

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
ВЕСТНИК
ПОВОЛЖЬЯ**

№12 2023

Направления:

**1.2.2. – МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧИСЛЕННЫЕ
МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ (технические науки)**

**2.3.1. – СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА
ИНФОРМАЦИИ (технические науки)**

**2.3.3. – АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ
ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ (технические науки)**

**2.3.5. – МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН, КОМПЛЕКСОВ И КОМПЬЮТЕРНЫХ
СЕТЕЙ (физико-математические науки)**

**2.3.5. – МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН, КОМПЛЕКСОВ И КОМПЬЮТЕРНЫХ
СЕТЕЙ (технические науки)**

**2.3.6. – МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ,
ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
(физико-математические науки)**

**Казань
2023**

1.2.2.

¹А.М. Мугинов, ²В.В. Харьков, ¹О.С. Попкова,
¹Н.Д. Якимов, ²А.Н. Николаев, ²В.С. Минкин

¹Казанский государственный энергетический университет,
²Казанский национальный исследовательский технологический университет,
Казань, v.v.kharkov@gmail.com

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕНТРОБЕЖНОГО КЛАССИФИКАТОРА ДЛЯ СЕПАРАЦИИ ГАЗОВЗВЕСИ

В работе представлена конструкция центробежного классификатора для фракционного разделения силикагеля в газовой несущей среде. Приводится принцип его работы и трехмерная модель. Целью работы является численное моделирование процесса фракционирования мелкодисперсных частиц силикагеля в разработанном классификаторе центробежного типа. Для исследований была построена сеточная модель классификатора, включающая около 1 млн. ячеек. В ходе исследований изменялись высота щелей прямоугольной формы и расстояние от пластины до данных щелей. Результаты исследований показали, что применение воздушного классификатора газозвеси с достаточно высокой селективностью. Найдено, что центробежный классификатор выгодно использовать для разделения частиц с критическим диаметром равным 30–40 мкм. Гидравлическое сопротивление центробежного классификатора составляет 506 до 2145 Па при входной скорости газозвеси равной от 8 до 16 м/с. Показано, что увеличение высоты щелей прямоугольной формы и уменьшение расстояния от них до пластины приводит к снижению эффективности улавливания частиц центробежным классификатором.

Ключевые слова: *центробежный классификатор, эффективность, гидравлическое сопротивление.*

В настоящее время силикагель используется в качестве сорбента на различных предприятиях химической, нефтеперерабатывающей и других отраслей промышленности [1]. Свойство гидрофильности позволяет применять силикагель в качестве адсорбента для очистки газов, а в химической промышленности силикагель применяют в качестве катализатора [2]. На данный российский промышленность нуждается в отечественном качественном силикагеле с размером частиц от 10 до 40 микрон, поэтому его выпуск в промышленных масштабах является актуальным [3, 4]. Требуемая дисперсность твердых частиц сыпучих материалов полностью определяется выбором классификатора и степенью его эффективности [5–8].

На сегодняшний день существуют методы мокрой и сухой классификации [9, 10]. Наиболее широкое применение приобрел сухой метод, который осуществляется с помощью сит, гравитационных и центробежных классификаторов. Эффективность ситовой классификации для ультрадисперсных порошков низкая из-за сниженного срока эксплуатации по причине засора их решеток [11, 12]. Центробежные классификаторы наиболее предпочтительны для фракционирования силикагеля, так как они позволяют эффективно разделять сыпучие материалы низкой дисперсности за счёт действия центробежных сил [13, 14].

По данной теме существует множество экспериментальных и теоретических исследований. В работе [15] рассматривается двухмерная математическая модель классификации частиц мелкодисперсного сыпучего материала на вибрирующем ситовом тканом полотне. Модель использует математический аппарат теории цепей Маркова и способна прогнозировать локальные состояния сыпучего материала в виброклассификаторе. Исследовано как влияет на выход частиц в подситовое и надситовое пространство

производительность подачи сыпучего материала. Авторами [16] рассматривается принцип действия инерционного устройства метательного типа, а также выведены уравнения движения частиц твёрдых частиц различного размера в нисходящем газовом потоке. В работе [17] анализируются возможные способы повышения эффективности фракционирования центробежных сепараторов для классификации порошков. Авторами [18] построены временные и пространственные характеристики для процесса классификации порошковой газозвеси в Z-образном воздушном классификаторе.

Авторами разработан центробежный классификатор для сепарации типа «труба в трубе» для гетерогенных систем с размером твердых частиц от 10 до 40 мкм (рис. 1) [3]. Принцип разделения газозвеси в классификаторе заключается в следующем: газозвесь с дисперсным порошком силикагеля загружается в устройство через отверстие (поз. 1), по нисходящей траектории движется по внутренней трубе и проходит через щели (поз. 3), которые имеются по всей высоте трубы равномерно по ее окружности. При прохождении через щели (поз. 3), новообразованные потоки газозвеси по инерции движутся в обе стороны, т.е. в правую и левую стороны, образуя завихрения в кольцевом пространстве аппарата. Конструктивное расположение щелей, внутренней и внешней цилиндрических труб позволяет создать в кольцевом пространстве мультивихревую систему. При этом вихри не пересекаются друг с другом, т.е. не происходит их взаимного разрушения. Учитывая, что радиус вихрей относительно мал, создаваемые центробежные силы достигают больших значений. В результате их действия на мелкодисперсные частицы силикагеля, находящиеся в потоке, они отлетают к внутренней стенке внешней трубы, от которых отскакивают и падают в бункер классификатора (поз. 7). Более мелкие частицы в газовом потоке, для которых центробежной силы недостаточно для их выбивания, покидают мультивихревую классификатор через выходное отверстие (поз. 5). Пластина с рядом круглых отверстий (поз. 2) предназначена для дополнительного поддержания мультивихревой системы, так как конструктивно центр каждого отверстия совпадает с расчетным центром вихря в кольцевом пространстве аппарата. Для того, чтобы исключить забивание внутренней трубы крупными частицами в нижней ее части проделано небольшое круглое отверстие, через которое частицы сыплются в бункер классификатора.

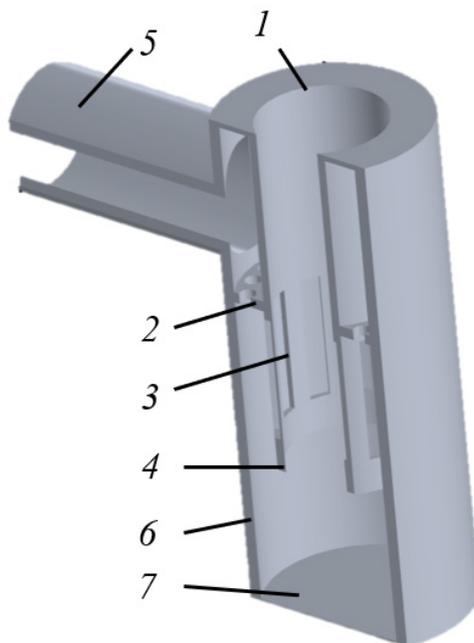


Рис. 1 – Пространственная модель исследуемого классификатора:
1 – отверстие для подачи газозвеси; 2 – перфорированная пластина; 3 – щели;
4 – нижнее отверстие; 5 – выходное отверстие; 6 – корпус; 7 – бункер

Целью работы является численный расчет процесса сепарации мелкодисперсных частиц силикагеля в разработанном классификаторе центробежного типа.

Для проведения численных исследований была построена CAD модель исследуемого устройства. Геометрические размеры элементов устройства принимались следующие: высота прямоугольных щелей $h_1 = 55$ мм, диаметр сквозных отверстий в пластине $d_1 = 8$ мм, расстояние между внутренней и внешней трубами $d_v = 12,4$ мм, ширина щелей $b_1 = 3,2$ мм, расстояние от нижней части щелей до нижнего отверстия $h_3 = 17$ мм. В ходе расчета изменялись следующие размеры: высота щелей h_1 варьировалась от 58 до 62 мм и расстояние от пластины с рядом отверстий до щелей h_2 изменялось от 5 до 1 мм. На основе трехмерной модели производилась генерация расчетной сетки, которая состояла из 1 млн. ячеек.

Граничные условия для решения численной модели задавались следующие: скорость газозвеси на входе в центробежный классификатор – от 8 до 16 м/с, на выходе – атмосферное давление, на стенках принималось условие полного отражения частиц, а на дне – условие прилипания частиц, начальная скорость частиц на входе в классификатор составляла 0 м/с. Также диаметр твердых частиц силикагеля a варьировался в интервале от 1 до 100 мкм при плотности 1075 кг/м^3 .

Эффективность воздушного классификатора для разделения газозвеси рассчитывалась по выражению:

$$E = \frac{n_p}{n_\Sigma}, \quad (1)$$

где n_p – количество уловленных частиц; n_Σ – общее количество частиц силикагеля на входе в устройство.

Гидравлическое сопротивление центробежного классификатора рассчитывалось как разность давления на входе p_1 и выходе из устройства p_5 , Па:

$$\Delta p = p_1 - p_5, \quad (2)$$

Результаты исследований показали, что применение классификатора центробежного типа позволяет фракционировать газозвесь с достаточно высокой селективностью. В частности, использование аппарата позволяет отсекал фракцию силикагеля размером до 30 – 40 мкм. Максимальная эффективность центробежного классификатора при улавливании частиц размером до 30 и 40 мкм составляет 2,2 и 7,9 % соответственно. При этом было установлено, что на эффективность центробежного классификатора при улавливании мелкодисперсных частиц силикагеля размером до 40 мкм изменение конструктивных параметров и входной скорости газозвеси в исследуемом диапазоне практически не оказывает (изменение составляет менее 5,7 %). Таким образом, центробежных сил, возникающих при вращении вихрей в межтрубном пространстве классификатора для сепарации частиц из газа размером до 40 мкм недостаточно. Рассмотрение диапазона твердых частиц размером более 40 мкм показывает, что влияние конструктивных параметров и входной скорости газозвеси на эффективность устройства является более выраженным. При этом максимальное влияние на процесс сепарации частиц размером более 40 мкм оказывает скорость на входе в устройство, так как она большим образом влияет на закрутку вихрей, т. е. определяет центробежную силу, в отличие от изменяемых конструктивных параметров: h_1 и h_2 . В среднем эффективность центробежного классификатора при сепарации частиц силикагеля из газа размером более 40 мкм составляет 57,1, 62,9 и 65,4 % при входной скорости газозвеси равной 8, 12 и 16 м/с соответственно при исследуемых конструктивных параметрах $h_1 = 58$ –62 мм и $h_2 = 1$ –5 мм (рис. 2–4).

В ходе исследований установлено, что гидравлические потери исследуемого устройства Δp варьируется в интервале от 506 до 2145 Па. В значительной степени сопротивление классификатора зависит от начальной (входной) скорости газозвеси W . Так, при изменении конструктивных параметров h_1 от 58 до 62 мм и h_2 от 5 до 1 мм Δp изменяется от 542 до 506 ($W = 8$ м/с), от 1197 до 1232 ($W = 12$ м/с) и от 2145 до 2037 Па ($W = 16$ м/с) соответственно.

Эффективность центробежного классификатора E при сепарации частиц силикагеля размером до 40 мкм из газа в среднем составляет 1,7, 1,6 и 1,7 % при входной скорости газа равной 8, 12 и 16 м/с соответственно. При росте размера твердых частиц более 40 мкм наблюдается значительный рост эффективности. Так, при скорости газа 8, 12 и 16 м/с эффективность классификатора центробежного типа в среднем равно 62,2, 69,4 и 75,2 % соответственно (рис. 2).

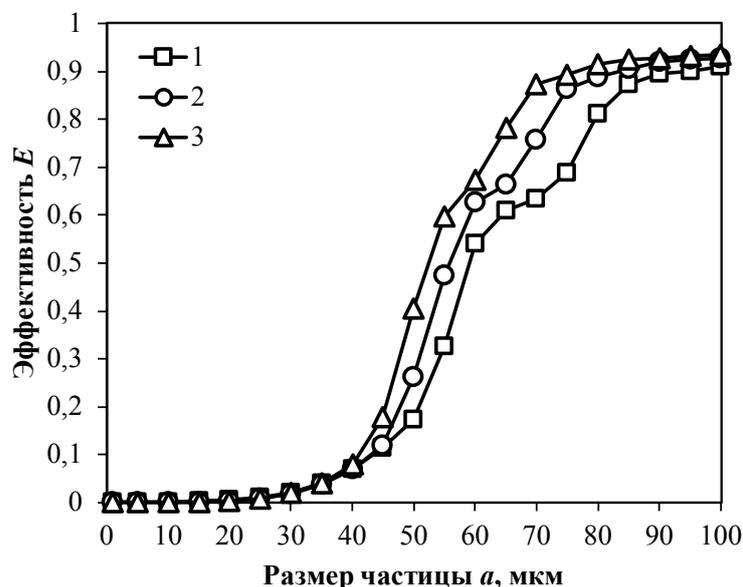


Рис. 2 – График зависимости эффективности устройства от дисперсности частиц при различной начальной скорости газовой смеси W , м/с: 1 – 8; 2 – 12; 3 – 16 ($h_1 = 58$ мм; $h_2 = 5$ мм)

Увеличение высоты щелей с 58 до 61 мм и уменьшение расстояния от пластины до щелей с 5 до 2 мм приводит к снижению эффективности классификатора как для всего исследуемого диапазона размера частиц. При сепарации частиц силикагеля размером до 40 мкм из газа E в среднем составляет 1,4, 1,3 и 1,4 % при начальной скорости газовой смеси равной 8, 12 и 16 м/с соответственно. Для частиц размером более 40 мкм эффективность классификатора в среднем составляет 60,7, 66,3 и 68,6% при входной скорости газовой смеси равной 8, 12 и 16 м/с соответственно (рис. 3).

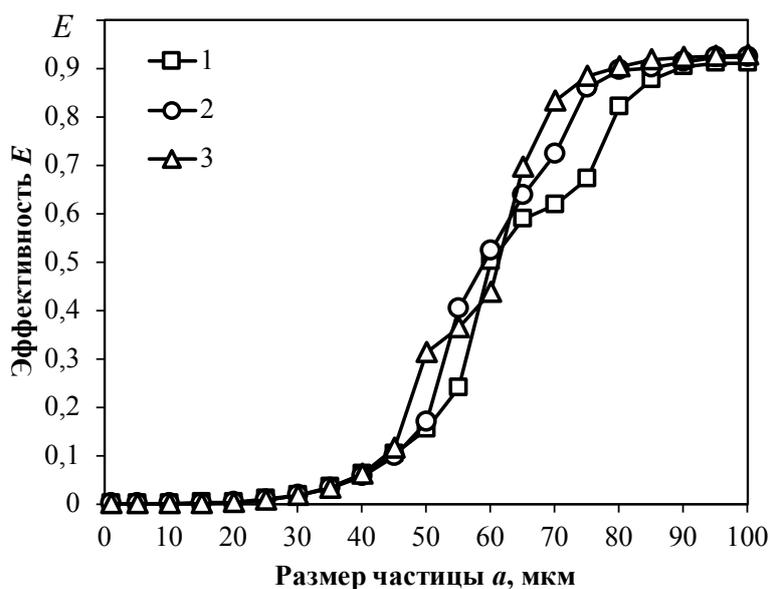


Рис. 3 – График зависимости эффективности устройства от дисперсности частиц при различной начальной скорости газовой смеси W , м/с: 1 – 8; 2 – 12; 3 – 16 ($h_1 = 61$ мм; $h_2 = 2$ мм)

Увеличение высоты щелей с 61 до 62 мм и уменьшение расстояния от них до пластины с 2 до 1 мм практически не влияет на изменение эффективности центробежного устройства. Так, при входной скорости газозвеси равной 8, 12 и 16 м/с эффективность классификатора в среднем равна 1,6, 1,5 и 1,3 % соответственно при размере частиц менее 40 мкм. Для твердых частиц размером выше 40 мкм эффективность аппарата в среднем равна 60,9, 67,2 и 67,1 % при входной скорости газозвеси равной 8, 12 и 16 м/с (рис. 4).

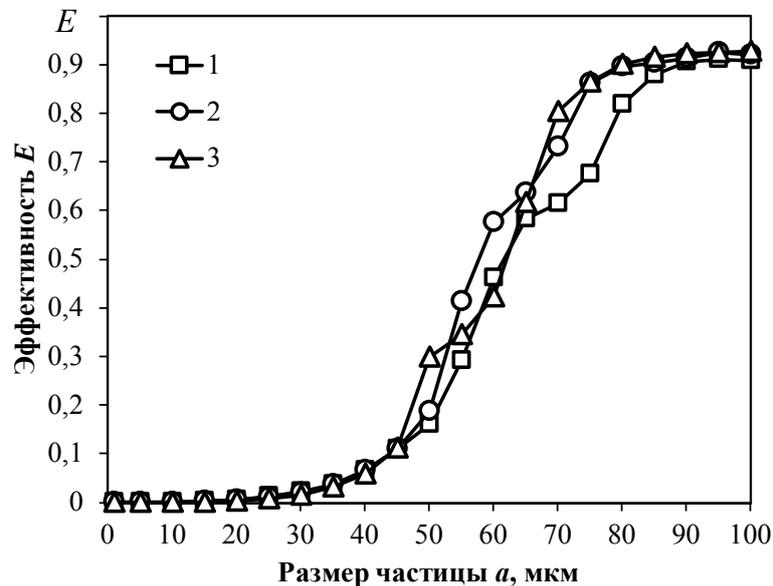


Рис. 4 – График зависимости эффективности устройства от дисперсности частиц при различной начальной скорости газозвеси W , м/с: 1 – 8; 2 – 12; 3 – 16 ($h_1 = 62$ мм; $h_2 = 1$ мм)

Таким образом, центробежный классификатор подходит для разделения мелкодисперсных частиц силикагеля. Полученные значения эффективности классификатора в зависимости от размера частиц при различных геометрических параметрах показали, что аппарат способен эффективно отсекал фракцию частиц размером до 30–40 мкм. При этом скорость газозвеси на входе в классификатор слабо влияет на эффективность улавливания частиц, что является достоинством аппарата, т.к. внезапное изменение скорости газа в технологической линии предприятия не нарушит процесс фракционирования частиц.

На основе полученных результатов делаются следующие выводы:

1. Центробежный классификатор рентабельно использовать для разделения частиц с критическим размеров равным 30–40 мкм. Наибольшая эффективность улавливания частиц размером менее 40 мкм составляет 7,9 %, более 40 мкм – в среднем составляет 61,8 %.

2. Гидравлическое сопротивление центробежного классификатора составляет 506 до 2145 Па при входной скорости газозвеси равной от 8 до 16 м/с.

3. В общем случае увеличение высоты щелей прямоугольной формы и уменьшение расстояния от пластины до данных щелей приводит к снижению эффективности улавливания частиц центробежным классификатором.

Список литературы

1. Зинуров В.Э. Технично-экономическое обоснование применения мультивихревого классификатора-сепаратора / В. Э. Зинуров, А. Р. Галимова, И. Г. Ахметова, И. Н. Мадышев // Вестник Самарского государственного экономического университета. – 2022. – № 7. – С. 33-44.
2. Опимах Е.А. применение силикагеля / Е. А. Опимах, О. Н. Каныгина // Точная наука. – 2018. – № 21. – С. 11-13.
3. Зинуров В.Э. Промышленные испытания фракционирования сыпучего материала в мультивихревом классификаторе-сепараторе / В. Э. Зинуров, А. В. Дмитриев, О. С. Дмитриева, К. С. Моисеева // Вестник Технологического университета. – 2022. – Т. 25. – № 4. – С. 58-63.

4. *Зинуров, В.Э.* Экспериментальное определение гидравлического сопротивления упрощенной модели мультивихревого классификатора с соосно расположенными трубами / В. Э. Зинуров, И. Н. Мадышев, А. А. Каюмова, К. С. Моисеева // *Ползуновский вестник*. – 2022. – № 2. – С. 108-116.
5. *Зинуров, В.Э.* Повышение эффективности аспирационных систем при обработке крахмалистого сырья / В. Э. Зинуров, А. В. Дмитриев, Р. Р. Мубаракшина // *Ползуновский вестник*. – 2020. – № 2. – С. 18-22.
6. *Zinurov, V.E.* Classification of bulk material from the gas flow in a device with coaxially arranged pipes / V. E. Zinurov, A. V. Dmitriev, M. A. Ruzanova, O. S. Dmitrieva // *E3S Web of Conferences*. – 2020. – V. 193. – P. 01056.
7. *Zinurov, V.E.* Influence of process parameters on capturing efficiency of rectangular separator / V. E. Zinurov, A. V. Dmitriev, V. V. Kharkov // Paper presented at the Proceedings of ITNT 2020 - 6th IEEE International Conference on Information Technology and Nanotechnology. – 2020. P. 1-4.
8. *Зинуров, В.Э.* Газодинамика проточной части классификатора с соосно расположенными трубами / В. Э. Зинуров, А. В. Дмитриев, И. И. Насырова, О. С. Дмитриева // *Вестник Технологического университета*. – 2022. – Т. 25. – № 4. – С. 71-76.
9. *Касаткин, А.Г.* Основные процессы и аппараты химической технологии: учебник для вузов: учебник для студентов химико-технологических специальностей вузов / А. Г. Касаткин; А. Г. Касаткин. – Изд. 15-е, стер. – Москва: Альянс, 2009. – 750 с.
10. *Трофимченко, В.Н.* Совершенствование процесса классификации порошковых материалов в циркуляционном сепараторе / В. Н. Трофимченко, С. И. Ханин, О. С. Мордовская // *Механизация строительства*. – 2015. – № 8(854). – С. 43-45.
11. *Зинуров, В.Э.* Разработка классификатора с соосно расположенными трубами для разделения сыпучего материала на основе силикагеля / В. Э. Зинуров, И. Н. Мадышев, А. Р. Ивахненко, И. В. Петрова // *Ползуновский вестник*. – 2021. – № 2. – С. 205-211.
12. *Зинуров, В.Э.* Влияние диаметра отверстий в пластине классификатора-сепаратора на эффективность фракционирования мелкодисперсного силикагеля / В. Э. Зинуров // *Вестник Технологического университета*. – 2023. – Т. 26. – № 5. – С. 33-38.
13. *Зинуров, В.Э.* Численное моделирование газодинамики в центробежном классификаторе / В. Э. Зинуров, А. В. Дмитриев, Н. Ф. Сахибгареев, Д. Н. Латыпов, М. Г. Гарипов // *Вестник технологического университета*. – 2021. – Т. 24. – № 12. – С. 128-132.
14. *Zinurov, V.E.* Numerical simulation of pressure loss in a classifier with coaxial pipes / V. E. Zinurov, V. V. Kharkov, I. N. Madyshev // *Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*. – 2022. – No. 10-1. – P. 173-181.
15. Двухмерная модель фракционирования мелкодисперсных сыпучих материалов на ситовых тканях / В. А. Огурцов, Е. И. Крупнов, А. П. Алешина [и др.] // *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. – 2021. – № 1(391). – С. 133-137.
16. *Тошов, Б.Р.* Кинематические параметры движения твёрдых частиц в сепарационном блоке воздушно-инерционного классификатора / Б. Р. Тошов, Ш. С. Пардаева // *Наука, образование и культура*. – 2018. – № 6(30). – С. 9-12.
17. *Кирилов, И.В.* Способы повышения эффективности работы центробежных сепараторов для классификации порошков / И. В. Кирилов, М. А. Семернина // *Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, Белгород, 01–30 мая 2015 года / Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова*. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2015. – С. 1345-1349.
18. *Тукмаков, А.Л.* Пневматическая сепарация фракций полидисперсной газозвеси в низкоскоростном потоке / А. Л. Тукмаков, В. В. Харьков, А. А. Ахунов // *Инженерно-физический журнал*. – 2022. – Т. 95, № 4. – С. 918-924.