



ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК

ISSN 2072-8921

ФГБОУ ВО
АЛТАЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. И. И. ПОЛЗУНОВА

*«Посвящается 255-летию создания
паровой машины И. И. Ползунова»*

№ 2
2021

Ползуновский ВЕСТНИК

ISSN 2072-8921

Свидетельство о регистрации издания
ПИ № ФС 77-75624
выдано Федеральной службой по надзору в сфере
связи, информационных технологий и массовых
коммуникаций 19.04.2019 г.

Префикс DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921
ЖУРНАЛ ИЗДАЕТСЯ С ОКТЯБРЯ 2002 г.

Периодичность – 4 номера в год

№ 2 2021 г.

Научный журнал
входит в перечень ВАК

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Гурьев Алексей Михайлович
д.т.н., проф. АлтГТУ (г. Барнаул)

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Маюрникова Лариса Александровна
д.т.н., проф., зав. каф. «Технология и организация
общественного питания» КемГУ (г. Кемерово)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Сакович Г. В., академик РАН (г. Бийск)
Бессон Р., проф., директор Международного российско-французского центра инноваций и трансфера технологий (г. Безансон, Франция)
Мэй Шунчи, проф., декан УТУ (г. Ухань, Китай)
Лыгденов Б. Д., д.т.н., проф. УТУ (г. Ухань, Китай)
Дебердеев Т. Р., д.т.н., зав. каф. «Технологии переработки полимеров и композиционных материалов» КНИТУ (г. Казань)
Ильясов С. Г., д.х.н., заместитель директора по научной работе ИПХЭТ СО РАН (г. Бийск)
Блазнов А. Н., д.т.н., заведующий лабораторией материаловедения и минерального сырья ИПХЭТ СО РАН, (г. Бийск)
Петров Е. А., д.т.н., проф., декан инженерного спецфакультета БТИ (г. Бийск)
Деев В. Б., д.т.н., проф., главный научный сотрудник Инжинирингового центра «Литейные технологии и материалы» НИТУ МИСиС (г. Москва)
Батаев В. А., д.т.н., проф. НГТУ (г. Новосибирск)
Коновалов С. В., д.т.н., проф., зав. каф. «Технологии металлов и авиационного материаловедения» Самарского университета (г. Самара)
Щетинин М. П., д.т.н., проф., проректор по научной работе МГУПП (г. Москва)
Тамова М. Ю., д.т.н., проф., зав. каф. «Общественного питания и сервиса» КубГТУ (г. Краснодар)
Попов В. Г., д.т.н., доц., зав. каф. «Товароведение и технологии продуктов питания» ТИУ (г. Тюмень)
Майоров А. А., д.т.н., проф., главный научный сотрудник ФГБНУ ФАНЦА (г. Барнаул)
Новоселов С. В., д.т.н., доц. АлтГТУ (г. Барнаул)
Коньшин В. В., д.т.н., проф., зав. каф. «Химическая технология» АлтГТУ (г. Барнаул)
Романов А. С., д.т.н., проф., зам. директора ООО «Балтийский пекарский дом» (г. Калининград)
Алтухов И. В., д.т.н., доц. ИРГАУ (г. Иркутск)
Гуринович Г. В., д.т.н., проф., зав. каф. «Технология продуктов питания животного происхождения» КемГУ (г. Кемерово)
Ананьева Е. С., к.т.н., доц. АлтГТУ (г. Барнаул)

ОТВЕТСТВЕННЫЙ ЗА ВЫПУСК

Стопорева Татьяна Александровна,
к.т.н., начальник ОРПД АлтГТУ (г. Барнаул)

ТЕХНИЧЕСКИЙ РЕДАКТОР

Проскура Николай Анатольевич,
редактор АлтГТУ (г. Барнаул)

УЧРЕДИТЕЛИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ «АЛТАЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. И. И. ПОЛЗУНОВА»

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ ИНСТИТУТ
ВОДНЫХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

ИНДЕКС: 73664 (Урал-Пресс)

АДРЕС РЕДАКЦИИ И ИЗДАТЕЛЯ

656038, г. Барнаул, пр. Ленина 46, Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова (АлтГТУ),
тел. (3852) 29-09-46, e-mail: polz_journal@mail.ru, Стопорева Т. А.

Сайт журнала <https://polzvestnik.altstu.ru>

Дата выхода в свет 30.06.2021 г.

Цена 600 рублей.



EDITOR-IN-CHIEF**Aleksey Guriev**Doctor of Technical Sciences, professor at
ASTU, Barnaul, Russia**DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF****Larisa Mayurnikova**Doctor of Technical Sciences, professor at
KemSU, Kemerovo, Russia**EDITORIAL BOARD**

Gennady Sakovich, RAS academician, Biysk, Russia
Raimond Besson, professor, Besancon, France
Mei Shunqi, professor, WTU, Wuhan, China
Burial Lygdenov, Doctor of Technical Sciences, WTU, Wuhan, China
Timur Deberdev, Doctor of Technical Sciences, KNRTU, Kazan, Russia
Sergey Iliysov, Doctor of Chemical Sciences, IPCET SB RAS, Biysk, Russia
Aleksey Blaznov, Doctor of Technical Sciences, IPCET SB RAS, Biysk, Russia
Evgeny Petrov, Doctor of Technical Sciences, BTI, Biysk, Russia
Vladislav Deev, Doctor of Technical Sciences, NUST MISIS, Moscow, Russia
Vladimir Bataev, Doctor of Technical Sciences, NSTU, Novosibirsk, Russia
Sergei Konovalov, Doctor of Technical Sciences, Samara University, Samara, Russia
Mikhail Shchetinin, Doctor of Technical Sciences, MSUFP, Moscow, Russia
Maya Tamova, Doctor of Technical Sciences, KubSTU, Krasnodar, Russia
Vladimir Popov, Doctor of Technical Sciences, TIU, Tyumen, Russia
Aleksandr Mayorov, Doctor of Technical Sciences, FASCA, Barnaul, Russia
Sergei Novoselov, Doctor of Technical Sciences, ASTU, Barnaul, Russia
Vadim Konshin, Doctor of Technical Sciences, ASTU, Barnaul, Russia
Aleksandr Romanov, Doctor of Technical Sciences, professor, LLC "Baltisky Bakery House",
Kaliningrad, Russia
Igor Altukhov, Doctor of Technical Sciences, Associate professor, IrSAU, Irkutsk, Russia
Galina Gurinovich, Doctor of Technical Sciences, professor, KemSU, Kemerovo, Russia
Elena Ananieva, Candidate of Technical Sciences, Associate professor, ASTU, Barnaul, Russia

ISSUE MANAGER**Tatiana Stoporeva**Candidate of Technical Sciences, ASTU,
Barnaul, Russia**TECHNICAL EDITOR****Nikolay Proskura**

Editor, ASTU, Barnaul, Russia

FOUNDERS

POLZUNOV ALTAI STATE TECHNICAL UNIVERSITY (ASTU)

INSTITUTE FOR WATER AND ENVIRONMENTAL PROBLEMS OF THE SIBERIAN BRANCH OF THE
RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES (IWEP SB RAS)**PUBLISHER**

Polzunov Altai State Technical University, phone.(3852) 29-09-46, e-mail: polz_journal@mail.ru

ADDRESS: Prospect Lenina 46, office 113a GK, Barnaul, 656038, Russia**WEBSITE:** <https://polzvestnik.altstu.ru>

Signed for printing 30.06.2021





Научная статья
05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий (технические науки)
УДК: 621.928.6
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.02.029

РАЗРАБОТКА КЛАССИФИКАТОРА С СООСНО РАСПОЛОЖЕННЫМИ ТРУБАМИ ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ СИЛИКАГЕЛЯ

Вадим Эдуардович Зинуров ¹, Ильнур Наилович Мадышев ²,
Алина Рамисовна Ивахненко ³, Ирина Владимировна Петрова ⁴

^{1, 2, 3, 4} Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

¹ vadd_93@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1380-4433>

² ilnyr_91@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9513-894X>

³ alina@ivakhnenko.su, <https://orcid.org/0000-0002-3414-813X>

⁴ kzn.petrova.ira@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7787-2155>

Аннотация. Важной задачей при измельчении сыпучего материала на основе силикагеля в мельнице является его дальнейшее разделение на две фракции с граничным зерном, равным 30 мкм. В работе рассмотрены наиболее распространенные классификаторы, применяемые в промышленности для разделения сыпучих материалов. Их применение для решения поставленной задачи невозможно вследствие низкой селективности. Авторами работы предложена конструкция классификатора с соосно расположенными трубами. Представлена трехмерная модель классификатора. Описан механизм разделения сыпучего материала на различные фракции. Новизной классификатора является его конструктивное оформление, позволяющее создать устойчивую вихревую структуру в межтрубном пространстве с высокими значениями центробежных сил. При этом каждое завихрение дополнительно ускоряет соседние. В работе представлена методика расчета, позволяющая собрать классификатор из цилиндрических труб любых диаметров. Рассмотрено несколько вариаций создания классификатора из труб различного диаметра по ГОСТу 3262 – 75. При этом показано, что при увеличении области в межтрубном пространстве, т. е. увеличении расстояния между внешней и внутренней цилиндрическими трубами, количество завихрений уменьшается, а их диаметр увеличивается. Уменьшение ширины щели приводит к увеличению количества завихрений в межтрубном пространстве. Отсутствие движущихся частей, простота изготовления и применения, высокая селективность являются главными достоинствами разработанного классификатора с соосно расположенными трубами.

Ключевые слова: классификатор, разделение сыпучего материала, силикагель, классификация, фракционирование порошка, мелкодисперсные частицы, циклон, сепаратор, мелкодисперсный порошок, центробежный классификатор, аэродинамическая классификация.

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МК-2710.2021.4.

Для цитирования: Зинуров В. Э., Мадышев И. Н., Ивахненко А. Р., Петрова И. В. Разработка классификатора с соосно расположенными трубами для разделения сыпучего материала на основе силикагеля // Ползуновский вестник. 2021. № 2. С. 205–211. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.02.029.

Original article

DEVELOPMENT OF A CLASSIFIER WITH COAXIALLY AR-RANGED PIPES FOR THE SEPARATION OF BULK MATERIAL BASED ON SILICA GEL

Vadim E. Zinurov ¹, Ilnur N. Madyshev ², Alina R. Ivakhnenko ³, Irina V. Petrova ⁴

^{1, 2, 3, 4} Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

¹ vadd_93@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1380-4433>

² ilnyr_91@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9513-894X>

³ alina@ivakhnenko.su, <https://orcid.org/0000-0002-3414-813X>

⁴ kzn.petrova.ira@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7787-2155>

Abstract. An important task when grinding bulk material based on silica gel in a mill is its further separation into two fractions with a boundary grain of 30 microns. The paper considers the most common classifiers used in industry for the separation of bulk materials. Their use to solve the problem is impossible, due to the low selectivity. The authors of the work proposed the design of the classifier with coaxially arranged pipes. A three-dimensional model of the classifier is presented. The mechanism of separation of bulk material into different fractions is described. The novelty of the classifier is its design, which allows creating a stable vortex structure in the inter-tube space with high values of central forces. At the same time, each swirl additionally accelerates the neighboring ones. The paper presents a calculation method that allows you to assemble a classifier from cylindrical pipes of any diameter. Several variations of creating a classifier from pipes of different diameters according to GOST 3262 – 75 are considered. At the same time, it is shown that with an increase in the area in the inter-tubular space, i.e., by increasing the distance between the outer and inner cylindrical pipes, the number of swirls decreases, and their diameter increases. A decrease in the width of the gap leads to an increase in the number of vortices in the inter-tube space. The absence of moving parts, ease of manufacture and application, and high selectivity are the main advantages of the developed classifier with coaxially arranged pipes

Keywords: classifier, bulk material separation, silica gel, classification, powder fractionation, fine particles, cyclone, separator, fine powder, centrifugal classifier, aerodynamic classification.

Acknowledgements: the study was supported by the grant of the President of the Russian Federation No. MK-2710.2021.4.

For citation: Zinurov, V. E., Madyshev, I. N., Ivakhnenko, A. R. & Petrova, I. V. (2021). Development of a classifier with coaxially arranged pipes for the separation of bulk material based on silica gel. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 205-211. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.02.29.

С каждым годом в химической, нефтехимической и др. отраслях промышленности модернизируются и усложняются технологические процессы, что приводит, с одной стороны, к повышению их эффективности, с другой стороны, – к усложнению их реализации: требуются новые тонкодисперсные порошки. Например, в качестве основного слоя в адсорберах в процессе одновременной осушки и отбензинивания природного газа на установках подготовки газа к транспорту применяется мелкодисперсный порошок на основе силикагеля. Его изготовление на промышленных предприятиях осуществляется с использованием мельниц, которые дробят сыпучий материал. Их недостатком является получение частиц с большим фракционным разбросом [1–4]. Для разделения сыпучего

материала на требуемые фракции используются классификаторы, например, циклонные сепараторы, в которых разделение сыпучего материала осуществляется за счет действия центробежных сил. Первая часть сыпучего порошка из бункера циклона в виде уловленного материала возвращается в мельницу на повторное измельчение, вторая часть мелкодисперсного порошка, диспергированная в газовом потоке из выходного патрубка циклона, подается в рукавные фильтры, в которых мелкодисперсные частицы улавливаются и далее извлекается в виде конечного продукта. Недостатком применения циклонных сепараторов для фракционирования сыпучего материала на основе силикагеля является их низкая селективность, приводящая к частичной потере ресурсов при повторной транс-

РАЗРАБОТКА КЛАССИФИКАТОРА С СООСНО РАСПОЛОЖЕННЫМИ ТРУБАМИ ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ СИЛИКАГЕЛЯ

портировке материала на измельчение в мельницу из циклона и дополнительным энергетическим затратам. Поэтому разработка нового устройства или усовершенствование классической конструкции классификатора для повышения селективности фракционирования сыпучего материала на основе силикагеля является актуальной.

Рассмотрим наиболее распространенные классификаторы, используемые в промышленности. Следует отметить, что методы классификации разделяются на сухие и мокрые. Наиболее распространенной является сухая классификация, которая условно разделяется на классификацию рассева и аэродинамическую классификацию [5–8].

Первая является наиболее простой и предназначена для фракционирования частиц размером более 40 мкм. Такие устройства используют ситовую сетку, через которую пропускается порошок. Если размер частиц больше, чем поры сетки, то они остаются на ней. Наиболее современными являются вибросита и виброгрохота.

Аппараты, работающие по принципу аэродинамической классификации, подразделяются на гравитационные камеры и центробежные классификаторы. В гравитационных камерах разделение сыпучего материала происходит за счет взаимодействия сил сопротивления газового потока и силы тяжести частиц. К достоинствам гравитационных камер можно отнести простоту конструкции, отсутствие движущихся частей и низкие потери давления. Однако применение гравитационных камер для осаждения в них мелкодисперсных порошков с размером частиц менее 30–50 мкм не представляется возможным, так как масса данных частиц крайне мала. Наиболее предпочтительными аппаратами для разделения мелкодисперсного сыпучего материала являются центробежные классификаторы, в которых при вращательном движении газового потока с частицами возникают центробежные силы, под действием которых частицы отбрасываются к внутренним стенкам корпуса устройства и оседают в бункере. К недостаткам центробежных классификаторов относят высокое гидравлическое сопротивление. В некоторых случаях для повышения селективности конструкции центробежных классификаторов оснащают дополнительными сепарационными зонами, завихрителями различной геометрии и другими элементами, что приводит также к росту потери давления в аппарате [9–12]. С другой стороны, для достижения высокой селективности классификации сыпучих порошков для

каждой отдельной технологической линии требуется разработка нового или усовершенствование классического аппарата, так как параметры частиц материала, который необходимо фракционировать: диаметр, плотность, концентрация и др., практически всегда различные. Таким образом, для классификации сыпучего материала на основе силикагеля с граничным зерном, равным 30 мкм, необходима разработка устройства, работающего на основе действия центробежных сил.

Целью данной работы является разработка классификатора с соосно расположенными трубами для разделения сыпучего материала на основе силикагеля с граничным зерном, равным 30 мкм. При этом объемная доля уловленного материала размером менее 30 мкм должна составлять не более 2 % от общей его доли.

Авторами работы предлагается конструкция классификатора с соосно расположенными трубами, представленная на рисунке 1 [13]. Устройство представляет собой конструкцию труба в трубе, имеющую входной 1 и выходной 2 патрубки. Целостность конструкции обеспечивается за счет сварки внешней и внутренней трубы в двух местах: в верхней области и в месте контакта двух труб с решеткой 3, в которой проделаны круглые отверстия. В нижней части внутренней цилиндрической трубы вырезаны прямоугольные щели 4 и отверстие 5. Для сбора уловленного материала используется бункер 7 (рисунок 1).

Классификацию сыпучего материала на основе силикагеля в классификаторе с соосно расположенными трубами можно описать следующим образом: измельченный материал, диспергированный в газовом потоке, подается в устройстве через входной патрубков 1, далее движется прямолинейно в нижнюю часть устройства по внутренней цилиндрической трубе до плоскости, на которой начинают располагаться прямоугольные щели 4, после чего основная часть газового потока с частицами в равных долях осесимметрично распределяется по щелям 4. При этом оставшаяся часть газового потока продолжает прямолинейное движение и направляется к отверстию 5. При прохождении газа с частицами через прямоугольные щели 4 поток разделяется на 2 равные струи, каждая из которых под определенным углом движется из щели в противоположном направлении относительно друг друга в сторону внутренней стенки внешней цилиндрической трубы 6. При достижении внутренней стенки корпуса устройства 6 струями газа, они зеркально отражаются, образуя при этом устойчивые завихрения в межтрубном про-

пространстве и продолжают движение в верхнюю часть устройства (рисунок 2).

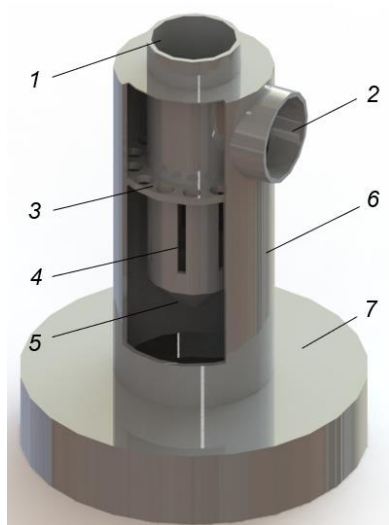


Рисунок 1 – Трехмерная модель классификатора с соосно расположенными трубами (вид с разрезом): 1 – входной патрубок, 2 – выходной патрубок, 3 – решетка с круглыми отверстиями, 4 – прямоугольные щели, 5 – отверстие в нижней части внутреннего цилиндра, 6 – внешний корпус классификатора, 7 – бункер

Figure 1 - Three-dimensional model of the classifier with coaxially arranged pipes (section view): 1 - inlet pipe, 2 - outlet pipe, 3 - grid with round openings, 4 - rectangular slots, 5 - hole in the lower part of the inner cylinder, 6 - external classifier housing, 7 - hopper

Проделанные круглые отверстия в решетке 3 позволяют поддерживать структуру завихрений в межтрубном пространстве. При вращении вихрей возникают центробежные силы, под действием которых частицы силикагеля размером более 30 мкм отбрасывают к стенкам и падают в бункер 7 классификатора. Следует отметить, что часть газового потока с частицами, прошедшими через отверстие 5, осесимметрично разворачивается и движется в область межтрубного пространства. При этом газовый поток изменяет свое направление на 180 °, вследствие чего наиболее крупные частицы выпадают из потока и оседают в бункере 7. Далее газовый поток с мелкодисперсными частицами силикагеля размером менее 30 мкм выходит из классификатора из выходного патрубка 2 (рисунок 1). Ранее проведенные исследования в программном комплексе ANSYS Fluent показали, что применение данного классификатора позволяют решить поставленную задачу [14].

Следует отметить, что новизной пред-

ставленного классификатора является конструктивное оформление устройства, позволяющее создать устойчивую вихревую структуру в межтрубном пространстве с высокими значениями центробежных сил, в которой осуществляется сепарация частиц силикагеля из газового потока размером более 30 мкм (рисунок 2). При этом каждое завихрение имеет точки контакта с соседними завихрениями, в которых вектора скорости сонаправлены, что позволяет завихрениям дополнительно ускорять друг друга. Особый интерес представляет определение зависимостей между конструктивными параметрами классификатора, что позволит изготавливать устройство различных размеров, при этом сохраняя устойчивую вихревую структуру в межтрубном пространстве.

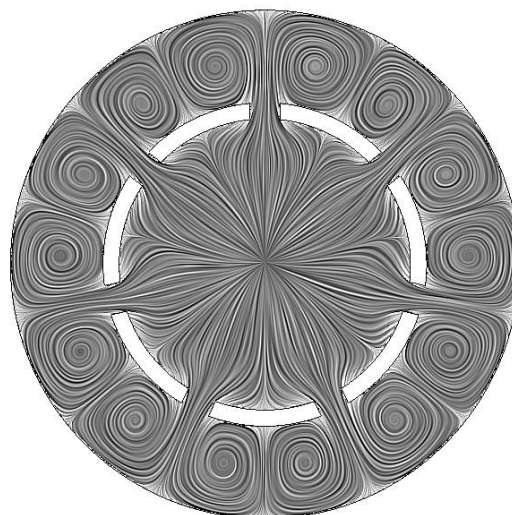


Рисунок 2 – Образование устойчивой вихревой структуры газового потока в межтрубном пространстве классификатора с соосно расположенными трубами (вид сверху)

Figure 2 - Formation of a stable vortex structure of the gas flow in the inter-tube space of the classifier with coaxially spaced pipes (top view)

Построение методики расчета конструктивных параметров классификатора базируется на том, что в пространстве между трубами должны образовываться завихрения. При этом, как было отмечено ранее, завихрения должны образовываться таким образом, чтобы каждое имело точки контакта с соседними завихрениями, чтобы осуществлялось дополнительное взаимное ускорение. Вследствие этого, количество завихрений n_s в классификаторе можно определить по формуле:

$$n_s = \frac{l_{cp}}{d_0}, \quad (1)$$

РАЗРАБОТКА КЛАССИФИКАТОРА С СООСНО РАСПОЛОЖЕННЫМИ ТРУБАМИ ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ СИЛИКАГЕЛЯ

где l_{cp} – длина вспомогательной окружности, на которой располагаются центры завихрений, мм; d_0 – диаметр завихрения, мм (рисунок 3).

При этом рассчитанное количество завихрений n_s округляется до целого числа в меньшую сторону.

Длину вспомогательной окружности можно рассчитать по формуле (2):

$$l_{cp} = \frac{\pi(D_{вн} + d_n)}{2}, \quad (2)$$

где $D_{вн}$ – внутренний диаметр внешней цилиндрической трубы, мм; d_n – наружный диаметр внутренней цилиндрической трубы, мм.

Диаметр одного завихрения вычисляется по следующему выражению:

$$d_0 = \frac{D_{вн} - d_n}{2}. \quad (3)$$

Ширина прямоугольной щели определяется по формуле (4):

$$h_1 = \frac{\pi d_n \alpha}{360^\circ}, \quad (4)$$

где α – угол щели относительно центральной точки классификатора в плоскости, на которой они располагается.

Угол щели можно определить по формуле (5):

$$\alpha = \frac{360^\circ}{n_s}. \quad (5)$$

По приведенным формулам (1–5) можно рассчитать ширину щелей h_1 при изготовлении классификатора из труб различных диаметров, для создания устойчивой вихревой структуры в межтрубном пространстве.

В качестве примера рассмотрим создание классификатора из труб по ГОСТу 3262-75. Примем наружный диаметр внутренней трубы d_n равным 48 мм в качестве постоянного значения. В ходе расчетов рассмотрим влияние изменения внутреннего диаметра внешней трубы $D_{вн}$ от 53 до 131 мм и ширины щели при ее уменьшении на 10, 20 и 30 % на образование количества завихрений в межтрубном пространстве. Следует отметить, что для построения линии 1 ширина щели была вычислена по формулам (1–5), для построения линий 2, 3 и 4 расчет производился в обратном порядке (рисунок 3).

Расчетные данные показывают, что при использовании труб диаметром от 53 до 131 мм в качестве внешнего корпуса классификатора количество завихрений n_s будет составлять от 10 до 90. При этом уменьшение щели приводит к росту количества завихрений. При сужении щели на 10, 20 и 30 % количество завихрений в среднем увеличивается на 10, 11 и 12,5 % соответственно (рисунок 3).

В том случае, если за постоянный параметр принять наружный диаметр внешней цилиндрической трубы, равный 114 мм с толщиной стенки 4,5 мм, то можно получить зависимость наружного диаметра внутренней цилиндрической трубы от количества завихрений в межтрубном пространстве, представленную на рисунке 4. При этом было рассчитано несколько вариантов с уменьшением ширины щели на 10 % (рисунок 4).

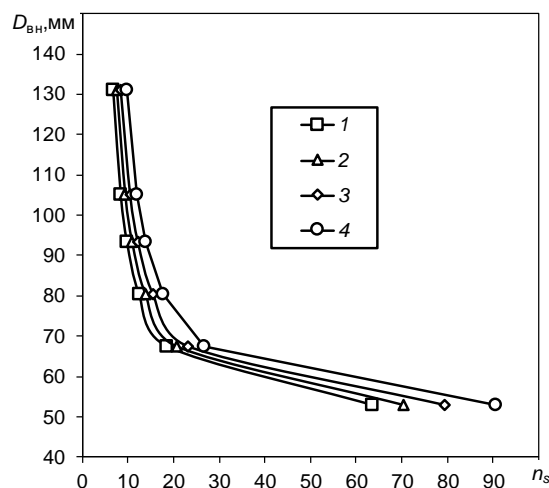


Рисунок 3 – Зависимость внутреннего диаметра внешней трубы от количества завихрений в межтрубном пространстве при различной ширине щели h_1 , мм: 1 – h_1 , 2 – $0,9h_1$, 3 – $0,8h_1$, 4 – $0,7h_1$

Figure 3 - Dependence of the internal diameter of the external pipe on the number of vortices in the inter-pipe space at different slot widths h_1 , mm: 1 – h_1 , 2 – $0,9h_1$, 3 – $0,8h_1$, 4 – $0,7h_1$

Расчетные данные показывают, что по мере увеличения наружного диаметра внутренней цилиндрической трубы при постоянном диаметре внешней трубы, количество завихрений увеличивается. При уменьшении ширины щели на 10, 20 и 30 % количество завихрений возрастает в среднем на 16, 26 и 44 % соответственно (рисунок 4).

Таким образом, представленные расчетные зависимости показывают, что классификатор может быть собран практически в каждом слесарном цеху промышленного предприятия с использованием цилиндрических труб любых диаметров. Однако в зависимости от количества завихрений в межтрубном пространстве будет варьироваться центробежная сила, влияющая на сепарацию частиц из газового потока, что требует дополнительных теоретических расчетов. Поэтому в ближайшей перспективе методика расчета классификатора с соосно расположенными трубами будет дополнена зависимостями между

конструктивными, технологическими и теплофизическими параметрами.

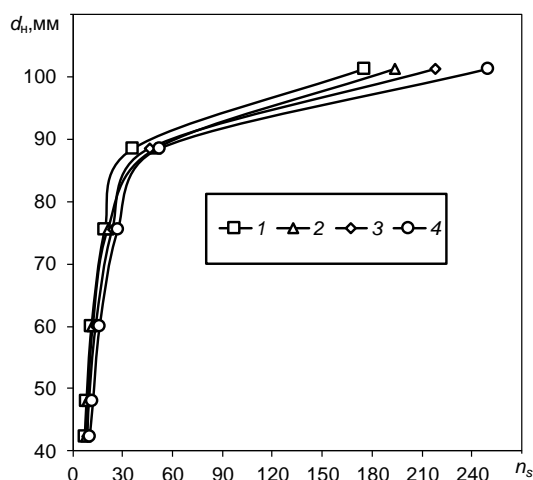


Рисунок 4 – Зависимость наружного диаметра внутренней трубы от количества завихрений в межтрубном пространстве при различной ширине щели h_1 , мм: 1 – h_1 , 2 – $0,9h_1$, 3 – $0,8h_1$, 4 – $0,7h_1$

Figure 4 - Dependence of the outer diameter of the inner pipe on the number of vortices in the inter-pipe space at different slot widths h_1 , mm: 1 – h_1 , 2 – $0,9h_1$, 3 – $0,8h_1$, 4 – $0,7h_1$

На основе проведенных исследований можно сделать следующие выводы: 1) в работе представлена конструкция классификатора с соосно расположенными трубами для разделения сыпучего материала на основе силикагеля; 2) новизной конструкции является конструктивное оформление устройства, позволяющее создать устойчивую вихревую структуру в межтрубном пространстве с высокими значениями центробежных сил. При этом каждое завихрение дополнительно ускоряет соседние; 3) представлена методика расчета, позволяющая собрать классификатор из цилиндрических труб любых размеров. При этом будет создана устойчивая вихревая структура в межтрубном пространстве; 4) рассмотрено несколько вариаций создания классификатора из труб различного диаметра по ГОСТу 3262-75. При этом показано, что при увеличении области в межтрубном пространстве, т. е. увеличении расстояния между внешней и внутренней цилиндрическими трубами, количество завихрений уменьшается, а их диаметр увеличивается. В данном случае при постоянной входной скорости газового потока в устройство центробежная сила будет уменьшаться вследствие увеличения радиуса вихрей. Также показано, что уменьшение ширины щели приводит к увеличению количества завихрений в межтрубном

пространстве. Отсутствие движущихся частей, простота изготовления и применения, высокая селективность являются главными достоинствами разработанного классификатора с соосно расположенными трубами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Солодовников Д.Н., Ханин С.Н., Воронцов 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.
3. Вайтехович П.Е., Семененко Д.В. Эффективность измельчения в горизонтальной планетарной мельнице // Химическая промышленность сегодня. 2012. № 8. С. 49–53.
4. Гарабажиу А.А., Мурог В.Ю. Физическое моделирование процессов измельчения и классификации сыпучих материалов в роторно-центробежной мельнице // Химическая промышленность. 2004. № 2. С. 36–45.
5. Подоляко В.И., Тарасов Б.Т. Совершенствование процесса воздушной классификации проб зерна // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2010. Т. 63. № 1. – С. 61–66.
6. Рыбалко Р.И., Гуцин О.В. Исследования процессов аэродинамической классификации сыпучих материалов в двухстадийном сепараторе // Интерстроймех-2016 (International building technics-2016). 2016. С. 129–136.
7. Дмитриев А.В., Зинуров В.Э., Дмитриева О.С., Харьков В.В. Исследование влияния конструктивных и физических параметров на структуру движения газового потока в прямоугольном сепараторе // Вестник технологического университета. 2020. Т. 23. № 3. С. 85–88.
8. Шуляк В.А., Киркор М.А. Центробежная классификация пищевых порошков // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2005. № 2–3. С. 91–93.
9. Ширинова Д.Б. Классификация полидисперсного порошка молебденита // Евразийский научный журнал. 2016. № 2. С. 127–128.
10. Зинуров В.Э., Дмитриев А.В., Мубаракшина Р.Р. Повышение эффективности аспирационных систем при обработке крахмалистого сырья // Ползуновский вестник. 2020. № 2. С. 18–22.
11. Дроздова О.И., Гребенникова В.А., Мансур Л.М., Шагарова А.А. Моделирование процесса классификации твердых сыпучих материалов // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. 2020. № 4. С. 18–23.
12. The gas flow dynamics in a separator with coaxially arranged pipes / V.E. Zinurov [и др.] // MATEC Web of Conferences. 2020. V. 329. P. 03035. DOI: 10.1051/mateconf/202032903035.
13. Zinurov V.E., Dmitriev A.V., Ruzanova M.A., Dmitrieva O.S. Classification of bulk material from the gas flow in a device with coaxially arranged pipes //

РАЗРАБОТКА КЛАССИФИКАТОРА С СООСНО РАСПОЛОЖЕННЫМИ ТРУБАМИ ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ СИЛИКАГЕЛЯ

MATEC Web of Conferences. 2020. V. 193. P. 01056.
DOI: 10.1051/e3sconf/202019301056.

14. Пылеуловитель-классификатор с соосно расположенными трубами : патент 201604 Российская Федерация : заяв. № 2020128520 : дата заявки 26.08.2020 : опубл. 23.12.2020 / Дмитриев А.В., Дмитриева О.С., Мадышев И.Н., Биккулов Р.Я., Зинуров В.Э.; заявитель и патентообладатель Дмитриев А.В., Биккулов Р.Я. Бюл. № 36. 6 с.

Информация об авторах

В. Э. Зинуров – ассистент кафедры «Теоретические основы теплотехники» Казанского государственного энергетического университета.

И. Н. Мадышев – кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры «Оборудование пищевых производств» Казанского национального исследовательского технологического университета.

А. Р. Ивахненко – студент кафедры «Теоретические основы теплотехники» Казанского государственного энергетического университета.

И. В. Петрова – магистрант кафедры «Теоретические основы теплотехники» Казанского государственного энергетического университета.

REFERENCES

1. Lisitsa, A.V. (2005). Crushing and grinding of ore and nonmetallic materials by free impact in centrifugal impact crushers and mills. *Heavy engineering*, (7), 40-42. (In Russ.).

2. Solodovnikov, D.N., Khanin, S.N., & Voronov, V.P. (2009). Opportunities for improving the efficiency of the process of grinding cement clinker in a pipe mill. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhov*, (1), 76-79. (In Russ.).

3. Vaytehovich, P.E., Semenenko, D.V. (2012). Efficiency of grinding in a horizontal planetary mill. *Chemical industry today*, (8), 49-53. (In Russ.).

4. Garabagiu, A.A. & Murog, V.Yu. (2004). Physical modeling of the processes of grinding and classification of bulk materials in a rotary-centrifugal mill. *Chemical Industry*, (2), 36-45. (In Russ.).

5. Podolyako, V.I. & Tarasov, B.T. (2010). Improvement of the process of air classification of grain samples. *Bulletin of the Altai State Agrarian University*, 63(1), 61-66. (In Russ.).

6. Rybalko, R.I. & Gushchin, O.V. (2016). Studies of the processes of aerodynamic classification of bulk materials in a two-stage separator. *Inter-*

stroyekh-2016 (International building techniques-2016), p. 129-136. (In Russ.).

7. Dmitriev, A.V., Zinurov, V.E., Dmitrieva, O.S. & Kharkiv, V.V. (2020). Research of the influence of structural and physical parameters on the structure of the gas flow motion in a rectangular separator. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*, 23(3), 85-88. (In Russ.).

8. Shulyak, V.A. & Kirkor, M.A. (2005). Centrifugal classification of food powders. *News of Higher educational Institutions. Food technology*, (2-3), 91-93. (In Russ.).

9. Shirinova, D.B. (2016). Classification of poly-disperse molybdenite powder. *Eurasian Scientific Journal*, (2), 127-128. (In Russ.).

10. Zinnurov, V.E., Dmitriev, A.V. & Mubarakshina, R.R. (2020). Improving the efficiency of aspiration systems in the processing of starchy raw materials. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 18-22. (In Russ.).

11. Drozdova, O.I., Grebennikova, V.A., Mansur, L.M. & Shagarova, A.A. (2020). Modeling of the classification process of solid bulk materials. *Energy and resource conservation: industry and transport*, (4), 18-23. (In Russ.).

12. Zinurov, V.E., Dmitriev, A.V., Badretdinova, G.R., Bikkulov, R.Ya. & Madyshev, I.N. (2020). The gas flow dynamics in a separator with coaxially arranged pipes. *MATEC Web of Conferences*, (329), 03035. DOI: 10.1051/matecconf/202032903035.

13. Zinurov, V.E., Dmitriev, A.V., Ruzanova, M.A. & Dmitrieva, O.S. (2020). Classification of bulk material from the gas flow in a device with coaxially arranged pipes. *MATEC Web of Conferences*, (193), 01056, DOI: 10.1051/e3sconf/202019301056.

14. Dmitriev, A.V., Dmitrieva, O.S., Madyshev, I.N., Bikkulov, R.Ya., Zinurov, V.E., applicant and patent holder Dmitriev, A.V. & Bikkulov, R.Ya. (2020). Dust collector-classifier with collocated pipes. *Pat. 201604 Russian Federation, publ. 23.12.2020*. Byul. No. 36. (In Russ.).

Information about the authors

V. E. Zinurov – assistant of the Department "Theoretical foundations of heat engineering" of Kazan State Power Engineering University.

I. N. Madyshev – candidate of technical Sciences, senior researcher of the Department "Equipment for food industry" of Kazan National Research Technological University.

A. R. Ivakhnenko – student of the Department "Theoretical foundations of heat engineering" of Kazan State Power Engineering University.

I. V. Petrova – graduate student of the Department "Theoretical foundations of heat engineering" of Kazan State Power Engineering University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 01.03.2021; одобрена после рецензирования 14.05.2021; принята к публикации 24.05.2021.

The article was submitted to the editorial board on 01 Mar 21; approved after review on 14 May 21; accepted for publication on 24 May 21.