Khimiya i Khimicheskaya Tekhnologiya, 8 (2013).
8. Y.T. Selivanov, Chemical and Petroleum Engineering, 59, 355–362 (2023). DOI: 10.1007/s10556-024-01251-7.
9. W. Xing, Y. Wang, Y. Zhang, Y. Yamane, M. Saga, J. Lu, H. Zhang, Y. Jin, Powder Technology (2015). DOI: 10.1016/j.powtec.2015.06.044.

10. Z. Sun, L. Liang, C. Liu, G. Yang, *Chemical Engineering Research and Design*, 166, 220-226 (2021). DOI: 10.1016/j.cherd.2020.12.008.
11. N.A. Martsulevich, O.M. Flisyuk, V.P. Meshalkin, A.V. Garabadzhiu, *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Seriya: Khimiya i Khimicheskaya Tekhnologiya*, 64, 10, 84-90 (2021). DOI: 10.6060/ivkkt.20216410.6455.
12. V.S. Toptalov, Yu.G. Chesnokov, V.P. Meshalkin, V.V. Kulov, O.M. Flisyuk, N.A. Martsulevich, I.G. Likhachev, *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 57, 4, 363-370 (2023). DOI: 10.31857/S0040357123040139.
13. A. Kaas, T. Mütze, U. Peuker, *Processes*, 10, 764 (2022). DOI: 10.3390/pr10040764.
14. Z. Sun, L. Liang, C. Liu, Y. Zhu, L. Zhang, G. Yang, *Advanced Powder Technology* (2021). DOI: 10.1016/j.apt.2021.01.041.
15. V.E. Zinurov, A.V. Dmitriev, O.S. Dmitrieva, K.S. Moiseeva, *Herald of Technological University*, 25, 4, 58-63 (2022). DOI: 10.55421/1998-7072\_2022\_25\_4\_58.
16. V.E. Zinurov, A.V. Dmitriev, N.F. Sakhibgareev, D.N. Latypov, M.G. Garipov, *Herald of Technological University*, 24, 12, 128-132 (2021). EDN: CPGASD.
17. V.E. Zinurov, A.V. Dmitriev, I.I. Nasyrova, O.S. Dmitrieva, *Herald of Technological University*, 25, 4, 71-76 (2022). DOI: 10.55421/1998-7072\_2022\_25\_4\_71.
18. V.E. Zinurov, I.N. Madyshev, A.R. Ivakhnenko, I.V. Petrova, *Polzunovskii Vestnik*, 2, 205-211 (2021). DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.02.029.

---

© **М. А. Прец** – ст. преп. кафедры Инженерной графики (ИГ), Казанский государственный энергетический университет (КГЭУ), Казань, Россия, [precmari@mail.ru](mailto:precmari@mail.ru); **В. Э. Зинуров** – к.т.н, и.о. зав. кафедрой ИГ, КГЭУ, [vadd\\_93@mail.ru](mailto:vadd_93@mail.ru); **А. В. Дмитриев** – д.т.н., проф., зав. кафедрой Автоматизации технологических процессов и производств, КГЭУ, [ieremiada@gmail.com](mailto:ieremiada@gmail.com); **А. М. Мугинов** – студент КГЭУ, [aqwewerr@gmail.com](mailto:aqwewerr@gmail.com).

© **М.А. Prets** – Senior Lecturer, Department of Engineering Graphics (EG), Kazan State Energy University (KSEU), Kazan, Russia, [precmari@mail.ru](mailto:precmari@mail.ru); **V. E. Zinurov** – PhD (Technical Sci.), Acting Head of the EG department, KSEU, [vadd\\_93@mail.ru](mailto:vadd_93@mail.ru); **A. V. Dmitriev** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Professor, Head of the Department of Automation of Technological Processes and Productions, KSEU, [ieremiada@gmail.com](mailto:ieremiada@gmail.com); **A. M. Muginov** – Student, KSEU, [aqwewerr@gmail.com](mailto:aqwewerr@gmail.com).

Дата поступления рукописи в редакцию – 27.03.25.

Дата принятия рукописи в печать – 02.04.25.