

В. Э. Зинуров (к.т.н., доц.)¹, А. В. Дмитриев (д.т.н., доц., зав. каф.)¹,
О. С. Дмитриева (к.т.н., доц.)², А. М. Мугинов (студ.)¹

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНОГО ОФОРМЛЕНИЯ СТАТИЧЕСКОГО МУЛЬТИВИХРЕВОГО КЛАССИФИКАТОРА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФРАКЦИОНИРОВАНИЯ ЧАСТИЦ СИЛИКАГЕЛЯ

¹ Казанский государственный энергетический университет,
кафедра «Автоматизация технологических процессов и производств»
420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51; e-mail: ieremiada@gmail.com
² Казанский национальный исследовательский технологический университет,
кафедра «Оборудование пищевых производств»
420015, г. Казань, ул. К. Маркса, 68; e-mail: ja_deva@mail.ru

V. E. Zinurov¹, A. V. Dmitriev¹, O. S. Dmitrieva², A. M. Muginov¹

THE INFLUENCE OF THE DESIGN OF A STATIC MULTI-VORTEX CLASSIFIER ON THE EFFICIENCY FRACTIONATION OF SILICA GEL PARTICLES

¹ Kazan State Power Engineering University
51, Krasnoselskaya Str., 420066, Kazan, Russia; e-mail: ieremiada@gmail.com
² Kazan National Research Technological University
68, Karla Marksa Str., 420015, Kazan, Russia; e-mail: ja_deva@mail.ru

Представлена конструкция статического мульти-вихревого классификатора для фракционирования мелкодисперсных частиц силикагеля, исследовано влияние его конструктивного оформления на эффективность фракционирования. Предложено конструктивно дополнить аппарат изогнутыми кольцевыми пластинами, препятствующими повторному уносу отсепарированных частиц из аппарата завихренными потоками в межтрубном пространстве. Проведены численные расчеты по определению классификационных характеристик разработанного классификатора в программном комплексе *Ansys Fluent*. Представлены трехмерные модели разработанных классификаторов. В ходе исследований изменялись размер частиц и скорость газозвеси на входе в классификатор. Результаты исследований показали, что статический мультивихревой классификатор с высокой эффективностью позволяет фракционировать частицы с крупностью граничного зерна равной 35, 45, 55 и 75 мкм. Потери давления в статическом мультивихревом классификаторе без пластин составляют от 128 до 2111 Па при скорости на входе в аппарат от 4 до 16 м/с. Установка двух и трех пластин в межтрубное пространство классификатора изменяет перепад давления от 131 до 2230 Па и от 141 до 2230 Па соответственно при входной скорости от 4 до 16 м/с.

The paper proposes a design of a static multi-vortex classifier for the fractionation of fine silica gel particles. The principle of operation of the multi-vortex classifier is described. This work studies the effect of the design of a static multi-vortex classifier on the efficiency of fractionation of silica gel particles. We propose it to constructively supplement the apparatus with curved annular plates that prevent the repeated entrainment of separated particles from the apparatus by swirling flows in the inter-tube space. We carried numerical calculations out to determine the classification characteristics of the developed classifier in the *Ansys Fluent* software package. Three-dimensional models of the developed classifiers are presented. During the research, the particle size and the velocity of the gas suspension at the entrance to the classifier changed. The results of the research have shown that a static multi-vortex classifier with high efficiency allows fractionating particles with a grain size of the boundary equal to 35, 45, 55 and 75 microns. Pressure losses in a static multi-vortex classifier without plates range from 128 to 2111 Pa at a speed at the entrance to the apparatus from 4 to 16 m/s. The installation of two and three plates in the inter-tube space of the classifier changes the pressure drop from 131 to 2230 Pa and from 141 to 2230 Pa, respectively, at an input speed from 4 to 16 m/s.

Дата поступления 11.04.23

Ключевые слова: вихревая структура газа; мульти-вихревой классификатор; порошок силикагеля; разделение частиц по граничному зерну; статический классификатор; фракционирование частиц; центробежное разделение.

Работа выполнена при финансовой поддержке стипендии Президента РФ молодым ученым и аспирантам СП-3577.2022.1.

Во всем мире не прекращаются исследования в области направленного синтеза новых функциональных материалов различного назначения, например, силикагель широко применяется на предприятиях химической, нефтехимической и других отраслей промышленности в качестве осушителя, адсорбента, катализатора, наполнителя для шин и пр.^{1, 2}. Исходным сырьем для выработки служат различные по составу и свойствам кремнистые аморфные породы³⁻⁵. Традиционно используются химические методы производства кремнезема, такие как золь-гель-процесс, микроэмульсионный и пламенный синтез. Полученный силикагель должен быть подготовлен перед его коммерческим использованием, в том числе, измельчен и классифицирован по размерам^{6, 7}. Так, например, перед специализированным предприятием ООО «Салаватский катализаторный завод» (ООО «Скат3»), являющимся крупным производителем силикагеля в России, в настоящий момент времени стоит задача получения силикагеля дисперсностью от 10 до 40 мкм⁸, где сыпучее вещество изготавливается механическим измельчением в дробящих мельницах⁹. Однако данный способ диспергирования имеет недостаток – получение частиц фракций, имеющих большой разброс размеров¹⁰⁻¹². Устранение указанного недостатка осуществляется за счет использования классификаторов.

Существует сухая и мокрая классификация: мокрая – подразумевает взаимодействие фракционируемого вещества с водой¹³. Благодаря высоким гидрофильным свойствам силикагеля, метод мокрой классификации является неприемлемым. Сухая классификация подразделяется на классификацию ситовую (рассева) и аэродинамическую. Классификация отсева производится посредством ситовой сетки¹⁴. Как правило, ситовые классификаторы предназначены для разделения порошков по размерам частиц более 40–60 мкм^{15, 16}. Аэродинамическая классификация подразделяется на гравитационную за счет сил гравитации и центробежную, где вещество классифицируется за счет центробежных сил^{17, 18}. Наилучшим способом классификации силикагеля по граничному зерну 40 мкм и более является центробежный. Использование данного метода для разделения порошка

Key words: centrifugal separation; multi-vortex classifier; particle fractionation; particle separation by boundary grain; silica gel powder; static classifier; vortex structure of gas.

The work was carried out with the financial support of the President of the Russian Federation scholarship for young scientists and graduate students SP-3577.2022.1.

по граничным размерам менее 20 мкм мало эффективно, частицы склонны к слипанию и агломерации. Центробежная классификация подразделяется на статическую и динамическую. Динамические классификаторы в отличие от статических имеют подвижные части, из-за которых возникает повышенное аэродинамическое сопротивление. Статические классификаторы подвижных элементов не имеют, что с одной стороны, повышает надежность аппарата, а с другой стороны, снижает эффективность разделения из-за понижения стабильности закрученного пыленосущего потока. Исходя из вышесказанного, целесообразней применять статические центробежные классификаторы, если они удовлетворяют требуемой эффективности классификации для получения целевой фракции частиц¹⁹.

Таким образом, по-прежнему необходимо усовершенствовать существующие технологии классификации частиц на фракции требуемой крупности для придания порошку определенных химических и физических характеристик, обеспечивающих нужные конечные свойства продукции. Исследования по разработке новых классификаторов или улучшению работы существующих не теряют свою актуальность²⁰⁻²².

Описание разработанного классификатора

В результате ранее проведенных исследований²³ авторами данной работы была предложена конструкция статического мультивихревого классификатора вида «труба в трубе» для фракционирования сыпучего материала на основе силикагеля (рис. 1а). Фракционирование порошка в аппарате можно описать следующим образом. Поток газа с диспергированными частицами в нем различной дисперсности входит в мультивихревой классификатор через входное отверстие **1** и движется по внутренней цилиндрической трубе **2**, в нижней части стенки которой проделаны прямоугольные прорези **3** в осесимметричном направлении. Часть газового потока распределяется в равных долях через данные прорези **3**, при этом поток газа разделяется на две составляющие, каждая из которых по инерции движется в разные друг от друга стороны, т.е. одна в правую, а другая в ле-

вую. В результате такого распределения потока получается, что количество газовых струек вдвое больше количества имеющихся прямоугольных прорезей **3**.

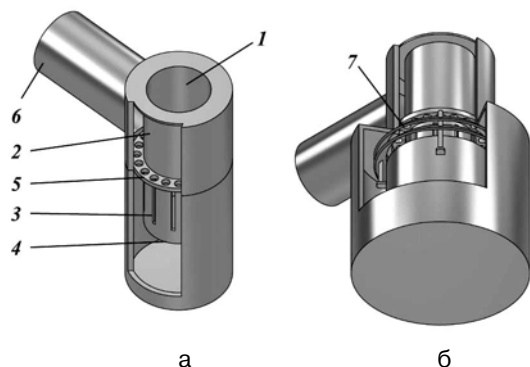


Рис. 1. Трехмерная модель статического мультивихревого классификатора (в разрезе): *а* – модель без изогнутых кольцевых пластин; *б* – модель с изогнутыми кольцевыми пластинами; **1** – входное отверстие; **2** – внутренняя труба; **3** – прямоугольные прорези; **4** – отверстие в нижней части внутренней трубы; **5** – пластина с круглыми отверстиями; **6** – выходной патрубок; **7** – изогнутые кольцевые пластины

Геометрическое расположение внешней и внутренней цилиндрических труб и прямоугольных прорезей **3** рассчитано таким образом²⁴, что каждая газовая струйка образует завихрение в межтрубном пространстве мультивихревого классификатора. В результате образуется упорядоченная вихревая структура, при которой вихри при установившемся течении практически друг с другом не пересекаются. При этом соседние завихрения имеют точки контакта друг с другом, в которых векторы скорости сонаправлены, т.е. вихревая структура «взаимоподдерживается»²⁵. Вследствие того, что радиус таких завихрений мал, образуется центробежное поле высоких значений, позволяющее проводить сепарацию мелких частиц из газового потока, которые отлетают к стенкам внутренней и внешней труб и падают в бункер классификатора. Далее газовый поток движется вверх в межтрубном пространстве классификатора, достигая пластины **5** с отверстиями, служащей для дополнительного поддержания вихревой структуры потока и сепарации уносимых вверх частиц. Центр каждого отверстия в пластине **5** совпадает с центром каждого завихрения в межтрубном пространстве классификатора. Далее поток выходит через патрубок **6** из устройства. С целью исключения забивания внутренней трубы частицами средней и крупной фракции, вследствие их инерционного вылета из потока при его резком повороте в прямоугольные прорези **3**, она выполняется сквозной, т.е. средние и крупнодисперсные частицы сразу падают в бункер классификатора.

Необходимо отметить, что на рис. 1 представлены упрощенные модели статического мультивихревого классификатора без изображения бункера. В реальной модели бункер расположен в нижней части аппарата. Одним из недостатков сквозного отверстия в нижней части внутренней трубы является образование восходящего потока, который проходит через межтрубное пространство, частично разрушая вихревую структуру. Существует вероятность, что восходящий поток может подхватывать отсепарированные частицы из запыленного газа и повторно возвращать их в поток. Для решения этой проблемы необходимы дополнительные конструктивные изменения в аппарате, в виде установки в межтрубное пространство изогнутых кольцевых пластин **7** (рис. 1).

Целью данной работы является исследование влияния конструктивного оформления статического мультивихревого классификатора на эффективность фракционирования частиц силикагеля. Сформулировано предположение, что при сепарации частиц из закрученных потоков в межтрубном пространстве они будут отлетать в зону между внешней цилиндрической трубой и изогнутыми кольцевыми пластинами **7**, что позволит снизить унос отсепарированных частиц восходящим потоком воздуха. Отметим, что для проведения идеального фракционирования сыпучего материала для решения задачи классификации силикагеля ООО «СкатЗ» при производстве адсорбентов для предприятий нефтегазового сектора⁸, необходимо улавливание частиц размером до 40 мкм с эффективностью 0%, а размером более 40 мкм – с эффективностью 100%. Предлагается использовать разработанный классификатор в качестве промежуточного звена в технологической линии по получению мелкодисперсного силикагеля. Частицы размером более 40 мкм будут улавливаться и отправляться на повторный помол. Частицы размером менее 40 мкм будут покидать классификатор и будут улавливаться далее в качестве готового продукта, например, в батарейных циклонах, которые имеют высокую эффективность улавливания частиц размером более 10 мкм, что позволит получить требуемый порошок с размером частиц от 10 до 40 мкм.

Объекты и методы исследования

Численные исследования по эффективности фракционирования частиц в мультивихревом классификаторе выполнялось в программном комплексе *Ansys Fluent*. Моделирование проводилось с использованием дифференциальных уравнений в частных производных (уравнение Навье-Стокса), которые дополняются уравнением нераз-

рывности. В качестве модели турбулентности использовалась $k-w$ SST, т.к. ранее^{24, 25} была получена допустимая неопределенность между физическим и численным исследованиями. Связь между движением текучей среды и частицами была одноходовой, т.е. влияние частиц на структуру потока не учитывалось, т.к. их объемная концентрация не превышала 10%. Модель рассчитывается в нестационарном режиме.

В качестве объектов исследований рассматривались три конструктивных исполнения статического мультивихревого классификатора: 1 – без изогнутых кольцевых пластин; 2 – с двумя изогнутыми кольцевыми пластинами; 3 – с тремя изогнутыми кольцевыми пластинами. Геометрические размеры трехмерных моделей мультивихревых классификаторов, на основе которых выполнялось численное моделирование: диаметр входного патрубка 64 мм, длина входного патрубка 180 мм, число прорезей во входном патрубке 10, их высота 55 мм, диаметр корпуса 100×5 мм, высота корпуса 230 мм, количество отверстий в пластине 20, диаметр отверстий в пластине 8 мм. Изогнутые кольцевые пластины установлены на расстоянии от внешней плоскости корпуса до пластины 85 мм. Расстояние между соседними изогнутыми пластинами 10 мм (рис. 1).

При численном моделировании были заданы следующие параметры: входная скорость газозвеси в устройство от 4 до 16 м/с, диаметр частиц от 5 до 100 мкм, плотность частиц 1075 кг/м³, на выходе из классификатора принималось атмосферное давление 101325 Па. На дне устройства задавалось условие прилипания частиц для оценки количества частиц, попавших в бункер. На остальных стенках классификатора задавалось условие отпрыгивания частиц.

Эффективность улавливания частиц статическим мультивихревым классификатором рассчитывалась по формуле:

$$E = \frac{n_{out}}{n_{in}} \cdot 100\% , \quad (1)$$

где n_{out} – количество частиц, уловленных классификатором, т.е. тех, которые достигли дна в численной модели аппарата;

n_{in} – количество частиц в потоке, который входит в мультивихревой классификатор.

Также рассчитывалось аэродинамическое сопротивление аппаратов:

$$\Delta p = p_{in} - p_{out} , \quad (2)$$

где p_{in} – статическое давление на входе в классификатор, Па;

p_{out} – давление на выходе из аппарата, т.е. атмосферное давление, Па.

Результаты и их обсуждение

Результаты численного моделирования показали, что статический мультивихревой классификатор позволяет разделять частицы разной дисперсности на две фракции с довольно высокой эффективностью. При этом крупность граничного зерна зависит от скорости газозвеси на входе в аппарат, которая смещается в область больших размеров частиц с уменьшением скорости (рис. 2–4). Например, для классификатора без изогнутых кольцевых пластин при входной скорости газозвеси равной 4 м/с крупность граничного зерна составляет 75 мкм, при увеличении скорости до 16 м/с крупность граничного зерна соответствует 35 мкм (рис. 2).

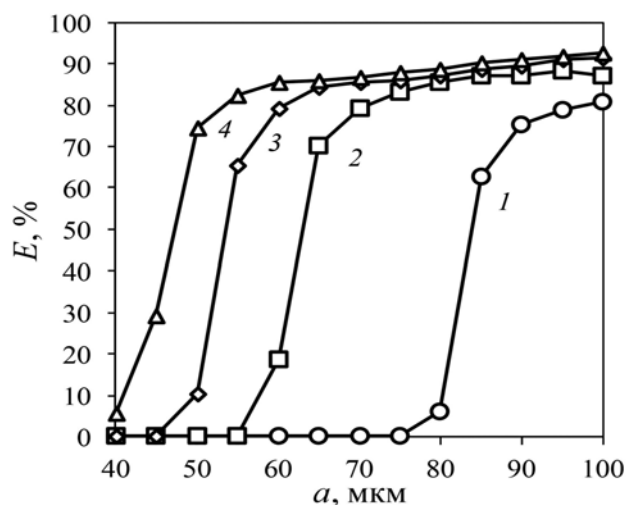


Рис. 2. Зависимость эффективности фракционирования частиц силикагеля в мультивихревом классификаторе без изогнутых кольцевых пластин от их диаметра при скорости газозвеси на входе в аппарат W , м/с: 1 – 4; 2 – 8; 3 – 12; 4 – 16

Исследования показали, что конструктивное оформление классификатора влияет на чистоту разделения. Как известно, идеальным фракционированием считается процесс, при котором порошок разделяется на две фракции, в каждой из которых содержатся частицы определенной дисперсности. При этом частицы одного и того же размера при идеальном фракционировании в двух получаемых фракциях после разделения находиться не могут. На практике достичь идеального фракционирования практически невозможно, т.к. учесть большую выборку факторов воздействия (технологические, теплофизические и др.) затруднительно. Результаты численных исследований демонстрируют, что наличие изогнутых кольцевых пластин в классификаторе относительно других конструкций без наличия данных пластин приводит к большему появлению объемных концентраций частиц иных размеров в получаемой фракции

определенной дисперсности. Например, для задачи получения порошка с крупностью граничного зерна равной 40 мкм, применение классификатора без изогнутых пластин может осуществляться при входной скорости газозвеси 16 м/с (рис. 2).

При этом эффективность улавливания частиц до 40 мкм будет составлять около 5%, т.е. объемная доля «ненужных» частиц в малом количестве будет присутствовать. В случае применения классификатора с изогнутыми кольцевыми пластинами (рис. 3, 4) для решения данной задачи эффективность улавливания частиц размером до 40 мкм варьируется от 14 до 40% в зависимости от скорости газозвеси, что хуже относительно предшествующего варианта (рис. 2).

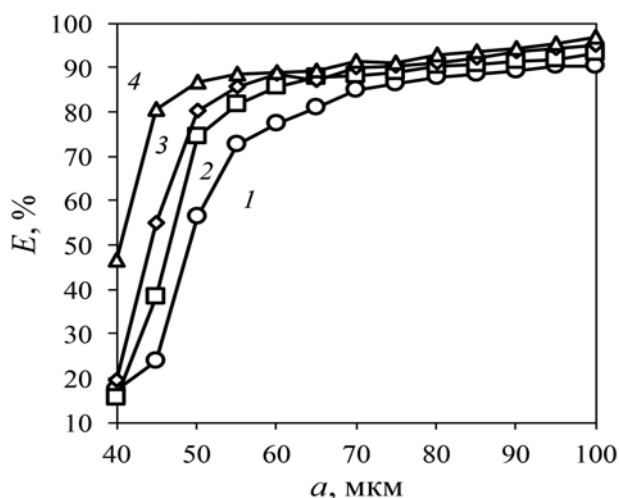


Рис. 3. Зависимость эффективности фракционирования частиц силикагеля в мультивихревом классификаторе с двумя изогнутыми кольцевыми пластинами от их диаметра при скорости газозвеси на входе в аппарат W , м/с: 1 – 4; 2 – 8; 3 – 12; 4 – 16

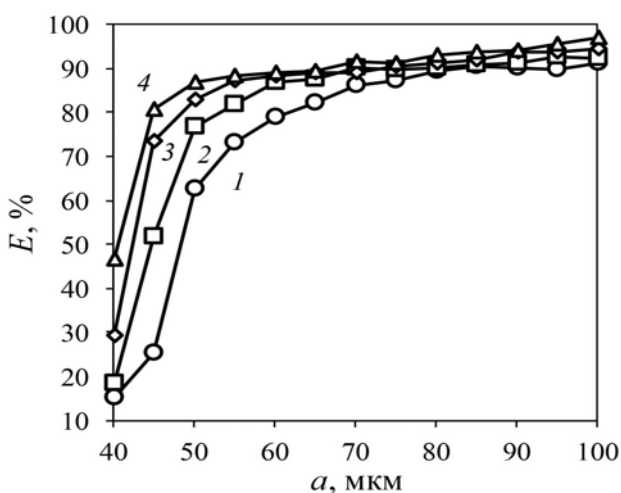


Рис. 4. Зависимость эффективности фракционирования частиц силикагеля в мультивихревом классификаторе с тремя изогнутыми кольцевыми пластинами от их диаметра при скорости газозвеси на входе в аппарат W , м/с: 1 – 4; 2 – 8; 3 – 12; 4 – 16

Графические зависимости (рис. 2–4) наглядно показывают, что сепарация частиц из газозвеси существенно зависит от центробежного поля, возникаемого в межтрубном пространстве аппарата. Инерционная (сепарация за счет резкого изменения направления движения газозвеси) и гравитационная (сепарация за счет силы тяжести) составляющие имеют существенно меньшее влияние. Например, при относительно небольшой скорости 4 м/с (рис. 2) эффективность улавливания частиц размером до 75 мкм составляет 0%, т.е. даже относительно крупные частицы размером более 60 мкм увлекаются потоком газа из аппарата. Увеличение скорости до 12 м/с позволяет существенно увеличить центробежные силы в межтрубном пространстве. Эффективность классификатора резко возрастает. Нулевая эффективность соответствует улавливанию частиц размером до 45 мкм (рис. 2). Необходимо отметить, что аэродинамическое сопротивление исследуемых конструкций классификаторов отличается не существенно. Потери давления в аппарате составляют от 128 до 2230 Па при скорости газа на входе в классификатор от 4 до 16 м/с (рис. 5).

Нулевая эффективность улавливания частиц статическим мультивихревом классификатором без изогнутых кольцевых пластин при их дисперсности до 75, 55, 45 и 35 мкм достигается при скорости газозвеси на входе в аппарат W , равной 4, 8, 12 и 16 м/с соответственно (рис. 2). Резкий рост эффективности классификатора происходит при размере частиц от 75 до 90 мкм (при $W = 4$ м/с), от 55 до 70 мкм (при $W = 8$ м/с), от 45 до 60 мкм (при $W = 12$ м/с), от 35 до 55 мкм (при $W = 16$ м/с). С увеличением размера частиц относительно этих диапазонов рост эффективности мультивихревого классификатора происходит постепенно без резких скачков. Эффективность аппарата изменяется от 76 до 81% ($90 < a < 100$ мкм, где a – диаметр частиц силикагеля, мкм, $W = 4$ м/с), от 80 до 87% ($70 < a < 100$ мкм, $W = 8$ м/с), от 79 до 91% ($60 < a < 100$ мкм, $W = 12$ м/с), от 82 до 92% ($55 < a < 100$ мкм, $W = 16$ м/с). Можно отметить, что крупность граничного зерна при скорости газозвеси на входе в аппарат W , равной 4, 8, 12 и 16 м/с имеет размер 75, 55, 45 и 35 мкм соответственно (рис. 2).

Эффективность статического мультивихревого классификатора с двумя изогнутыми кольцевыми пластинами составляет до 11% ($a < 35$ мкм, $W = 4$ м/с), до 7% ($a < 35$ мкм, $W = 8$ м/с), до 9% ($a < 35$ мкм, $W = 12$ м/с), до 15% ($a < 35$ мкм, $W = 16$ м/с). Аналогично результатам по классификатору без изогнутых кольцевых пластин (рис. 2) с увеличением размеров частиц в некотором небольшом диапазоне происходит резкий рост эф-

фективности аппарата, и далее она растет постепенно без резких скачков. Эффективность классификатора составляет от 72 до 90 % ($55 < a < 100$ мкм, $W = 4$ м/с), от 81 до 93 % ($55 < a < 100$ мкм, $W = 8$ м/с), от 80 до 94 % ($50 < a < 100$ мкм, $W = 12$ м/с), от 80 до 96 % ($45 < a < 100$ мкм, $W = 16$ м/с) (рис. 3).

Эффективность улавливания частиц классификатором с тремя изогнутыми кольцевыми пластинами (рис. 3) существенным образом не отличается от результатов, полученных для аппарата с двумя пластинами (рис. 2). Она составляет до 10% при условии, что $a < 35$ мкм, $W = 4$ м/с, до 9% при $a < 35$ мкм, $W = 8$ м/с, до 11% при $a < 35$ мкм, $W = 12$ м/с, до 15% при $a < 35$ мкм, $W = 16$ м/с. Как было отмечено ранее при описании двух предыдущих графиков (рис. 2, 3) далее идет резкий рост эффективности, после чего она увеличивается монотонно без резких скачков. Эффективность классификатора составляет от 72 до 91% (при размере частиц $55 < a < 100$ мкм, $W = 4$ м/с), от 81 до 92 % (при $55 < a < 100$ мкм, $W = 8$ м/с), от 82 до 94 % (при $50 < a < 100$ мкм, $W = 12$ м/с), от 80 до 96 % (при $45 < a < 100$ мкм, $W = 16$ м/с) (рис. 4).

Наличие изогнутых кольцевых пластин в классификаторе практически не влияет на его аэродинамическое сопротивление. Установлено, что при входной скорости газозвеси в аппарат от 4 до 16 м/с потери давления в классификаторе составляют от 128 до 2111 Па для модели без изогнутых кольцевых пластин, от 131 до 2230 Па для модели с двумя изогнутыми кольцевыми пластинами и от 141 до 2230 Па для модели с тремя изогнутыми кольцевыми пластинами (рис. 5).

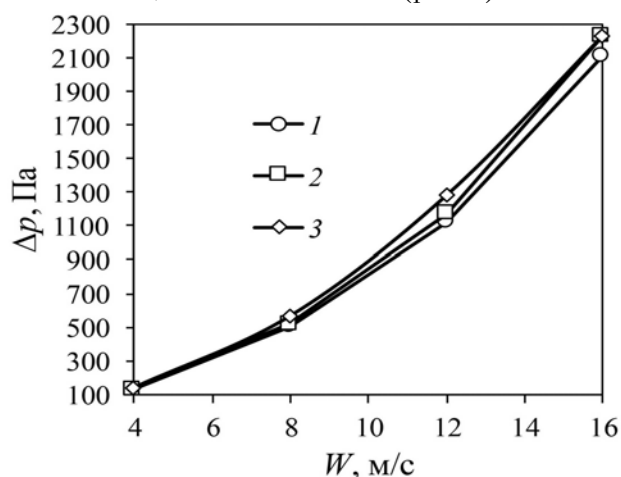


Рис. 5. Потери давления в мультивихревом классификаторе от скорости газа на входе в него: 1 – без изогнутых пластин; 2 – с двумя изогнутыми кольцевыми пластинами; 3 – с тремя изогнутыми кольцевыми пластинами

Таким образом, статический мультивихревой классификатор без изогнутых кольцевых пластин является предпочтительнее аппаратов с их наличием, т.к. фракции частиц после разделения

являются более «чистыми», т.е. с меньшими объемными концентрациями частиц иных размеров. Это вызвано возникновением дополнительной турбулентности восходящего газового потока, которая появляется вследствие обтекания изогнутых кольцевых пластин и частичного затекания потока в них. В результате хаотичный поток подхватывает частицы при их сепарации из газа. В случае классификатора без изогнутых кольцевых пластин восходящий поток газа меньшим образом влияет на повторный унос уловленных частиц. Вероятнее всего, при упорядочивании всех потоков в аппарате создается большее количество транспортных каналов²⁵, т.е. некоторых продольных областей небольшого размера с отрицательными или около нулевыми осевыми скоростями газа, при попадании в которые частицы уносятся в бункер классификатора. Возникновение более турбулизированного восходящего потока часть этих транспортных каналов разрушает, что и приводит к ухудшению фракционирования. При этом турбулизация потока не существенна, т.к. аэродинамическое сопротивление возрастает не более чем на 9%.

Статический мультивихревой классификатор с высокой эффективностью позволяет фракционировать частицы по крупности граничного зерна равной 35, 45, 55 и 75 мкм, может найти широкое применение при производстве катализаторов и адсорбентов для химической, горнодобывающей, пищевой и фармацевтической промышленности.

Наличие изогнутых кольцевых пластин в классификаторе приводит к ухудшению фракционирования частиц вследствие возникновения излишней турбулизации восходящего потока, которая разрушает часть транспортных каналов, способствующих переносу отсепарированных частиц из газа в бункер аппарата.

Наличие изогнутых кольцевых пластин в классификаторе практически не влияет на его аэродинамическое сопротивление. Максимальная разница составила 9%.

Потери давления в статическом мультивихревом классификаторе без пластин составляют от 128 до 2111 Па при скорости на входе в аппарат от 4 до 16 м/с. При наличии двух и трех пластин потери давления изменяются от 131 до 2230 Па и от 141 до 2230 Па соответственно при скорости на входе в аппарат в диапазоне от 4 до 16 м/с.

Дальнейшие исследования будут направлены на повышение эффективности улавливания частиц, размер которых больше крупности граничного зерна для соответствующей скорости газозвеси, т.е. эффективность при ее резком росте должна стремиться к 100%, чтобы обеспечить высокую селективность протекаемого процесса.

Литература

1. Videira-Quintela D., Martin O., Montalvo G. Emerging opportunities of silica-based materials within the food industry // *Microchemical Journal*.– 2021.– V.167.– P.106318.
2. Zhang D., Cai H., Su Y., Sun W., Yang D., Ozin G.A. Silica samurai: Aristocrat of energy and environmental catalysis // *Chem Catalysis*.– 2022.– V.2, №8.– Pp. 1893-1918.
3. Ayegba C.O., Makinde T., Obigwa P., Oriajogun J. Production of Silica Gel from Clay // *International Journal of Materials and Chemistry*.– 2015.– V.5, №6.– Pp.123-126.
4. Климов В.В., Абдрахимов В.З., Ковков И.В. Фазовые превращения, протекающие при обжиге самарских легкоплавких глин различного химико-минералогического состава // *Баш. хим. ж.*– 2008.– Т.15, №3.– С.128-132.
5. Мамонтов Г.В., Евдокимова Е.В., Савельева А.С. Силикагель – сорбент и носитель катализаторов: совершенствование технологий и поиск альтернативных путей производства // *Катализ в промышленности*.– 2022.– Т.22, №6.– С. 6-15.
6. Кутищева Е.С., Усольцева И.О., Передерин Ю.В. Способы получения высокодисперсного диоксида кремния // *Ползуновский вестник*.– 2021.– №2.– С.188-193.
7. Shan H., Zhou X., Jiang H., Hu Y., Jiang H., Li C. Synthesis of silica powder with high pore volume by skeleton reinforcement // *Chinese Journal of Chemical Engineering*.– 2022.– V.42.– Pp.219-226.
8. 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.
9. Лисица А.В. Дробление и измельчение рудных и нерудных материалов свободным ударом в центробежно-ударных дробилках и мельницах // *Тяжелое машиностроение*.– 2005.– №7.– С.40-42.
10. Солодовников Д.Н., Ханин С.Н., Воронов В.П. Возможности повышения эффективности процесса измельчения цементного клинкера в трубной мельнице // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*.– 2009.– №1.– С.76-79.
11. Вайтехович П.Е., Семененко Д.В. Эффективность измельчения в горизонтальной планетарной мельнице // *Химическая промышленность сегодня*.– 2012.– №8.– С.49-53.
12. Гарабазхиу А.А., Мурог В.Ю. Физическое моделирование процессов измельчения и классификации сыпучих материалов в роторноцентробежной мельнице // *Химическая промышленность*.– 2004.– №2.– С.36-45.
13. Косарев Н.П., Макаров В.Н., Угольников А.В., Макаров Н.В., Лифанов А.В. Эффективный способ гидровихревой классификации тонкодисперсных техногенных минеральных отходов в горно-металлургическом комплексе // *Вестник ПНИПУ Геология. Нефтегазовое дело*.– 2019.– Т.19, №4.– С.388-400.
14. Yu C., Pu K., Geng R., Qiao D., Lin D., Xu N., Wang X., Li J., Gong S., Zhou Q. Comparison of flip-flow screen and circular vibrating screen vibratory sieving processes for sticky fine particles // *Minerals Engineering*.– 2022.– V.187.– P.107791.

References

1. Videira-Quintela D., Martin O., Montalvo G. [Emerging opportunities of silica-based materials within the food industry]. *Microchemical Journal*, 2021, vol.167, p.106318.
2. Zhang D., Cai H., Su Y., Sun W., Yang D., Ozin G.A. [Silica samurai: Aristocrat of energy and environmental catalysis]. *Chem Catalysis*, 2022, vol.2, no.8, pp.1893-1918.
3. Ayegba C.O., Makinde T., Obigwa P., Oriajogun J. [Production of Silica Gel from Clay]. *International Journal of Materials and Chemistry*, 2015, vol.5, no.6, pp.123-126.
4. Klimov V.V., Abdrahimov V.Z., Kovkov I.V. *Fazovye prevrashheniya, protekayushhie pri obzhige samarskikh legkoplavkikh glin razlichnogo khimiko-mineralogicheskogo sostava* [Phase transformations occurring during the firing of Samara low-melting clays of various chemical and mineralogical composition]. *Bashkirskii khimicheskii zhurnal* [Bashkir Chemical Journal], 2008, vol.15, no.3, pp.128-132.
5. Mamontov G.V., Evdokimova E.V., Savel'eva A.S. *Silikagel' – sorbent i nositel' katalizatorov: sovershenstvovanie tekhnologiy i poisk al'ternativnykh putey proizvodstva* [Silica gel – sorbent and carrier of catalysts: improvement of technologies and search for alternative ways of production]. *Kataliz v promyshlennosti* [Catalysis in industry], 2022, vol.22, no.6, pp.6-15.
6. Kutishheva E.S., Usol'tseva I.O., Perederin Yu.V. *Sposoby polucheniya vysokodispersnogo dioksida kremniya* [Methods for obtaining highly dispersed silicon dioxide]. *Polzunovskij vestnik* [Polzunov Bulletin], 2021, no.2, pp.188-193.
7. Shan H., Zhou X., Jiang H., Hu Y., Jiang H., Li C. [Synthesis of silica powder with high pore volume by skeleton reinforcement]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2022, vol.42, pp.219-226.
8. Zinurov V.E., Dmitriev A.V., Dmitrieva O.S., Moiseeva K.S. *Promyshlennyye ispytaniya fraktsionirovaniya sypuchego materiala v mul'tivihrevoe klassifikatore-separatore* [Industrial testing 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.
9. Lisitsa A.V. *Droblenie i izmel'chenie rudnykh i nerudnykh materialov svobodnym udarom v tsentrobezno-udarnykh drobilkakh i mel'nitsakh* [Crushing and grinding of ore and non-metallic materials by free impact in centrifugal impact crushers and mills]. *Tyazheloe mashinostroenie* [Heavy Engineering], 2005, no.7, pp.40-42.
10. Solodovnikov D.N., Khanin S.N., Voronov V.P. *Vozmozhnosti povysheniya effektivnosti protsessa izmel'cheniya cementnogo klinkera v trubnoy mel'nitse* [Possibilities of improving the efficiency of the process of grinding cement clinker in a pipe mill]. *Vestnik BelGTU im. V.G. Shukhova* [Bulletin of the Belgorod State Technological University named V.G. Shukhov], 2009, no.1, pp.76-79.
11. Vajtehovich P.E., Semenenko D.V. *Effektivnost' izmel'cheniya v gorizont'noy planetarnoy mel'nitse* [Grinding efficiency in a horizontal planetary mill]. *Khimicheskaya promyshlennost' segodnya* [Chemical industry today], 2012, no.8, pp.49-53.
12. Garabazhiu A.A., Murog V.Yu. *Fizicheskoe modelirovaniye protsessov izmel'cheniya i klassifikatsii sypuchih materialov v rotatsionnoy mel'nitse* [Physical modeling of the processes of grinding and classification of bulk materials in a rotary centrifugal mill]. *Khimicheskaya promyshlennost'* [Chemical industry], 2004, no.2, pp.36-45.

15. Фалько А.Л., Крывошея А.В., Чернышева Е.А., Щербаков В.Ю. Повышение производительности ситовых барабанных классификаторов // Вестник Донского государственного аграрного университета.– 2015.– №4-1(18).– С. 54-61.
16. Мизонов В.Е., Ушаков С.Г., Барочкин Е.В. Аэродинамическая классификация порошков.– Иваново: ИГЭУ им. В.И. Ленина, 2014.– 260 с.
17. Rotich N., Tuunila R., Louhi-Kultanen M. Empirical study on the effects of screen inclination and feed loading on size classification of solids by gravity // *Minerals Engineering*.– 2015.– V.70.– Pp.162-169.
18. Sun Z., Sun G., Peng P., Liu Q., Yu X. A new static cyclonic classifier: Flow characteristics, performance evaluation and industrial applications // *Chemical Engineering Research and Design*.– 2019.– V.145.– Pp.141-149.
19. Guizani R., Mhiri H., Bournot P. Effects of the geometry of fine powder outlet on pressure drop and separation performances for dynamic separators // *Powder Technology*.– 2017.– V.314.– Pp. 599-607.
20. Киркор М.А., Бондарев Р.А. Исследование гидравлического сопротивления центробежного классификатора с криволинейными лопатками // *Техника и технология пищевых производств*.– 2016.– №2(41).– С.101-107.
21. Рыбалко Р.И., Кралин А.К. Исследование рабочих процессов аэродинамической классификации сыпучих материалов в двухстадийном сепараторе // *Современное промышленное и гражданское строительство*.– 2016.– Т.12, №2.– С.59-69.
22. Капустин Ф.Л., Пономарев В.Б. Получение обогащенного песка из отсевов дробления горных пород на пневматическом классификаторе // *Обогащение руд*.– 2016.– Т.364, №4.– С. 56-60.
23. Пат. №207306 РФ. Пылеуловитель-классификатор с коническим корпусом / Зинуров В.Э., Бадретдинова Г.Р., Дмитриев А.В., Дмитриева О.С., Мадышев И.Н. // *Изобретения. Полезные модели*.– 2021.– №30.
24. Zinurov V.E., Kharkov V.V., Madyshev I.N. Numerical simulation of pressure loss in a classifier with coaxial pipes // *Mining Informational and Analytical Bulletin*.– 2022.– V.10-1.– Pp.173-181.
25. Zinurov V.E., Kharkov V.V., Pankratov E.V., Dmitriev A.V. Numerical Study of Vortex Flow in a Classifier with Coaxial Tubes // *International Journal of Engineering and Technology Innovation*.– 2022.– V.12, №4.– Pp.336-346.
13. Kosarev N.P., Makarov V.N., Ugol'nikov A.V., Makarov N.V., Lifanov A.V. *Effektivnyi sposob gidrovikhrevoiy klassifikatsii tonkodispersnykh tehnogennykh mineral'nykh otkhodov v gorno-metallurgicheskom komplekse* [Efficient method of hydrovortex classification of finely dispersed technogenic mineral waste in the mining and metallurgical complex]. *Vestnik PNIPU Geologiya. Neftegazovoe delo* [Bulletin of PNIPU Geology. Oil and gas business], 2019, vol.19, no.4, pp.388-400.
14. Yu C., Pu K., Geng R., Qiao D., Lin D., Xu N., Wang X., Li J., Gong S., Zhou Q. [Comparison of flip-flow screen and circular vibrating screen vibratory sieving processes for sticky fine particles]. *Minerals Engineering*, 2022, vol.187, pp.107791.
15. Fal'ko A.L., Kryvosheya A.V., Chernysheva E.A., Shherbakov V.Yu. *Povyshenie proizvoditel'nosti sitovykh barabannykh klassifikatorov* [Improving the performance of sieve drum classifiers]. *Vestnik Donskogo gosudarst. agrarnogo universiteta* [Bulletin of the Don State Agrarian University], 2015, no.4-1(18), pp.54-61.
16. Mizonov V.E., Ushakov S.G., Barochkin E.V. *Aerodinamicheskaya klassifikatsiya poroshkov* [Aerodynamic classification of powders]. *Ivanovo: IGEU im. V.I. Lenina Publ.*, 2014, 260 p.
17. Rotich N., Tuunila R., Louhi-Kultanen M. [Empirical study on the effects of screen inclination and feed loading on size classification of solids by gravity]. *Minerals Engineering*, 2015, vol.70, pp.162-169.
18. Sun Z., Sun G., Peng P., Liu Q., Yu X. [A new static cyclonic classifier: Flow characteristics, performance evaluation and industrial applications]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2019, vol.145, pp.141-149.
19. Guizani R., Mhiri H., Bournot P. [Effects of the geometry of fine powder outlet on pressure drop and separation performances for dynamic separators]. *Powder Technology*, 2017, vol.314, pp.599-607.
20. Kirkor M.A., Bondarev R.A. *Issledovanie gidravlicheskogo soprotivleniya centrobezhnogo klassifikatora s krivolinyeynymi lopatkami* [Investigation of the hydraulic resistance of a centrifugal classifier with curved blades]. *Tekhnika i tehnologiya pishhevykh proizvodstv* [Technique and technology of food production], 2016, no.2(41), pp.101-107.
21. Rybalko R.I., Kralin A.K. *Issledovanie rabochikh protsessov aerodinamicheskoy klassifikatsii syuchikh materialov v dvuhstadiynom separatore* [Study of working processes of aerodynamic classification of bulk materials in a two-stage separator]. *Sovremennoe promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Modern industrial and civil construction], 2016, vol.12, no.2, pp.59-69.
22. Kapustin F.L., Ponomarev V.B. *Poluchenie obogashhenogo peska iz otsevoov drobleniya gornyykh porod na pnevmaticheskoy klassifikatore* [Obtaining enriched sand from screenings of crushing rocks on a pneumatic classifier]. *Obogashhenie rud* [Enrichment of ore], 2016, vol.364, no.4, pp.56-60.
23. Zinurov V.E., Badretdinova G.R., Dmitriev A.V., Dmitrieva O.S., Madyshev I.N. *Pyleulovitel'-klassifikator s konicheskim korpusom* [Dust-classifier with a conical body]. Patent RF no.207306, 2021.
24. Zinurov V.E., Kharkov V.V., Madyshev I.N. [Numerical simulation of pressure loss in a classifier with coaxial pipes]. *Mining Informational and Analytical Bulletin*, 2022, vol.10-1, pp.173-181.
25. Zinurov V.E., Kharkov V.V., Pankratov E.V., Dmitriev A.V. [Numerical Study of Vortex Flow in a Classifier with Coaxial Tubes]. *International Journal of Engineering and Technology Innovation*, 2022, vol.12, no.4, pp.336-346.