

В. Э. Зинуров

ВЛИЯНИЕ ДИАМЕТРА ОТВЕРСТИЙ В ПЛАСТИНЕ КЛАССИФИКАТОРА-СЕПАРАТОРА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФРАКЦИОНИРОВАНИЯ МЕЛКОДИСПЕРСНОГО СИЛИКАГЕЛЯ

Ключевые слова: классификатор, сепаратор, крупность граничного зерна, фракционирование, классификация, статический классификатор, разделение частиц, сепарация.

В настоящее время для химической, нефтехимической, атомной и других отраслей промышленности возрастает необходимость в мелкодисперсных порошках однородных по фракционному составу. В частности, стоит задача получения мелкодисперсного сыпучего материала на основе силикагеля с крупностью граничного зерна менее 50 мкм. Данный порошок применяется для осушки и очистки сред, которые склонны к полимеризации и разложению и др. целей. Для его получения необходимо проводить фракционирование сыпучего измельченного материала на основе силикагеля после мельницы. Данную задачу решают классификаторы – специальные сепараторы, предназначенные для разделения частиц на классы по крупности. В работе представлена конструкция разработанного мультивихревого классификатора-сепаратора для решения задачи фракционирования сыпучего материала на основе силикагеля с крупностью граничного зерна менее 50 мкм. Описан принцип действия работы аппарата. Целью работы является численное исследование влияния диаметра отверстий в пластине классификатора на эффективность при различных входных скоростях газового потока. Исследования проводились в программном продукте Ansys Fluent. В ходе исследований варьировался диаметр круглых отверстий от 5,3 до 11 мм и входная скорость газового потока от 1 до 16 м/с. Результаты численных исследований показали, что при диаметре круглых отверстий, сделанных в пластине классификатора-сепаратора равным 8 мм, достигается высокая эффективность фракционирования более 70 – 95 % для крупности граничного зерна 20 – 50 мкм при входных скоростях газового потока от 1 до 16 м/с. На эффективность фракционирования и крупность граничного зерна существенным образом влияют как входная скорость газового потока в широком диапазоне от 1 до 16 м/с, так и диаметр круглых отверстий при определенном значении - 8 мм. При иных размерах круглых отверстий эффективность и крупность граничного зерна остается практически неизменной. Это обусловлено хаотическим движением циркулирующих потоков, которые разрушают транспортные каналы. Проведенные исследования показывают, что применение разработанного классификатора-сепаратора может стать альтернативой многим зарубежным аналогам при решении задачи фракционирования мелкодисперсного сыпучего материала на основе силикагеля с крупностью граничного зерна 20 – 50 мкм.

V. E. Zinurov

INFLUENCE OF THE DIAMETER OF THE HOLES IN THE CLASSIFIER-SEPARATOR PLATE ON FRACTIONATION EFFICIENCY OF FINE SILICA GEL

Keywords: classifier, separator, boundary grain size, fractionation, classification, static classifier, particle separation, separation.

At present, the need for finely dispersed powders of homogeneous fractional composition is increasing for the chemical, petrochemical, nuclear and other industries. In particular, the task is to obtain a finely dispersed bulk material based on silica gel with a grain size of less than 50 microns. This powder is used for drying and purification of media, which are prone to polymerization and decomposition and other purposes. For this purpose, it is necessary to fractionate the crumbled bulk silica gel based material after the mill. This problem is solved by classifiers - special separators designed to separate particles into particle size classes. The paper presents the design of a developed multi-vortex classifier-separator for solving the problem of fractionation of bulk solids based on silica gel with a fineness of the grain size less than 50 microns. The principle of operation of the apparatus is described. The aim of the work is a numerical study of the influence of the diameter of holes in the classifier plate on the efficiency at different inlet velocities of the gas flow. The studies were carried out in the software product Ansys Fluent. During the studies, the diameter of round holes was varied from 5.3 to 11 mm and the inlet velocity of the gas flow from 1 to 16 m/s. The results of numerical studies showed that the high efficiency of fractionation over 70 - 95 % for fines of 20 - 50 microns at inlet velocities of gas flow from 1 to 16 m/s is reached if the diameter of round holes made in the plate of the classifier-separator is equal to 8 mm. The efficiency of fractionation and fineness of the boundary grains is significantly affected both by the inlet velocity of the gas flow in a wide range from 1 to 16 m/s, and by the diameter of round holes at a certain value - 8 mm. At other sizes of round holes, the efficiency and coarseness of the boundary grain remains practically unchanged. This is caused by chaotic movement of circulating flows, which destroy transport channels. The conducted studies show that the application of the developed classifier-separator can become an alternative to many foreign analogues in solving the problem of fractionation of fine bulk solids based on silica gel with a fineness of the boundary grain 20 - 50 microns.

Развитие химической, нефтехимической, атомной, промышленности, порошковой металлургии и других отраслей непосредственным образом связано с применением однородных по фракционному составу мелкодисперсных порошков [1, 2]. Например, для осушки и очистки сред, которые склонны к полимеризации и разложению, отбензинивания нефтяных газов и др.

целей используются мелкодисперсные фракции силикагеля [3, 4]. Основным производителем силикагеля для промышленных целей в Российской Федерации является промышленное предприятие ООО «Салаватский катализаторный завод» (ООО «СкатЗ»). Одной из наиболее важных проблем производства силикагеля в виде однородной гранулометрической фракции

является его фракционирование в классификаторе после измельчения в мельнице [5]. Эффективность фракционирования сыпучего материала на определенные гранулометрические фракции в классификаторе зачастую определяет характеристики аппаратов в технологической линии, в частности, их производительность и др. На данный момент времени рассматривается задача фракционирования сыпучего материала на основе силикагеля с крупностью граничного зерна равной 30 - 50 мкм [6]. В данном случае исходным продуктом является гранулометрическая фракция меньшей дисперсности относительности крупности граничного зерна. Стоит отметить, что повышение тонкости получаемых гранулометрических фракций облегчает процессы химического взаимодействия компонентов массы, спекания и иных процессов.

Как было отмечено ранее, для фракционирования порошков на определенные гранулометрические фракции используются специальные аппараты – классификаторы [7-9]. В зависимости от принципа действия классификация подразделяется на сухую и мокрую. Однако, при фракционировании силикагеля применять мокрую классификацию не представляется возможным в силу его гидрофильности (поры силикагеля легко заполняются водой). Сухая классификация основывается на гравитационных и инерционных эффектах. Наиболее распространенными аппаратами являются гравитационные и центробежные классификаторы, грохоты и сита [10-14]. Для разделения сыпучих материалов с крупностью граничного зерна менее 100 мкм, как правило, применяются центробежные воздушные классификаторы [15]. Данные аппарата подразделяются на динамические и статические. В динамических классификаторах применяются вращательные элементы. Например, турбулентный дисперсный поток производится за счет механического вращения ротора. В статических классификаторах подвижных элементов нет. Как правило, эффективность фракционирования в динамических классификаторах выше относительно статических. Однако, к недостаткам динамических классификаторов относят сложность конструкции, необходимость в частом ремонте и высокое гидравлическое сопротивление [16].

На данный момент времени в отечественной и зарубежной литературе представлено множество работ по фракционированию сыпучих порошков и разработке новых воздушных центробежных классификаторов [17, 18]. Авторы работы [19] исследуют спиральный классификатор-пылеотделитель для увеличения эффективности фракционирования мелкодисперсных фракций. В статье [20] представлен разработанный центробежный воздушный классификатор. Проведены численные и экспериментальные исследования. Результаты показали, что существенным образом на эффективность фракционирования частиц влияют конструктивные параметры. В частности, диаметр выходного отверстия аппарата. В работе [21] было исследовано на основе численного моделирования CFD влияние длины лопатки классификатора на распределение частиц угля в угольной мельнице. Анализ представленных работ показывает, что при разработке новых аппаратов для фракционирования мелко-

дисперсного сыпучего материала необходимо исследовать влияние конструктивных параметров на их эффективность.

Для фракционирования мелкодисперсного сыпучего материала на основе силикагеля был разработан мультивихревой классификатор-сепаратор (рис. 1). Аппарат представляет собой простую конструкцию, которая состоит из 2 цилиндрических труб, приваренных к ним патрубкам, образующих входное и выходное отверстия, поперечной пластины и дна. При этом во внутренней цилиндрической трубе проделаны прямоугольные щели 3 в осесимметричном направлении и в пластине 2 проделаны круглые отверстия для создания завихренного потока в межтрубном пространстве аппарата [22]. В работе [23] представлена методика расчета конструктивных параметров классификатора-сепаратора.

Принцип действия классификатора-сепаратора заключается в следующем. Запыленная газовая среда поступает в аппарат через входное отверстие 1. Далее движется прямолинейно по внутренней трубе до начала расположения прямоугольных щелей 3. После чего поток распределяется по щелям 3, и некоторая часть потока устремляется в цилиндрическое отверстие 4.

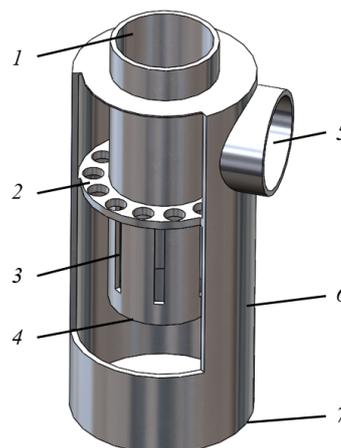


Рис. 1 – Трехмерная модель мультивихревого классификатора - сепаратора (изометрический вид с разрезом): 1 - входное отверстие; 2 – пластина с круглыми отверстиями; 3 – прямоугольные щели; 4 – цилиндрическое сквозное отверстие; 5 – выходное отверстие; 6 – корпус; 7 – отверстие для сыпания частиц в бункер устройства
Fig. 1 – Three-dimensional model of a multi-vortex classifier - separator (isometric view with a section): 1 - inlet hole; 2 - plate with round holes; 3 - rectangular slots; 4 - cylindrical through hole; 5 - outlet hole; 6 - housing; 7 - hole for pouring particles into the hopper of the device

Необходимо отметить, что основная часть газа устремляется в щели 3. При прохождении через них поток газа по инерции движется в разные стороны. Однако, вследствие конструктивной особенности аппарата формируется два основных направления движения газа: 1) в правую сторону, 2) в левую сторону. Учитывая, что прямоугольные щели 3 проделаны с определенным шагом во внутренней цилиндрической трубе мультивихревого классификатора – сепаратора,

газовые струйки в межтрубном пространстве подпирают друг друга, в результате образуется множество устойчивых завихрений. При этом их количество вдвое больше прямоугольных щелей 3. По мере своего движения в верхнюю часть аппарата завихрения проходят через отверстия в пластине 2. Роль данной пластины – поддержание вихревой структуры. Центр каждого отверстия совпадает с центром отдельного вихря. Таким образом, сформировавшаяся вихрь движется в верхнюю часть аппарата с минимальным отклонением от своей оси. Далее газ устремляется к выходу 5 из классификатора. Остальная часть газа с частицами проходит через сквозное отверстие 4, после чего осуществляется разворот потока на 180°, и газ проходит по межтрубному пространству по направлению к выходу из классификатора.

Сепарация частиц из потока осуществляется за счет инерционных и центробежных сил. В частности, при резком изменении потока – при повороте газа в сторону прямоугольных щелей 3 и при развороте газа на 180° при его выходе из цилиндрического сквозного отверстия 4 в межтрубное пространство аппарата преобладают инерционные силы, позволяющие выбивать из потока наиболее крупные частицы. При вращении газа в межтрубном пространстве возникают центробежные силы высоких значений в силу маленького радиуса вихрей, позволяющие выбивать из потока средние и мелкие частицы [24, 25]. Далее частицы постепенно сыплются в бункер через отверстие 7 (рис. 1). В зависимости от установленного режима в технологической линии крупность граничного зерна можно варьировать в диапазоне до 50 мкм.

Целью данной работы является численное исследование влияния диаметра отверстий в пластине классификатора на эффективность при различных входных скоростях газового потока.

Исследование проводилось в программном комплексе Ansys Fluent, предназначенном для вычислительных задач гидрогазодинамики, расчета трехмерного моделирования движения потоков и других целей. Следует отметить, что аналогами данной программы являются Solidworks Flow Simulation, FlowVision, SigmaFlow и др. В ходе численного моделирования применялась *k-w* SST модель турбулентности. Движения газового потока в программе моделируется путем решения уравнения Навье-Стокса, которое дополняется уравнением сплошности среды.

При проведении исследований диаметр отверстий в пластине 2 варьировался от 5,3 до 11 мм, входная скорость газового потока изменялась от 1 до 16 м/с. Стоит отметить, что предельный диаметр круглых отверстий при представленном конструктивном оформлении классификатора-сепаратора составляет 14,7 мм. Вследствие этого, максимальным размером для исследований было выбрано значение 11 мм. Диапазон от 11 до 14,7 мм приводит к разрушению вихревой структуры, т.к. вихри при своем вращении начинают взаимодействовать с соседними и разрушаться. В качестве сыпучего материала исследовался силикагель с плотностью частиц – 1075 кг/м³. При этом диапазон размеров частиц изменялся от 5 до 100 мкм. Для имитации наличия бункера у классификатора-сепаратора

на выходном отверстии 7 задавалось условие прилипания (рис. 1). На остальных поверхностях стенок классификатора-сепаратора задавалось условие отражения частиц. Температура газового потока принималась равной 25 °С. На выходе из классификатора-сепаратора задавалось давление 10⁵ Па. При генерации расчетной сетки проточного объема аппарата количество элементов составило 623212 шт.

Эффективность улавливания мелкодисперсного сыпучего материала на основе силикагеля в мультивихревом классификаторе-сепараторе рассчитывалась по следующему выражению:

$$E = 1 - \frac{n_k}{n}, \quad (1)$$

где n_k – количество мелкодисперсных частиц силикагеля, которые были уловлены аппаратом, n – количество частиц силикагеля, которые были в начальном газовом потоке на входе в аппарат.

Следует отметить, что эффективность фракционирования классификатора зависит от требуемой дисперсности получаемого порошка и принципа ее получения. В данном случае, готовым продуктом является гранулометрическая фракция меньшей дисперсностью относительно крупности граничного зерна. Иными словами, разработанный классификатор-сепаратор (рис. 1) улавливает частицы, которые идут повторно на помол в мельницу, после чего повторно возвращаются на фракционирование в аппарат. Частицы силикагеля, которые не были уловлены классификатором-сепаратором являются готовым продуктом. Которые далее в технологической линии улавливаются в виде порошка в батарейном циклоне.

Результаты численных расчетов показали, что эффективность фракционирования мелкодисперсного сыпучего материала на основе силикагеля в мультивихревом классификаторе-сепараторе достигается более 80 - 90 % для определенной крупности граничного зерна (рис. 2-5). При этом на эффективность фракционирования и крупность граничного зерна существенным образом влияет как входная скорость газового потока в широком диапазоне от 1 до 16 м/с, так и диаметр круглых отверстий при определенном значении - 8 мм. При иных размерах круглых отверстий эффективность и крупность граничного зерна остается практически неизменной. Это обусловлено хаотическим движением циркулирующих потоков, которые разрушают транспортные каналы, т.е. циркулирующие потоки, которые параллельны осевой линии классификатора-сепаратора. При сепарации частиц из газа в межтрубном пространстве и выполнения условия – попадания частиц в данные циркулирующие потоки, они уносятся в бункер аппарата. Следует отметить, что изменение входной скорости газового потока в интервале от 1 до 16 м/с в большей степени определяет степень эффективности классификатора-сепаратора. При увеличении входной скорости наблюдается рост эффективности улавливания частиц силикагеля в аппарате. Это вызвано тем, что при более высоких скоростях газового потока вихри вращаются быстрее, т.е. достигаются центробежные силы больших значений, чем при малых скоростях. Например, если рассмотреть диапазон частиц размером более

50 мкм, то эффективность их улавливания классификатором-сепаратором составляет в среднем 55,7, 71,4 и 76,6 % при входной скорости газового потока 1, 8 и 16 м/с соответственно и диаметре круглых отверстий от 5,3 до 11 мм (рис. 2-5).

При диаметре круглых отверстий, проделанных в пластине 2 (рис. 1) равным 5,3 мм эффективность фракционирования классификатором-сепаратором составляет не менее 75 % при крупности граничного зерна равной 20 мкм и входных скоростях газового потока от 1 до 16 м/с. При крупности граничного зерна равной 20, 30, 40 и 50 мкм эффективность фракционирования составляет не менее 93,1, 85,6, 79,3 и 72,8 % соответственно при входной скорости газа равной 1 м/с.

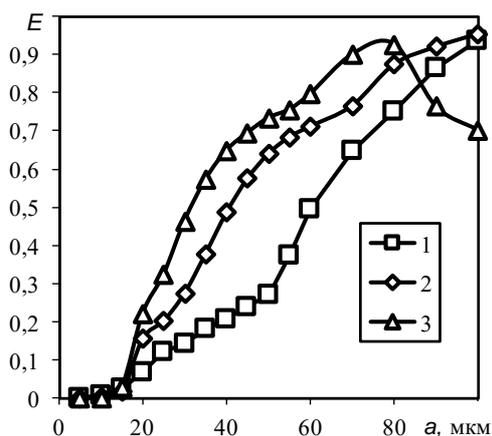


Рис. 2 – Зависимость эффективности улавливания мультивихревым классификатором-сепаратором частиц силикагеля от их диаметра при различных входных скоростях газового потока, м/с: 1 - 1; 2 - 8; 3 - 16. Диаметр круглых отверстий в пластине d_h – 5,3 мм

Fig. 2 – Dependence of the efficiency of the capture of silica gel particles by a multi-vortex classifier-separator on their diameter at different input velocities of the gas flow, m/s: 1 - 1; 2 - 8; 3 - 16. The diameter of the round holes in the d_h plate is 5.3 mm

С одной стороны, увеличение скорости газа от 1 до 8 и 16 м/с приводит к повышению эффективности улавливания частиц силикагеля, с другой, к снижению эффективности фракционирования. При условии, что готовым продуктом является фракция меньших размеров относительно крупности граничного зерна. При скорости газового потока 8 м/с эффективность фракционирования классификатором-сепаратором составляет не менее 84,3, 72,4, 51,3 и 35,9 % при крупности граничного зерна равной 20, 30, 40 и 50 мкм соответственно. При скорости газового потока 16 м/с эффективность фракционирования классификатором-сепаратором составляет не менее 77,7, 53,5, 35,1 и 26,6 % при крупности граничного зерна равной 20, 30, 40 и 50 мкм соответственно (рис. 2).

При диаметре круглых отверстий, проделанных в пластине 2 (рис. 1) равным 6,4 мм эффективность фракционирования снижается, эффективность улавливания частиц аппаратом увеличивается относительно предыдущего случая (рис. 2) при диаметре

круглых отверстий равным 5,3 мм (рис. 3). При скорости газового потока 1 м/с эффективность фракционирования классификатором-сепаратором составляет не менее 88,8, 85,5, 79,2 и 71,5 % при крупности граничного зерна равной 20, 30, 40 и 50 мкм соответственно. При скорости газа 8 м/с эффективность фракционирования составляет не менее 83,3, 71,5, 49,9 и 35,4 % при крупности граничного зерна равной 20, 30, 40 и 50 мкм соответственно. При скорости газа 16 м/с эффективность фракционирования составляет не менее 76,3, 52,3, 33,7 и 26,3 % при крупности граничного зерна равной 20, 30, 40 и 50 мкм соответственно (рис. 3).

Как было отмечено ранее, при диаметре круглых отверстий, проделанных в пластине 2 (рис. 1) равным 8 мм достигается структура газового потока в межтрубном пространстве близкой к идеальной, т.к. образуются транспортные каналы, позволяющие перемещать определенные группы частиц к бункеру устройства. При входной скорости газового потока 1 м/с эффективность фракционирования классификатором-сепаратором составляет не менее 96,9, 92,6, 85,8 и 74,7 % при крупности граничного зерна равной 20, 30, 40 и 50 мкм соответственно (рис. 4).

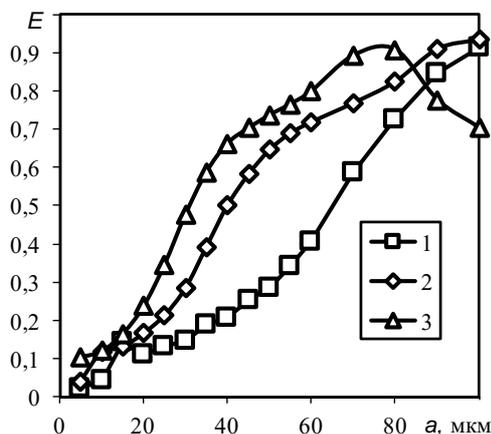


Рис. 3 – Зависимость эффективности улавливания мультивихревым классификатором-сепаратором частиц силикагеля от их диаметра при различных входных скоростях газового потока, м/с: 1 - 1; 2 - 8; 3 - 16. Диаметр круглых отверстий в пластине d_h – 6,4 мм

Fig. 3 – Dependence of the efficiency of the capture of silica gel particles by a multi-vortex classifier-separator on their diameter at different input velocities of the gas flow, m/s: 1 - 1; 2 - 8; 3 - 16. The diameter of the round holes in the d_h plate is 6.4 mm

При скорости газа 8 м/с эффективность фракционирования составляет не менее 99,4, 97,8, 92,9 и 73,7 % при крупности граничного зерна равной 20, 30, 40 и 50 мкм соответственно. При скорости газа 16 м/с эффективность фракционирования составляет не менее 99,7, 98,1, 89,2 и 27,8 % при крупности граничного зерна равной 20, 30, 40 и 50 мкм соответственно (рис. 4).

При диаметре круглых отверстий, проделанных в пластине 2 (рис. 1) равным 11 мм эффективность фракционирования классификатором-сепаратором уменьшается (рис. 5) относительно предыдущего ва-

рианта, результаты которого представлены на рисунке 4. При входной скорости газового потока 1 м/с эффективность фракционирования классификатором-сепаратором составляет не менее 89,2, 85,3, 77,5 и 68,1 % при крупности граничного зерна равной 20, 30, 40 и 50 мкм соответственно. При скорости газа 8 м/с эффективность фракционирования составляет не менее 83,4, 70,8, 50,2 и 36,1 % при крупности граничного зерна равной 20, 30, 40 и 50 мкм соответственно. При скорости газа 16 м/с эффективность фракционирования составляет не менее 75,1, 50,5, 33,3 и 25,4 % при крупности граничного зерна равной 20, 30, 40 и 50 мкм соответственно (рис. 5).

Таким образом, крупность граничного зерна и эффективность фракционирования практически не изменяется при диаметре круглых отверстий в пластине равным 5,3 (рис. 2), 6,4 (рис. 3) или 11 мм (рис. 5) при сравнении кривых, полученных при одинаковых входных скоростях газа, что свидетельствует об отсутствии существенной зависимости между данными техническими параметрами классификатора-сепаратора и его конструктивным параметром.

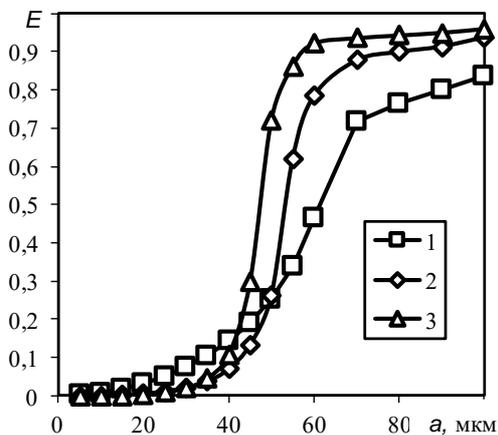


Рис. 4 – Зависимость эффективности улавливания мультивихревым классификатором-сепаратором частиц силикагеля от их диаметра при различных входных скоростях газового потока, м/с: 1 - 1; 2 - 8; 3 - 16. Диаметр круглых отверстий в пластине d_h – 8 мм

Fig. 4 – Dependence of the efficiency of the capture of silica gel particles by a multi-vortex classifier-separator on their diameter at different input velocities of the gas flow, m/s: 1 - 1; 2 - 8; 3 - 16. The diameter of the round holes in the d_h plate is 8 mm

Однако, при определенном диаметре круглых отверстий в пластине 2 (рис. 1) равным 8 мм достигается идеальное фракционирование мелкодисперсного сыпучего материала на гранулометрические фракции.

При этом крупность граничного зерна определяется входной скоростью газового потока. Это свидетельствует о наличии транспортных каналов в межтрубном пространстве аппарата. Можно отметить, наличие транспортных каналов зависит от конструктивных параметров классификатора-сепаратора (рис. 4). При этом изменение диаметра круглых отверстий в меньшую или большую сторону приводит

в большей степени к разрушению транспортных каналов, что приводит к снижению эффективности фракционирования частиц силикагеля (рис. 2, 3 и 5).

На основе проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1) При диаметре круглых отверстий, сделанных в пластине классификатора-сепаратора равным 8 мм, достигается высокая эффективность фракционирования более 70 – 95 % для крупности граничного зерна 20 – 50 мкм при входных скоростях газового потока от 1 до 16 м/с.

2) На эффективность фракционирования и крупность граничного зерна существенным образом влияет как входная скорость газового потока в широком диапазоне от 1 до 16 м/с, так и диаметр круглых отверстий при определенном значении - 8 мм. При иных размерах круглых отверстий эффективность и крупность граничного зерна остается практически неизменной. Это обусловлено хаотическим движением циркулирующих потоков, которые разрушают транспортные каналы.

3) Увеличение входной скорости газового потока от 1 до 16 м/с приводит к повышению эффективности улавливания частиц силикагеля в классификаторе-сепараторе в среднем на 20,9 %.

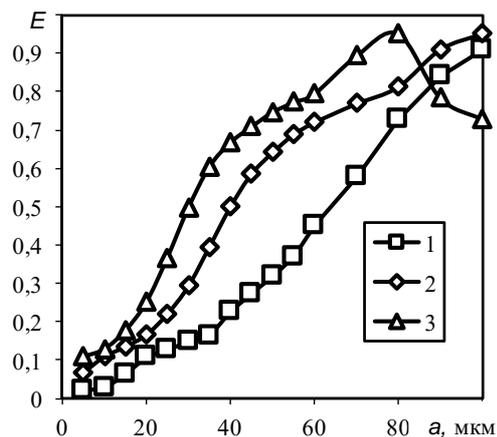


Рис. 5 – Зависимость эффективности улавливания мультивихревым классификатором-сепаратором частиц силикагеля от их диаметра при различных входных скоростях газового потока, м/с: 1 - 1; 2 - 8; 3 - 16. Диаметр круглых отверстий в пластине d_h – 11 мм

Fig. 5 – Dependence of the efficiency of the capture of silica gel particles by a multi-vortex classifier-separator on their diameter at different input velocities of the gas flow, m/s: 1 - 1; 2 - 8; 3 - 16. The diameter of the round holes in the d_h plate is 11 mm

Проведенные исследования показывают, что применение разработанного классификатора-сепаратора может стать альтернативой многим зарубежным аналогам при решении задачи фракционирования мелкодисперсного сыпучего материала на основе силикагеля с крупностью граничного зерна 20 – 50 мкм. Оценочная стоимость одной модели классификатора-сепаратора [26] составляет более 53 тыс. руб.

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

Литература

1. А.В. Шваб, А.Е. Соломаха. *Известия высших учебных заведений. Физика*, **64**, 2-2 (759), 155-161, (2021)
2. Н.А. Марцулевич, О.М. Флисюк, У.Г. Чиркунова. *Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета)*, **53** (79), 2020.
3. Я.А. Аль-Варис, В.Ф. Черных, Т.П. Косулина, Т.А. Солнцева. *Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе*, **1**, 31-37 (2009).
4. А.С. Скарюкин, А.В. Нистратов, В.Н. Клущин, Д.Д. Калинина. *Успехи в химии и химической технологии*, **31**, 9 (190), 48-50 (2017).
5. В.Э. Зинуров, А.В. Дмитриев, О.С. Дмитриева, К.С. Моисеева. *Вестник Технологического университета*, **25**, 4, 58-63 (2022).
6. В.Э. Зинуров, А.В. Дмитриев, И.И. Насырова, О.С. Дмитриева. *Вестник Технологического университета*, **25**, 4, 71-76 (2022).
7. В.Н. Трофимченко, С.И. Ханин, О.С. Мордовская. *Механизация строительства*, **8**, 43-45 (2015).
8. В.А. Шуляк, М.А. Киркор. *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*, 2-3, 91-93 (2005).
9. А.В. Шваб, П.Н. Зятиков, Ш.Р. Садретдинов, А. Г. Чепель. *Прикладная механика и техническая физика*, **51**, 2, 39-48 (2010).
10. В.И. Широков, О.С. Федоров, А.Г. Ипатов. *Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии*, **2**, 69-74 (2019).
11. W.H. Lai, W.F. Lu, C.C. Chen. *Advanced Powder Technology*, **16**, 6, 611-620 (2005).
12. M. Shapiro, V. Galperin. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, **44**, 279-285 (2005).
13. Е.А. Шуина, В.Е. Мизонов, Р.Ш. Мисбахов. *Вестник Ивановского государственного энергетического университета*, **5**, 60-63 (2015).
14. А.Г. Мякинков. *Пищевая и перерабатывающая промышленность. Реферативный журнал*, **1**, 66 (2000).
15. В.Б. Пономарев. *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*, **4**, 35-39 (2010).
16. V.E. Zinurov, A.V. Dmitriev, I.N. Madyshev, O.S. Dmitrieva. *Chemical and Petroleum Engineering*, **57**, 7-8, 531-537 (2021).
17. M. Betz, H. Nirschl, M. Gleiss. *Minerals*, **11**, 7, 663 (2021).
18. I.O. Mikulionok. *Chemical and Petroleum Engineering*, **56**, 1-2, 157-164 (2020).
19. О.Н. Терехова. *Вестник алтайской науки*, **1**, 482-485 (2015).
20. S. Zhanpeng, S. Guogang, Y. Xiaonan, Y. Yi, W. Qinglian, L. Jianxin. *Chemical Engineering Research and Design*. **117**, 139-148 (2017).
21. E.S.K. Why, F.B. Ismail, H. Hasini, M.S. Nasif. *AIP Conference Proceedings*. **2035**, 040001 (2018).
22. В.Э. Зинуров, А.В. Дмитриев, Н.Ф. Сахибгареев, Д.Н. Латыпов, М.Г. Гарипов. *Вестник Технологического университета*, **24**, 12, 128-132 (2021).
23. В.Э. Зинуров, И.Н. Мадышев, А.Р. Ивахненко, И.В. Петрова. *Ползуновский вестник*, **2**, 205-211 (2021).
24. V.E. Zinurov, A.V. Dmitriev, M.A. Ruzanova, O.S. Dmitrieva. *E3S Web of Conferences*, **193**, 01056 (2020).
25. V.E. Zinurov, A.V. Dmitriev, G.R. Badretdinova, R.Ya. Bikkulov, I.N. Madyshev. *Matec Web of Conferences*, **329**, 03035 (2020).
26. V.E. Zinurov, A.R. Galimova, M.V. Nikandrova, V.V. Khar'kov. *Atlantis Press*, **213**, 243-248 (2022).

References

1. A.V. Shvab, A.E. Solomakha. *Russian Physics Journal*, **64**, 2-2 (759), 155-161, (2021)
2. N.A. Martsulevich, O.M. Flisyuk, U.G. Chirkunova. *Bulletin of the St. Petersburg State Technological Institute (Technical University)*, **53** (79), 2020.
3. Ya.A. Al-Waris, V.F. Chernykh, T.P. Kosulina, T.A. Solntseva. *Environmental protection in the oil and gas complex*, **1**, 31-37 (2009).
4. A.S. Skaryukin, A.V. Nistratov, V.N. Klushin, D.D. Kalinina. *Advances in chemistry and chemical technology*, **31**, 9 (190), 48-50 (2017).
5. V.E. Zinurov, A.V. Dmitriev, O.S. Dmitrieva, K.S. Moiseeva. *Herald of Kazan Technological University*, **25**, 4, 58-63 (2022).
6. V.E. Zinurov, A.V. Dmitriev, I.I. Nasyrova, O.S. Dmitrieva. *Herald of Kazan Technological University*, **25**, 4, 71-76 (2022).
7. V.N. Trofimchenko, S.I. Khanin, O.S. Mordovskaya. *Mechanization of construction*, **8**, 43-45 (2015).
8. V.A. Shulyak, M.A. Kirkor. *News of higher educational institutions. Food technology*, 2-3, 91-93 (2005).
9. A.V. Shvab, P.N. Zyatikov, Sh.R. Sadretdinov, A. G. Chepel. *Applied Mechanics and technical physics*, **51**, 2, 39-48 (2010).
10. V.I. Shirobokov, O.S. Fedorov, A.G. Ipatov. *Bulletin of the Izhevsk State Agricultural Academy*, **2**, 69-74 (2019).
11. W.H. Lai, W.F. Lu, C.C. Chen. *Advanced Powder Technology*, **16**, 6, 611-620 (2005).
12. M. Shapiro, V. Galperin. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, **44**, 279-285 (2005).
13. E.A. Shuina, V.E. Mizonov, R.S. Misbakhov. *Bulletin of the Ivanovo State Energy University*, **5**, 60-63 (2015).
14. A.G. Myakinkov. *Food and processing industry. Abstract Journal*, **1**, 66 (2000).
15. V.B. Ponomarev. *Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*, **4**, 35-39 (2010).
16. V.E. Zinurov, A.V. Dmitriev, I.N. Madyshev, O.S. Dmitrieva. *Chemical and Petroleum Engineering*, **57**, 7-8, 531-537 (2021).
17. M. Betz, H. Nirschl, M. Gleiss. *Minerals*, **11**, 7, 663 (2021).
18. I.O. Mikulionok. *Chemical and Petroleum Engineering*, **56**, 1-2, 157-164 (2020).
19. O.N. Terekhova. *Bulletin of Altai Science*, **1**, 482-485 (2015).
20. S. Zhanpeng, S. Guogang, Y. Xiaonan, Y. Yi, W. Qingli-an, L. Jianxin. *Chemical Engineering Research and Design*. **117**, 139-148 (2017).
21. E.S.K. Why, F.B. Ismail, H. Hasini, M.S. Nasif. *AIP Conference Proceedings*. **2035**, 040001 (2018).
22. V.E. Zinurov, A.V. Dmitriev, N.F. Sahibgariev, D.N. Lатыпов, M.G. Garipov. *Herald of Kazan Technological University*, **24**, 12, 128-132 (2021).
23. V.E. Zinurov, I.N. Madyshev, A.R. Ivakhnenko, I.V. Petrova. *Polzunovsky Bulletin*, **2**, 205-211 (2021).
24. V.E. Zinurov, A.V. Dmitriev, M.A. Ruzanova, O.S. Dmitrieva. *E3S Web of Conferences*, **193**, 01056 (2020).
25. V.E. Zinurov, A.V. Dmitriev, G.R. Badretdinova, R.Ya. Bikkulov, I.N. Madyshev. *Matec Web of Conferences*, **329**, 03035 (2020).
26. V.E. Zinurov, A.R. Galimova, M.V. Nikandrova, V.V. Khar'kov. *Atlantis Press*, **213**, 243-248 (2022).

© В. Э. Зинуров – ассистент кафедры «Инженерная графика» (ИГ) ФГБОУ ВО «КГЭУ» (КГЭУ), vadd_93@mail.ru.

© V. E. Zinurov – Assistant of the Engineering Graphics department (IG), Kazan State Power Engineering University (KSPEU), vadd_93@mail.ru.