

**В. Э. Зинуров, А. В. Дмитриев, О. С. Дмитриева,
К. С. Моисеева**

ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ФРАКЦИОНИРОВАНИЯ СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА В МУЛЬТИВИХРЕВОМ КЛАССИФИКАТОРЕ-СЕПАРАТОРЕ

Ключевые слова: мультिवихревой классификатор, сыпучий материал, фракционирование, классификация частиц, центробежный классификатор.

В промышленности все чаще возникает потребность в узких фракциях сыпучих материалов. В статье рассмотрена проблема повышения качества сыпучего материала на основе силикагеля, который используется в качестве адсорбента на многих химических, нефтехимических и других предприятиях, в том числе находит широкое применение в бытовом секторе. Показано, что одним из факторов низкокачественных характеристик сыпучего материала на основе силикагеля является его дисперсность. В частности, для некоторых технологических процессов необходимы узкие гранулометрические фракции силикагеля. Наличие в этих фракциях иных гранулометрических групп частиц силикагеля приводит к ухудшению качественных характеристик сыпучего материала. В том числе данная проблема является актуальной для промышленного предприятия «Салаватский катализаторный завод», которое производит сыпучий материал на основе силикагеля, где требуется получение узкой гранулометрической фракции дисперсностью от 10 до 40 мкм. Представлена технологическая линия фракционирования силикагеля. Недостатком существующих аппаратов-классификаторов является большая вероятность получения фракции иной дисперсности, так как в заявленных характеристиках разделения сыпучего порошка заложены совершенно иные теплофизические и технологические параметры. Авторами работы предложена конструкция мультिवихревого классификатора-сепаратора. Представлена его трехмерная модель. Описан принцип действия и показаны основные конструктивные размеры. В работе представлены промышленные испытания фракционирования сыпучего материала на основе силикагеля в предлагаемом мультिवихревом классификаторе-сепараторе и циклонном сепараторе-классификаторе. В ходе промышленных испытаний оценивалось влияние таких параметров как влажность материала до помола, время помола, нагрузка на мельницу ударно-вихревого типа, нагрузка на дозатор сыпучего материала, нагрузка по току, перепад давления в технологической линии. Представлено изменение эффективности фракционирования сыпучего материала на основе силикагеля от эквивалентного диаметра сферы частиц по разным конструкциям сепараторов-классификаторов. Проведенные исследования показали, что предпочтительнее использовать мультिवихревой классификатор-сепаратор, селективность которого выше, чем у циклонного сепаратора-классификатора в среднем на 11,1%.

**V. E. Zinurov, A. V. Dmitriev, O. S. Dmitrieva,
K. S. Moiseeva**

INDUSTRIAL FRACTIONATION TESTS OF BULK MATERIAL IN A MULTI VORTEX CLASSIFIER SEPARATOR

Keywords: multi-vortex classifier, bulk material, fractionation, particle classification, centrifugal classifier.

In industry, there is an increasing need for narrow fractions of bulk materials. The article deals with the problem of improving the quality of bulk material based on silica gel, which is used as an adsorbent in many chemical, petrochemical and other enterprises, including is widely used in the domestic sector. It is shown that one of the factors of low-quality characteristics of bulk material based on silica gel is its fineness. In particular, some technological processes require narrow particle size fractions of silica gel. The presence in these fractions of other granulometric groups of silica gel particles leads to a deterioration in the quality characteristics of the bulk material. In particular, this problem is relevant for the Salavat Catalyst Plant industrial enterprise, which produces bulk material based on silica gel, where it is required to obtain a narrow granulometric fraction with a dispersion of 10 to 40 microns. A process line for silica gel fractionation is presented. The disadvantage of the existing classifiers is a high probability of obtaining a fraction of a different dispersion, since the declared characteristics of the separation of loose powder contain completely different thermal and technological parameters. The authors of the work proposed the design of a multi-vortex classifier-separator. Its three-dimensional model is presented. The operating principle is described and the main design dimensions are shown. The paper presents industrial tests of fractionation of bulk material based on silica gel in the proposed multivortex classifier-separator and cyclone separator-classifier. In the course of industrial tests, the influence of such parameters as the moisture content of the material before grinding, grinding time, load on the shock-vortex type mill, load on the bulk material dispenser, current load, pressure drop in the process line was evaluated. The change in the efficiency of fractionation of bulk material based on silica gel from the equivalent diameter of the sphere of particles for different designs of separator-classifiers is presented. The conducted studies have shown that it is preferable to use a multivortex classifier-separator, the selectivity of which is higher than that of a cyclone separator-classifier by an average of 11.1%.

В настоящее время в химической, нефтехимической и других отраслях промышленности возрастает потребность в адсорбентах в виде сыпучего материала на основе силикагеля. В свою очередь, он использу-

ется для осушки и очистки сред, склонных к разложению и полимеризации, отбензинивания природного газа на установках подготовки газа к транспорту и для других целей [1, 2]. Одним из основных производителей

лей катализаторов и адсорбентов, в частности, силикагеля в Российской Федерации является промышленное предприятие ООО «Салаватский катализаторный завод». Важной задачей для предприятия в процессе производства силикагеля является повышение его качественных характеристик, таких как влагостойкость, сорбционная емкость и пр. Так, одним из факторов низкого качества характеристик силикагеля является его дисперсность. В частности, для некоторых технологических процессов необходимы узкие гранулометрические фракции силикагеля. Наличие в этих фракциях иных гранулометрических групп частиц силикагеля приводит к ухудшению качественных характеристик сыпучего материала для данного технологического процесса. Вследствие этого возникает потребность в повышении селективности фракционирования сыпучего материала на основе силикагеля при его производстве [3].

Например, в одной из технологических линий на ООО «Салаватский катализаторный завод» была попытка реализовать следующую схему получения мелкодисперсного сыпучего материала на основе силикагеля с требуемой дисперсностью от 10 до 40 мкм (рис. 1).

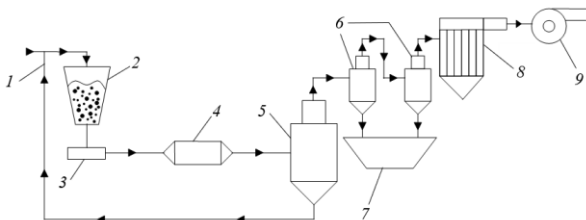


Рис. 1 – Технологическая схема фракционирования сыпучего материала на основе силикагеля на промышленном предприятии ООО «Салаватский катализаторный завод»: 1 – пневмотранспортная линия; 2 – расходный бункер; 3 – питатель; 4 – мельница ударно-вихревого типа; 5 – циклонный сепаратор; 6 – последовательно соединенные циклоны; 7 – бункер для готового продукта; 8 – рукавный фильтр; 9 – центробежный вентилятор

Fig. 1 – Technological scheme of fractionation of bulk material based on silica gel at the industrial enterprise Salavat Catalyst Plant LLC: 1 – pneumatic conveying line; 2 – supply hopper; 3 – feeder; 4 – mill of shock-vortex type; 5 – cyclone separator; 6 – series-connected cyclones; 7 – bunker for the finished product; 8 – bag filter; 9 – centrifugal fan

Силикагель по пневмотранспортной линии 1 поступает в расходный бункер 2, из которого с помощью питателя 3 подается в мельницу ударно-вихревого типа 4, в которой силикагель измельчается (рис. 1). При этом дисперсность порошка получалась в широком диапазоне, далее измельченный сыпучий порошок поступает в аппараты для разделения на требуемые фракции. Предварительно порошок подается в циклонный сепаратор-классификатор 5, действие которого основано на возникновении центробежных сил, позволяющий сепарировать средне и крупнодисперсные частицы из воздуха. Далее по пневмотранспортной линии частицы транспортировались на повторное измельчение в мельницу 4. После этого, на

выходе из циклонного сепаратора-классификатора получалась мелкодисперсная фракция, которая улавливалась в последовательно соединенных циклонах 6 и сыпалась в бункер 7. Причем данная фракция является готовым продуктом. Те частицы, которые не улавливались циклонами 6 поступали в рукавный фильтр 8, где поток воздуха очищается перед его выбросом в окружающую среду. Следует отметить, что технологическая линия работала под вакуумом, который создается центробежным вентилятором 9. Недостатком данной технологической схемы являлась низкая селективность циклонного сепаратора-классификатора 5. В частности, аппарат помимо средне и крупнодисперсных фракций, которые отправлялись на повторное измельчение в мельницу ударно-вихревого типа, улавливал относительно большие объемы мелкодисперсных частиц размером до 40 мкм, которые, в свою очередь, при повторном поступлении в мельницу ударно-вихревого типа 4 и измельчении в ней теряли товарный вид. Таким образом, дисперсность частиц силикагеля, зачастую, становилась менее 10 мкм.

Затем, при попадании данной фракции в готовый продукт после улавливания в последовательно соединенных циклонах 6, она ухудшала качественные характеристики силикагеля. Вследствие данного аспекта и необходимости повышения селективности разделения сыпучего материала на основе силикагеля возникла необходимость в замене циклонного сепаратора-классификатора 5 для получения требуемой фракции готового продукта.

Следует отметить, что на территории нашей страны и за рубежом разработано большое количество разнообразных моделей классификаторов, которые объединены в группы: центробежные, гравитационные, ситовые [4–6]. Одним из определяющих параметров, по которому классифицируют эти группы является граничный размер зерен. В центробежных классификаторах разделение осуществляется за счет возникновения центробежных сил [7]. В гравитационных за счет сил тяжести [8, 9]. В ситовых классификаторах для фракционирования используется сетка, размеры ячеек которой определяют граничный размер зерен [10, 11]. Для рассматриваемой технологической линии на рис. 1 гравитационные и ситовые классификаторы не могут быть использованы, как минимум, по двум причинам: 1) граничный размер зерен, как правило, составляет более 60 мкм для данных видов аппаратов; 2) требуются большие производственные площади и сопутствующее вспомогательное оборудование.

Центробежные классификаторы позволяют разделять сыпучий порошок, как правило, с граничным размером зерен от 10–20 мкм до нескольких сотен мкм [12–15]. Однако, недостатком известных аппаратов для данной технологической линии является большая вероятность получения фракции иной дисперсности, так как в заявленных характеристиках разделения сыпучего порошка заложены совершенно иные теплофизические и технологические параметры. Вследствие этого, была необходимость в разработке нового классификатора с более высокой селективностью, чем у циклонного сепаратора для получения сыпучего материала на основе силикагеля с дисперсностью от 10 до 40 мкм.

Для решения указанной проблемы авторами был разработан мультивихревой классификатор-сепаратор (рис. 2), принцип действия которого заключается в следующем. Поток с диспергированными частицами силикагеля в нем с разной дисперсностью подается в мультивихревой классификатор через входной патрубок 1, далее поток движется по внутренней цилиндрической трубе 2, которая погружена на определенную глубину. Также во внутренней цилиндрической трубе проделан ряд прямоугольных отверстий в осесимметричном направлении, в нижней части трубы проделано выходное отверстие аналогичное входному отверстию 1 [16, 17].

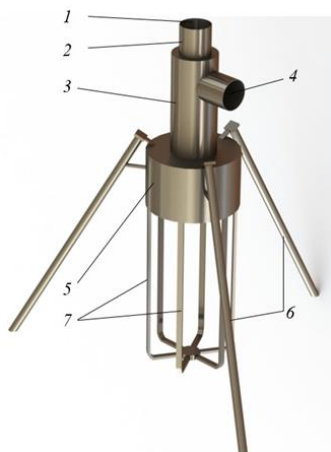


Рис. 2 – Трехмерная модель мультивихревого классификатора-сепаратора: 1 – входной патрубок; 2 – внутренняя цилиндрическая труба; 3 – внешняя цилиндрическая труба; 4 – выходной патрубок; 5 – цилиндрический блок; 6 – опоры; 7 – металлическая конструкция для съемной емкости

Fig. 2 - Three-dimensional model of a multivortex classifier-separator: 1 - inlet pipe; 2 - inner cylindrical pipe; 3 - outer cylindrical pipe; 4 - outlet pipe; 5 - cylindrical block; 6 - supports; 7 - metal structure for a removable container

Таким образом, при движении потока с частицами по внутренней цилиндрической трубе 1 при достижении глубины расположения прямоугольных щелей, он начинает в равных объемных долях распределяться по щелям. Следует отметить, что малая часть потока продолжает движение вниз по внутренней трубе 1 и выходит из нее, после чего продолжает движение к выходному патрубку 4 по межтрубному пространству (рис. 2) [18].

Одним из назначений проделанного отверстия во внутренней трубе в нижней части является предотвращение забивания аппарата сыпучим материалом, так как при прямолинейном движении запыленной среды по внутренней трубе крупнодисперсные частицы выпадают из потока за счет сил тяжести. Через проделанное отверстие во внутренней трубе крупнодисперсные частицы падают в съемную емкость, которая вешается на цилиндрический блок 5 и крепится к металлической конструкции 7. Основной поток движется в межтрубное пространство аппарата через прямоугольные щели.

При прохождении через каждую щель поток разделяется на две струи, каждая из которых движется в противоположном направлении относительно друг друга. За счет конструктивных особенностей аппарата каждая струя образует вихрь по высоте межтрубного пространства. Общее количество прямоугольных щелей равно 7, соответственно, образующихся вихрей в межтрубном пространстве будет 14. За счет того, что диаметр вихрей относительно небольшой, при их вращении возникают центробежные силы высоких значений, что позволяет сепарировать частицы размером до 60 мкм из газа. При их выбивании из потока они постепенно падают в съемную емкость. Важной особенностью классификации частиц в предлагаемом мультивихревом классификаторе являются обратные циркулирующие потоки, так называемые транспортные каналы. Так, например, ранее проведенные исследования [19] показали, что они имеются в пространстве между вихрями на определенной высоте. Мелкодисперсные частицы, которые остались в газовом потоке покидают мультивихревой классификатор через выходное отверстие 4 (рис. 2).

Целью данной работы является промышленное сравнение мультивихревого классификатора-сепаратора с циклонным сепаратором-классификатором при их поочередном применении в технологической линии по получению сыпучего материала на основе силикагеля дисперсностью от 10 до 40 мкм на Салаватском катализаторном заводе (рис. 3).

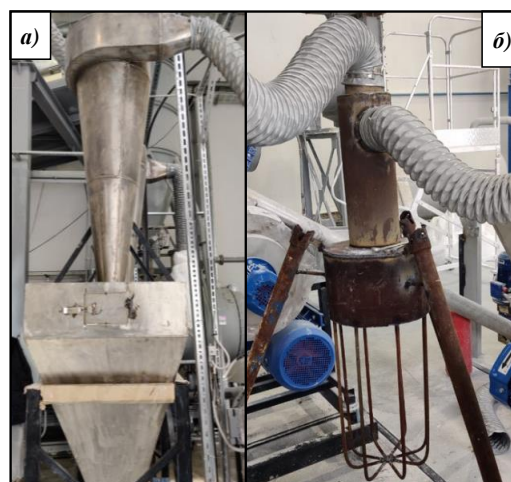


Рис. 3 – Сепарационные устройства на промышленном предприятии ООО «Салаватский катализаторный завод»: а) циклонный сепаратор-классификатор; б) мультивихревой классификатор-сепаратор

Fig. 3 - Separation devices at the industrial enterprise Salavat Catalyst Plant LLC: a) cyclone separator-classifier; b) multi-vortex classifier-separator

Для этого был изготовлен образец классификатора-сепаратора (рис. 3б). Следует отметить, что циклонный сепаратор-классификатор, ранее установленный в данной технологической линии, представлен на рис. 3а.

Классификатор-сепаратор (рис. 3б) был изготовлен из нержавеющей стали со следующими конструктивными параметрами: высота внутренней и внешней

труб 190 и 240 мм соответственно. При этом внутренняя труба на 30 мм расположена выше относительно внешней трубы, ширина и высота каждого прямоугольного отверстия 6 и 60 мм соответственно, диаметр цилиндрического блока равен 325 мм, а его высота – 200 мм. Размеры внутренней части цилиндрической трубы и выходного патрубка – 108×4 мм, внешней цилиндрической трубы – 159×5 мм, расстояние от верхнего края внешней цилиндрической трубы до начала выходного патрубка – 45 мм.

В ходе промышленных испытаний варьировались следующие параметры: влажность материала до помола от 8,1 до 61,3%, время помола от 10 до 324 мин, нагрузка на мельницу ударно-вихревого типа от 20 до 90%, нагрузка на дозатор от 7 до 25%, нагрузка по току от 14 до 17,5 А, перепад давления в технологической линии от 2 до 5,3 кПа.

Результаты промышленных испытаний показали, что использование мультивихревого классификатора-сепаратора позволяет достичь большей требуемой селективности относительно циклонного сепаратора-классификатора. На рис. 4 представлена зависимость эффективности фракционирования сыпучего материала мультивихревым классификатором-сепаратором и циклонным сепаратором-классификатором.

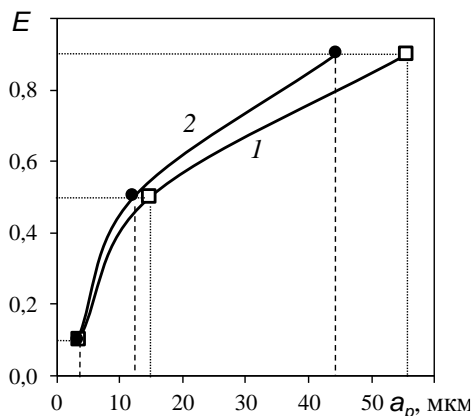


Рис. 4 – Эффективность фракционирования сыпучего материала на основе силикагеля от эквивалентного диаметра сферы частиц по объему: 1 – мультивихревой классификатор-сепаратор; 2 – циклонный сепаратор-классификатор

Fig. 4 - The efficiency of fractionation of bulk material based on silica gel from the equivalent diameter of the sphere of particles by volume: 1 – multivortex classifier-separator; 2 - cyclone separator-classifier

Следует отметить, что зависимость эффективности фракционирования E от эквивалентного диаметра сферы частицы по объему a_p показывает какой процент частиц размером до a_p был уловлен аппаратами. Так, эффективность фракционирования циклонного сепаратора-классификатора составляет 10, 50 и 90% для эквивалентного диаметра сферы равного 3,4, 12,3 и 44,4 мкм соответственно. Для мультивихревого классификатора-сепаратора эта же эффективность составляет 10, 50 и 90 % для эквивалентного диаметра сферы равного 3,5, 14,8 и 55,6 мкм соответственно. Как видно по рис. 4, при использовании циклонного

сепаратора-классификатора эффективность для граничного размера зерна равного 40 мкм составляет около 84,5%.

Селективность циклонного сепаратора-классификатора и мультивихревого классификатора-сепаратора E_p рассчитывалась по формуле: $E_p = 1 - E$.

Данная фракция попадает в бункер циклонного сепаратора-классификатора и идет на повторное измельчение в мельницу ударно-вихревого типа, после чего, как правило, измельчается до размеров менее 10 мкм и является отходом. При этом циклонный сепаратор-классификатор не улавливает фракцию сыпучего материала на основе силикагеля требуемой дисперсности от 10 до 40 мкм, которая после выхода из циклонного сепаратора-классификатора улавливается в последовательно соединенных циклонах и является готовым продуктом. Иными словами, селективность циклонного сепаратора-классификатора составляет около 15,5%. В случае с мультивихревым классификатором-сепаратором эффективность на основании данных рис. 4 для требуемой фракции от 10 до 40 мкм составляет 74,7%. Селективность мультивихревого классификатора-сепаратора составила около 25,3% (рис. 4).

Данные всех промышленных испытаний в количестве 13 штук представлены в таблице 1.

В ходе каждого отдельного испытания (исп.) варьировались параметры, которые были представлены выше. В частности, влажность материала до помола составляла 61,3 (1 – 2 исп.), 11,7 (3 – 4 исп.) и 8,1% (5 – 13 исп.), время помола составляло 10 (1 – 3 исп.), 19,9 (4 исп.) и 324 (5 – 13 исп.) мин., нагрузка на мельницу ударно-вихревого типа составляла 90 (1 исп.), 45 (2 исп.) и 20% (3–13 исп.), нагрузка на дозатор составляла 7 (1 исп.), 11 (2 исп.), 20 (3 исп.), 10 (4–6 и 9–13 исп.) и 8% (7–8 исп.), перепад давления в технологической линии составлял 2 (1 исп.), 4 (2 исп.), 5,1 (3 – 10 и 13 исп.), 5,9 (11 исп.) и 5,4 кПа (12 исп.).

Можно отметить, что практически во всех промышленных испытаниях эффективность улавливания частиц размером от 10 до 40 мкм циклонным сепаратором-классификатором выше, чем у мультивихревого классификатора-сепаратора. Иными словами, селективность фракционирования требуемой фракции выше у мультивихревого классификатора, чем у циклонного сепаратора-классификатора. В среднем эффективность улавливания частиц циклонным сепаратором-классификатором составила 10, 50 и 90% для эквивалентного диаметра сферы равного 3,68, 12,28 и 42,13 мкм соответственно. В среднем эффективность улавливания частиц мультивихревым классификатором-сепаратором составила 10, 50 и 90% для эквивалентного диаметра сферы равного 3,70, 14,75 и 53,44 мкм. Иными словами, селективность, рассчитанная по формуле, представленной выше, в среднем для 13 испытаний составила около 12,86% для циклонного сепаратора-классификатора и около 23,96% для мультивихревого классификатора-сепаратора (табл. 1).

Таким образом, серия проведенных промышленных испытаний позволила качественно и количественно сравнить циклонный сепаратор-классификатор и мультивихревой классификатор-сепаратор. В

результате чего установлено, что для получения сыпучего материала на основе силикагеля дисперсностью от 10 до 40 мкм предпочтительнее использовать мультивихревой классификатор-сепаратор, селективность которого выше, чем у циклонного сепаратора-классификатора в среднем на 11,1%. Следует отметить, что имеется перспектива повышения селективности мультивихревого классификатора-сепаратора. Для этого необходимо более детальное изучение газодинамики и возникновения транспортных каналов в мультивихревом классификаторе-сепараторе [19, 20].

Таблица 1 – Промышленные испытания по фракционированию сыпучего материала
Table 1 – Industrial tests for fractionation of bulk material

Испытание	Эффективность фракционирования E	Граничное зерно d_p , мкм	
		циклон	классификатор
1	0,1	3,7	3,5
	0,5	9,0	9,0
	0,9	21,7	22,8
2	0,1	4,3	4,7
	0,5	11,3	14,4
	0,9	32,9	48,9
3	0,1	3,6	4,0
	0,5	11,5	16,8
	0,9	44,1	64,7
4	0,1	4,4	4
	0,5	18,3	12,2
	0,9	57,9	37,4
5	0,1	3,5	3,4
	0,5	14,8	11,7
	0,9	55,6	43,4
6	0,1	3,5	3,7
	0,5	14,8	12,9
	0,9	55,6	46,6
7	0,1	3,5	3,8
	0,5	14,8	13,2
	0,9	55,6	48,0
8	0,1	3,5	3,6
	0,5	14,8	13,2
	0,9	55,6	47,2
9	0,1	3,7	3,5
	0,5	14,2	14,8
	0,9	49,1	55,6
10	0,1	3,0	3,5
	0,5	9,4	14,8
	0,9	34,0	55,6
11	0,1	3,8	3,5
	0,5	14,2	14,8
	0,9	49,8	55,6
12	0,1	3,9	3,5
	0,5	14,6	14,8
	0,9	49,2	55,6
13	0,1	3,4	3,5
	0,5	12,3	14,8
	0,9	44,4	55,6

На основе проведенной работы можно сделать следующие выводы:

1. Результаты промышленных испытаний показали, что использование мультивихревого классификатора-сепаратора для получения сыпучего материала на основе силикагеля дисперсностью от 10 до 40 мкм является более предпочтительным относительно циклонного сепаратора-классификатора.

2. Селективность мультивихревого классификатора-сепаратора составила около 23,96%.

3. Селективность циклонного сепаратора-классификатора составила около 12,86%.

Работа выполнена при финансовой поддержке стипендии Президента РФ СП – 3577.2022.1.

Литература

1. Я.А. Аль-Варис, В.Ф. Черных, Т.П. Косулина, Т.А. Солнцева, *Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе*, 1, 31-37 (2009).
2. А.С. Скарюкин, А.В. Нистратов, В.Н. Клущин, Д.Д. Калинина, *Успехи в химии и химической технологии*, 31, 9 (190), 48-50 (2017).
3. В.П. Жуков, Д.А. Осипов, В.Е. Мизонов, Т. Wyleciał, *Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология*, 62, 9, 102-109 (2019).
4. P. Fu, Y. Fang, X. Jiang, W. Lv, Y. Huang, Y. Liu, J. Li, Y. Chang, L. Ma, H. Wang, *J. Cleaner Prod.*, 244, 118782 (2020).
5. А.А. Гарабажиу, *Химическая промышленность*, 82, 5, 235-244 (2005).
6. В.В. Кафаров, И.Н. Дорохов, С.Ю. Арутюнов, *Системный анализ процессов химической технологии. Процессы измельчения и смешения сыпучих материалов*. Наука, Москва, 1985. 440 с.
7. В.Е. Мизонов, С.Г. Ушаков, Е.В. Барочкин, *Аэродинамическая классификация порошков*. ИГЭУ, Иваново, 2014. 260 с.
8. Y. Jin, H. Lu, X. Guo, X. Gong, *Adv. Powder Technol.*, 30, 7, 1277-89 (2019).
9. Д.И. Чиркун, С.В. Ярмолик, А.Э. Левданский, Э.И. Левданский, *Труды Белорусского государственного технологического университета. Серия 3. Химия и технология неорганических веществ*, 1, 3, 179-181 (2009).
10. В.І. Kolaitis, М.А. Founti, *Powder Technol.*, 125, 2-3, 298-305 (2022).
11. Е.Г. Федарович, П.С. Кулевиц, А.Э. Левданский, *Эпоха науки*, 27, 38-44 (2021).
12. М.А. Киркор, Р.Р. Бондарев, *Техника и технология пищевых производств*, 2 (41), 101-107 (2016).
13. А.В. Дмитриев, В.Э. Зинуров, О.С. Дмитриева, А.А. Галиев, *Вестник технологического университета*, 21, 9, 58-61 (2018).
14. В.Б. Пономарев, Расчет и проектирование оборудования для воздушной сепарации сыпучих материалов. УФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, 2017. 96 с.
15. А.В. Дмитриев, В.Э. Зинуров, О.С. Дмитриева, В.В. Харьков, *Вестник технологического университета*, 23, 3, 85-88 (2020).
16. В.Э. Зинуров, И.Н. Мадьшев, А.Р. Ивахненко, И.В. Петрова, *Ползуновский вестник*, 2, 205-211 (2021).
17. В.Э. Зинуров, А.Р. Галимова, *Вестник Самарского государственного экономического университета*, 12 (194), 50-59 (2020).
18. V.E. Zinurov, A.V. Dmitriev, M.A. Ruzanova, O.S. Dmitrieva, *MATEC Web Conf.*, 193, 01056 (2020).
19. В.Э. Зинуров, А.В. Дмитриев, Н.Ф. Сахибгареев, Д.Н. Латыпов, М.Г. Гарипов, *Вестник технологического университета*, 24, 12, 128-132 (2021).

20. V.E. Zinurov, A.V. Dmitriev, I.N. Madyshev, O.S. Dmitrieva, *Chemical and Petroleum Engineering*, **57**, 7-8, 531-537 (2021).

References

1. 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).
2. A.S. Skaryukin, A.V. Nistratov, V.N. Klushin, D.D. Kalinina, *Advances in Chemistry and Chemical Technology*, 31, 9 (190), 48-50 (2017).
3. V.P. Zhukov, D.A. Osipov, V.E. Mizonov, T. Wyleciał, *News of higher educational institutions. Series: Chemistry and Chemical Technology*, 62, 9, 102-109 (2019).
4. P. Fu, Y. Fang, X. Jiang, W. Lv, Y. Huang, Y. Liu, J. Li, Y. Chang, L. Ma, H. Wang, *J. Cleaner Prod.*, 244, 118782 (2020).
5. A.A. Garabagiou, *Chemical Industry*, 82, 5, 235-244 (2005).
6. V.V. Kafarov, I.N. Dorokhov, S.Yu. Arutyunov, *System analysis of chemical technology processes. Processes of grinding and mixing bulk materials*. Nauka, Moscow, 1985. 440 p.
7. V.E. Mizonov, S.G. Ushakov, E.V. Barochkin, *Aerodynamic classification of powders*. ISPU, Ivanovo, 2014. 260 p.
8. Y. Jin, H. Lu, X. Guo, X. Gong, *Adv. Powder Technol.*, 30, 7, 1277-89 (2019).
9. D.I. Chirkun, S.V. Yarmolik, A.E. Levdansky, E.I. Levdansky, *Proceedings of the Belarusian State Technological University. Series 3. Chemistry and technology of inorganic substances*, 1, 3, 179-181 (2009).
10. V.I. Kolaitis, M.A. Founti, *Powder Technol.*, 125, 2-3, 298-305 (2022).
11. E.G. Fedarovich, P.S. Kulevits, A.E. Levdansky, *Epoch of Science*, 27, 38-44 (2021).
12. M.A. Kirkor, R.R. Bondarev, *Technique and technology of food production*, 2 (41), 101-107 (2016).
13. A.V. Dmitriev, V.E. Zinurov, O.S. Dmitrieva, A.A. Galiev, *Bulletin of the Technological University*, 21, 9, 58-61 (2018).
14. V.B. Ponomarev, *Calculation and design of equipment for air separation of bulk materials*. UFU them. the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, 2017. 96 p.
15. A.V. Dmitriev, V.E. Zinurov, O.S. Dmitrieva, V.V. Kharkiv, *Bulletin of the Technological University*, 23, 3, 85-88 (2020).
16. V.E. Zinurov, I.N. Madyshev, A.R. Ivakhnenko, I.V. Petrova, *Polzunovskiy vestnik*, 2, 205-211 (2021).
17. V.E. Zinurov, A.R. Galimova, *Bulletin of the Samara State University of Economics*, 12 (194), 50-59 (2020).
18. V.E. Zinurov, A.V. Dmitriev, M.A. Ruzanova, O.S. Dmitrieva, *MATEC Web Conf.*, 193, 01056 (2020).
19. V.E. Zinurov, A.V. Dmitriev, N.F. Sakhigareev, D.N. Latypov, M.G. Garipov, *Bulletin of the Technological University*, 24, 12, 128-132 (2021).
20. V.E. Zinurov, A.V. Dmitriev, I.N. Madyshev, O.S. Dmitrieva, *Chemical and Petroleum Engineering*, 57, 7-8, 531-537 (2021).

© **В. Э. Зинуров** – ассистент кафедры «Теоретические основы теплотехники» (ТОТ) ФГБОУ ВО «КГЭУ» (КГЭУ), vadd_93@mail.ru, **А. В. Дмитриев** – д.т.н., зав. кафедрой ТОТ КГЭУ, ieremiada@gmail.com, **О. С. Дмитриева** – к.т.н., доцент кафедры ОПП ФГБОУ ВО «КНИТУ», ja_deva@mail.ru, **К. С. Моисеева** – студент кафедры ТОТ КГЭУ, kseniyamoiseeva_s@mail.ru.

© **V. E. Zinurov** – Assistant of the Department of Theoretical Basis of Thermotechnics (TBT), Kazan State Power Engineering University (KSPEU), vadd_93@mail.ru, **A. V. Dmitriev** – Dr. (Technical Sci.), Head of TBT Dep., KSPEU, ieremiada@gmail.com, **O. S. Dmitrieva** – PhD (Technical Sci.), Assistant Professor (docent) of the FPE dept., Kazan National Research Technological University, ja_deva@mail.ru, **K. S. Moiseeva** – student of the TBT dept., KSPEU, kseniyamoiseeva_s@mail.ru.