

Конкурс научно-исследовательских и научно-практических работ
на соискание именных стипендий Мэра г. Казани
среди студентов и аспирантов

КОНКУРСНАЯ РАБОТА

на тему:

**«Фракционирование мелкодисперсного материала в
классификаторе с соосно расположенными трубами»**

Исследуемое приоритетное направление:

**Развитие промышленного комплекса, энергетика, энергосбережение и
новые материалы**

Выполнил: 

Аспирант 2 года обучения
Казанский Государственный
Энергетический Университет
Зинуров Вадим Эдуардович

Научный руководитель: 
Дмитриев Андрей Владимирович,
Зав. кафедры «ТОТ» КГЭУ, д.т.н,
доцент

КАЗАНЬ – 2020

Аннотация

Актуальность. В настоящее время практически во всех отраслях промышленности используются мелкодисперсные порошки. От степени их измельчения и распределения размеров зависят свойства продукта, который из них изготовлен. Даже самые высокотехнологичные мельницы при дроблении частиц создают очень широкий спектр их размеров. Разделить по размерам крупные частицы позволяют различные сита, но при классификации мелкодисперсных частиц они не могут эффективно работать. В развитых странах классификаторы мелкодисперсных частиц имеют сложные конструкции, большие габаритные размеры и требуют дорогостоящего обслуживания. Поэтому разработка новых аппаратов для классификации мелкодисперсного материала является актуальной.

Новизна. В работе предложено разработанное устройство – классификатор с соосно расположенными трубами. Новизной работы является разработка и исследование новой конструкции, отличной от других классификаторов, отличающейся высокой селективностью и низкими гидравлическим сопротивлением.

Практическая значимость работы. Данное устройство может быть использовано на многих предприятиях в г. Казани, например, при изготовлении и фракционировании гипсового порошка на предприятии «Казанский гипсовый завод», также устройство может войти в линейку аппаратов, которые изготавливаются на предприятии «Инжехим», для продажи в другие города России и за рубежом.

Выводы. Получены основные формулы, позволяющие изготовить классификатор из труб по ГОСТу, при этом получить требуемую вихревую структуру в межтрубном пространстве. Подобрана модель турбулентности для численного моделирования газодинамика в классификаторе – Transition SST. Потери давления в устройстве составляют не более 400 Па. Проведена успешная апробация аппарата на промышленном предприятии «Салаватский катализаторный завод».

Ключевые слова

Классификация, мелкодисперсные частицы, фракционирование, разделение сыпучего материала, классификатор, циклон, центробежный классификатор.

Содержание

Введение.....	4
Основная часть.....	7
Заключение.....	23
Список используемой литературы	24

ВВЕДЕНИЕ

Реализация качественной классификации мелкодисперсного измельченного порошкового материала мельницами на различные фракции является неотъемлемой задачей большинства промышленных объектов [1, 2]. В настоящее время для решений данной задачи применяется большое количество разнообразных модификаций классификаторов и воздушных сепараторов. Помимо технических требований на выбор определенной модели аппарата влияют комплексные сведения технологических параметров объекта, теплофизических параметров газовой смеси и конструктивных особенностей аппарата. Главной задачей исследователей в данной области является повышение селективности классификации мелкодисперсного материала.

В настоящее время на большинстве промышленных предприятий используются воздушно-проходные, сочетающие в себе сепаратор, циклон и вентилятор, воздушно-циркуляционные с замкнутым потоком воздуха сепараторы. Следует отметить, что большинство применяемых аппаратов для классификации различных материалов требуют серьезной модернизации, вследствие двух факторов: 1) частичный или полный износ аппаратов из-за долгого эксплуатационного срока использования; 2) падение селективности классификаторов, вследствие использования новых технологий, определяющих повышенные требования к измельченным фракциям частиц. В частности, на многих промышленных объектах необходимы мелкодисперсные порошки с содержанием концентраций иных фракций не более 1 – 2 %.

Данный сегмент рынка не стоит на месте. Некоторые зарубежные компании интенсивно производят исследований в данной области и выпускают современные высокотехнологические аппараты для классификации порошков. Например, немецкая компания «NETZSCH Proven Excellence» изготавливает классификаторы тонкого разделения CFS 5 и CFS 8, применяющиеся для разделения порошков, которые не могут быть разделены на традиционном оборудовании из-за тонины помола. Такие конструктивные особенности, как поддув воздуха в зазоре ротора классификатора, обеспечивающий исключение попадания крупных частиц в продукт,

внутренние элементы ротора, обеспечивающие лучшую тонину помола и не мешающие работе с крупными фракциями, являются достоинствами данных аппаратов. Однако, сложность конструкции, сложные эксплуатационные требования и высокая стоимость являются существенными недостатками [3].

Данная проблематика приобретает большую актуальность и широкую значимость, как на территории Российской Федерации, так и во всем мире. Исследователи М.А. Юровский, А.Е. Лебедев и В.К. Леонтьев в своей работе рассматривали задачу повторного применения материала, который можно использовать при производстве катализаторов, пигментов, цемента, бетона и др. [4].

Таким образом, исследования в области классификации порошков по различным фракциям являются актуальными. В тоже время все вышеописанные способы и устройства имеют сложную конструкцию.

Целью данной работы являются разработка и создание энергоэффективного классификатора с соосно расположенными трубами для фракционирования мелкодисперсного материала на две фракции: частицы менее 30 мкм и более 30 мкм.

Научно-исследовательская работа направлена на увеличение селективности существующих классификаторов, используемых на промышленных предприятиях г. Казани. Также работа ориентирована на производство классификаторов с соосно расположенными трубами и их продажу в другие города России и за рубеж.

Задачами данной работы являются: разработка теоретического описания создания классификатора с соосно расположенными трубами с стабилизированной вихревой структурой в межтрубном пространстве; анализ различных математических моделей и выбор наиболее достоверно описывающую модель турбулентности для изучения газодинамика в классификаторе с соосно расположенными трубами и улавливания частиц из газового потока; исследование различной формы выходного отверстия у внутренней трубы классификатора; исследование различной степени погружения внутренней трубы в классификаторе.

Объектом исследования является классификатор с соосно расположенными трубами.

Для решения задач данной работы используются аналитические методы систематизации и сопоставления полученных ранее результатов другими отечественными исследователями с современным научным уровнем. Научный подход основан на выявлении условий, путей и средств по минимизации энергетических затрат на проведение фракционирования частиц в классификаторе с соосно расположенными трубами.

Апробация разработанного классификатора с соосно расположенными трубами для разделения мелкодисперсного материала на основе силикагеля на две фракции: до 30 мкм и более 30 мкм осуществлялась на предприятии «Салаватский катализаторный завод». В настоящее время в технологической линии предприятия используется 3 данных устройства.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В настоящее время вопросом классификации сыпучего материала занимается большое количество исследователей. В работе [5] Henryk Otwinowski исследовал модифицированный экспериментальный метод на основе матричной модели устройства для классификации частиц в промышленности по переработке минерального порошка. Viktor Rodnianski, Nir Krakauer, Khalil Darwesh, Avi Levy, Naim Kalman, Isabelle Peyron и Francois Ricard в работе [6] исследовали аэродинамическую классификацию частиц в спирально-струйной мельнице. Основными силами, действующими на частицы, являются центробежные и инерционные. В ходе эксперимента в качестве материала использовалась соль NaCl с зернами диаметром от 1,4 до 2 мм, которая измельчалась и классифицировалась. В работе [7] также было произведено численное моделирование процесса классификации частиц в струйной мельнице. Сравнение траекторий частиц численным и экспериментальными методами показали хорошее совпадение. Для повышения эффективности разделения частиц по фракциям Zhanpeng Suna, Guogang Suna, Xiaonan Yang, Yi Yuana, Qinglian Wang, Jianxin Liu разработали центробежный воздушный классификатор [8]. В работе отмечается, что разработанный центробежный воздушный классификатор работает на основе центробежного сепарационного механизма. Исследовался размер частиц от 8 до 256 мкм. В ходе своей работы были произведены численные и экспериментальные исследования. Для моделирования турбулентного потока воздуха использовалась модель Рейнольдса. Результаты исследований показали, что диаметр выходного отверстия аппарата влияет на классификацию частиц, статическое давление радиально уменьшается от стенки к центру и достигает минимального значения внутри классификационной камеры, при увеличении диаметра мелкодисперсных частиц уменьшается интенсивность турбулентности. В работе [9] исследовалось влияние различной формы кольца, прикрепленного к выпускной трубе циклонного сепаратора, на классификацию мелкодисперсных частиц с помощью экспериментальных и численных исследований. Результаты показали, что максимальная эффективность достигается при использовании конической формы кольца при соотношении

толщины стенок верхней и нижней части равной 1,47. В работе [10] также использовалось специальное кольцо, которое крепилось к верхнему выходному отверстию трубы, чтобы уменьшить рециркуляционный поток, снижающий эффективность классификации материала. В своей работе [11] Shibin Liang исследовал классификацию частиц в воздушном классификаторе численным путем в программном комплексе ANSYS Fluent. К недостаткам разрабатываемых классификаторов в большинстве случаев можно отнести сложность конструкции, высокие потери давления и недостаточную селективность разделения сыпучего материала. Таким образом, разработка новых классификаторов, устраняющих данные недостатки, является актуальной задачей.

Автором данной научной работы под руководством научного руководителя для решения данной проблемы был разработан классификатор с соосном расположенными трубами (рис. 1), который предлагается использовать для фракционирования (разделения) сыпучего материала на две фракции: до 30 мкм и более 30 мкм. Данное устройство можно будет использовать, например, после мельниц, измельчающие различные материалы.

Классификатор представляет собой цилиндрический корпус 6, внутри которого располагается цилиндрическая труба с прямоугольными щелями 3, предназначенными для выхода из данной трубы газового потока, внутренняя труба окружена решеткой с отверстиями 2, нижняя часть трубы имеет конусообразную форму с отверстием 4, предназначенным для ссыпания улавливаемого материала в бункер 7. Также конструкция имеет входной 1 и выходной 5 патрубки.

Принцип действия классификатора можно описать следующим образом: запыленный газовый поток попадает в устройство через входной патрубок 1, после чего опускается вниз по внутренней цилиндрической трубе до прямоугольных щелей 3, далее траектория движения газового потока резко изменяется перпендикулярно трубе, в ходе движения запыленного газа по данным траекториям часть частиц выпадает из структуры потока и падает в бункер 7 через отверстие 4. При выходе газового потока из каждой прямоугольной щели 3 он разделяется на 2 струи, которые в одинаковых пропорциях двигаются в правую и левую стороны, достигая

внутреннюю стенку цилиндрического корпуса 6, струи газа разворачиваются и в завихрении движутся в верхнюю часть устройства, при завихрениях возникают центробежные силы, отбрасывающие частицы сыпучего материала из структурированного потока к поверхностям устройства, выбитые частицы падают в пылевой бункер 7. При движении газового потока в верхнюю часть устройства он проходит через решетку с соосно расположенными трубами, которая является дополнительным сепарационным элементом, выбивающая частицы сыпучего материала из структуры потока, после чего они также падают в бункер 7. Очищенный газовый поток от частиц сыпучего материала размером до 30 мкм выходит из классификатора с соосно расположенными трубами через выходное отверстие 5 (рис. 1).

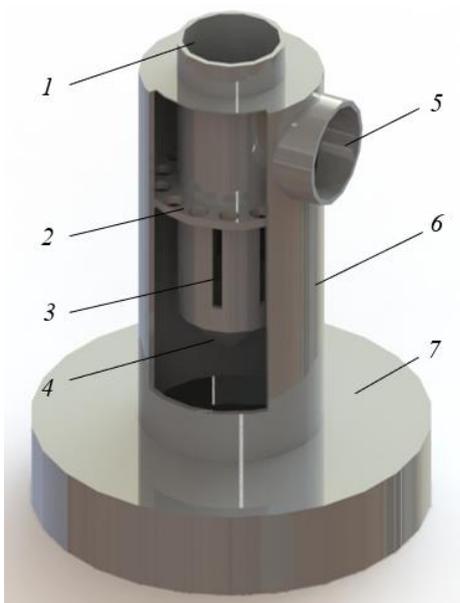
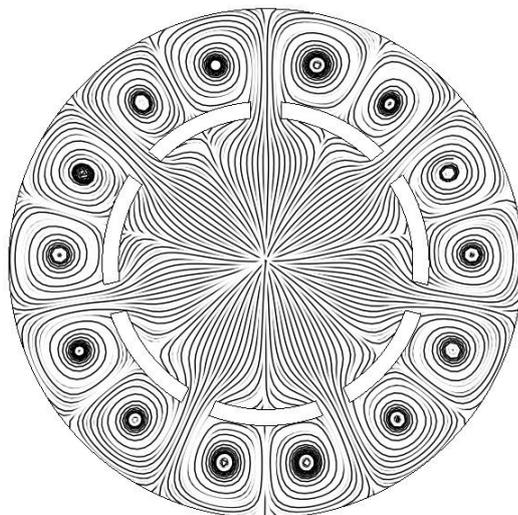


Рис. 1. Классификатор с соосно расположенными трубами:

1 – входной патрубок, 2 – решетка с соосно расположенными трубами, 3 – прямоугольные щели,
4 – отверстие, 5 – выходной патрубок, 6 – корпус устройства, 7 – бункер

Таким образом улавливание частиц сыпучего материала осуществляется преимущественно за счет инерционных и центробежных сил. Влияние инерционных сил наиболее выражено при резком изменении траектории газового потока – при прохождении газа через прямоугольные щели 3 и через решетку с соосно расположенными трубами 2. Влияние центробежных сил наиболее выражено при

закручивании газового потока, которое осуществляется после прохождения газом через решетку с отверстиями 2 (рис. 2).



**Рис. 2. Образование завихрений в классификаторе с соосно расположенными трубами.
Линии тока газового потока (вид сверху в сечении)**

Особенностью классификатора с соосно расположенными трубами является то, что каждое завихрение при своем вращении дополнительно ускоряет два соседних относительно себя завихрений, что увеличивает значения центробежных сил и, как следствие повышает эффективность улавливания частиц из газового потока (рис. 2).

Как было ранее отмечено, важной задачей при разработке классификатора является создание такого устройства, чтобы оно обладало простой конструкцией и его можно было бы изготовить непосредственно в слесарно-механическом цеху на предприятии. Для этого предлагается собирать классификатор с соосно расположенными трубами из цилиндрических труб по ГОСТу (внешний цилиндрический корпус и внутренняя цилиндрическая труба). Для расчета основных конструктивных параметров была разработана инженерная методика, которая базируется на том, что в пространстве между трубами должны образовываться завихрения. При этом, завихрения должны образовываться при выходе газа из прямоугольных щелей таким образом, чтобы каждое завихрение имело точки контакта с соседними завихрениями, чтобы осуществлялось дополнительное взаимное ускорение (раскручивание), как показано на рисунке 1.

Количество завихрений n_s в классификаторе определяется по формуле:

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

где l_{cp} – длина вспомогательной окружности, на которой располагаются центры завихрений, мм;

d_0 – диаметр завихрения, мм (рис. 3).

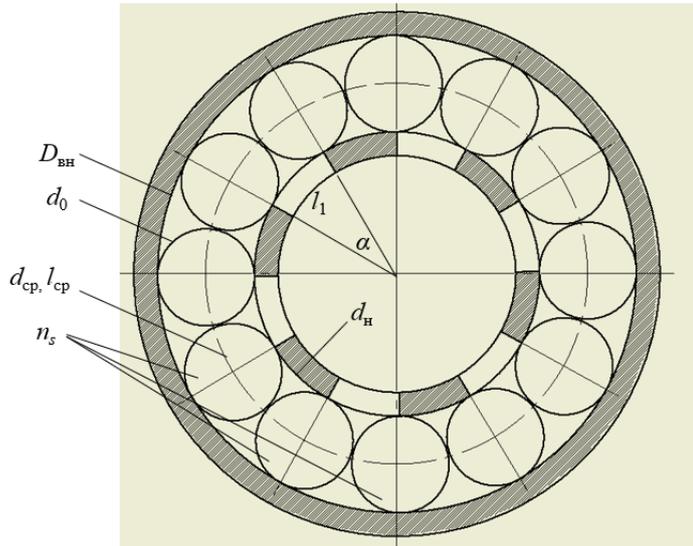


Рис. 3. Связь между конструктивными параметрами (вид в сечении)

Длина вспомогательной окружности l_{cp} , мм рассчитывается по формуле:

$$l_{cp} = \pi d_{cp}, \quad (2)$$

где d_{cp} – диаметр вспомогательной окружности, мм.

Диаметр вспомогательной окружности рассчитывается по формуле:

$$d_{cp} = \frac{D_{вн} + d_{н}}{2}, \quad (3)$$

где $D_{вн}$ – внутренний диаметр внешней трубы (внешний цилиндрический корпус), мм;

$d_{н}$ – наружный диаметр внутренней трубы (внутренняя цилиндрическая труба), мм.

Диаметр завихрения рассчитывается по выражению:

$$d_0 = \frac{D_{вн} - d_{н}}{2}. \quad (4)$$

Ширина каждой щели l_1 , мм определяется по формуле:

$$l_1 = \frac{\pi d_n \alpha}{360^\circ}, \quad (5)$$

где α – угол щели.

По приведенным формулам (1-5) можно рассчитать ширину щелей l_1 , при изготовлении классификатора из труб различных диаметров, для создания вихревой структуры в межтрубном пространстве. В качестве примера рассмотрим создание классификатора из труб по ГОСТу 3262-75. Примем наружный диаметр внутренней трубы $d_n = 48$ 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 количество завихрений в межтрубном пространстве. (рис. 4).

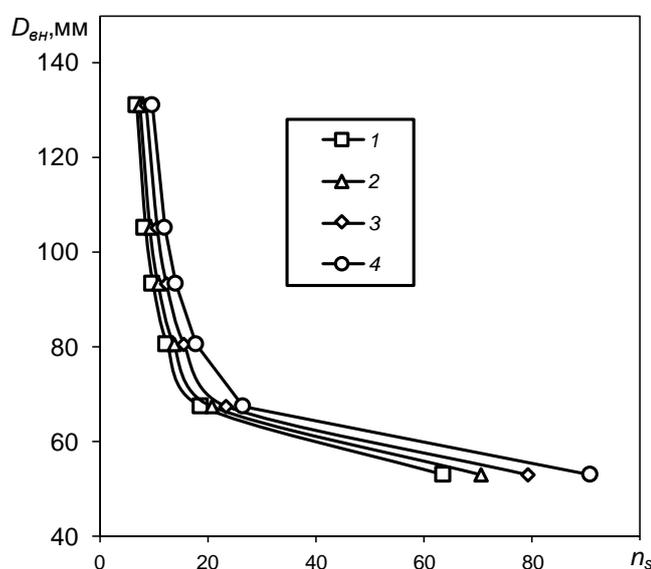


Рис. 4. Зависимость внутреннего диаметра внешней трубы от количества завихрений в межтрубном пространстве при различной ширине щели l_1 :

1 - l_1 ; 2 - $0,9 l_1$; 3 - $0,8 l_1$; 4 - $0,7 l_1$

Расчетные данные показывают, что при использовании труб диаметром от 53 до 131 мм в качестве внешнего корпуса классификатора количество завихрений 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 (рис. 4).

Таким образом, приведенный расчет показывает, какое количество завихрений в классификаторе можно получить при изготовлении устройства из труб различного диаметра.

В ходе создания классификатора важной задачей являлось подобрать наиболее подходящую модель турбулентности для возможности описания газодинамики и расчета сепарации частиц из газового потока в устройстве, что позволит производить численные моделирования при различных технологических и конструкционных параметров.

В качестве программы для анализа различных математических моделей турбулентности была выбрана ANSYS Fluent. Данное программное обеспечение предназначено для моделирования сложных течений жидкостей и газов с широким диапазоном изменений теплофизических свойств посредством обеспечения различных параметров моделирования и использования многосеточных методов с улучшенной сходимостью. В программе используется метод конечных элементов, который представляет собой сеточный метод. В зависимости от выбранной модели турбулентности задаются дифференциальные уравнения в частных производных (уравнение Навье-Стокса). В ходе подготовки к численному моделированию в программном пакете ANSYS Fluent была создана трехмерная геометрия классификатора с соосно расположенными трубами, представленная на рисунке 1. В качестве исследуемых моделей турбулентности были выбраны следующие: Spalart-Allmaras, SST $k-\omega$, transition SST и RSM. Также была рассмотрена ламинарная модель (Laminar).

При проведении численного моделирования принимались следующие постоянные значения: скорость газового потока на входном патрубке принималась 10 м/с, давление на выходе из классификатора принималось равным атмосферному – 101325 Па. Геометрические размеры исследуемого классификатора с соосно расположенными трубами принимались следующим значениям: диаметр входного и выходного патрубка – 60 мм, диаметр корпуса классификатора – 100 мм, высота классификатора – 290 мм, высота внутренней цилиндрической трубы – 192 мм, диаметр отверстий в решетке – 12 мм, диаметр отверстия в нижней

конусообразной части внутренней цилиндрической трубы – 16 мм, высота и ширина прямоугольных отверстий – 60 мм, глубина и диаметр бункера – 50 и 210 мм соответственно.

В ходе исследований трехмерная модель классификатора с соосно расположенными трубами были разбита на 1241551, 2080907 и 3159388 ячеек (рис. 5).

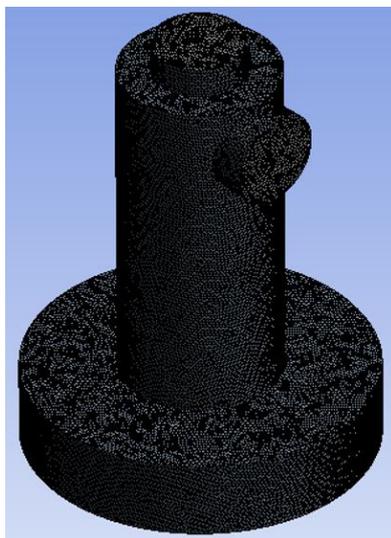


Рис. 5. Построение сетки. Количество ячеек N = 1241551

При построении графических зависимостей рассчитывались потери давления Δp в классификаторе с соосно расположенными трубами по следующему выражению:

$$\Delta p = p_1 - p_5, \quad (6)$$

где p_1 – давление на входном патрубке 1, Па;

p_5 – давление на выходе из классификатора на выходном патрубке 5 (рис. 1), Па.

Результаты исследований показали, что потери давления в классификаторе с соосно расположенными трубами составляют не более 395 Па при входной скорости газового потока $W=10$ м/с. Потери давления в классификаторе в среднем составили 383, 385, 386, 390, 389 Па при использовании laminar, Spalart-Allmaras, k- ω , RSM и Transition SST в качестве расчетной модели соответственно при количестве ячеек от 1241551 до 3159388. Расхождение между различными расчетными моделями: laminar, Spalart-Allmaras, k- ω , RSM и Transition SST при определении потери давления составило не более 6 %. Следует отметить, что при количестве ячеек 1241551, 2080907 и 3159388 расхождение между максимальным и минимальным значениями

потери давления в классификаторе при различных расчетных моделях составили в среднем 2,92, 4,54 и 2,48 % соответственно. Использование laminar, Spalart-Allmaras, k- ω , RSM и Transition SST модели при увеличении количества ячеек с 1241551 до 3159388 показало, что значения отклонения значений по потери давления в классификаторе составляет не более 4,44, 3,04, 1,05, 1,22 и 0,43 % соответственно (рис. 6).

Наиболее подходящей моделью турбулентности для расчета разработанного классификатора является Transition SST, так как наблюдается наименьшее изменение потери давления в устройстве при изменении количества ячеек в расчетной геометрии (рис. 6).

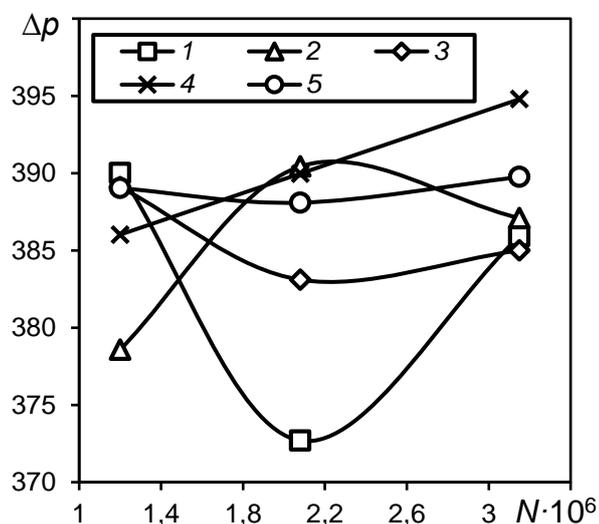


Рис. 6. Зависимость изменения потери давления в классификаторе с соосно расположенными трубами от количества ячеек при различных расчетных моделях:

1 – Laminar; 2 – Spalart-Allmaras; 3 – k- ω ; 4 – RSM; 5 – Transition SST.

Входная скорость газового потока $W = 10$ м/с

На основе подобранной модели турбулентности Transition SST для классификатора с соосно расположенными трубами был произведен расчет для определения изменения потери давления в данном устройстве при изменении входной скорости газового потока W от 5 до 10 м/с. В ходе численного моделирования было установлено, что потери давления в классификаторе в среднем составляют 234 Па при входной скорости от 5 до 10 м/с (рис. 7). При исследованиях было

получено уравнение степенной функции, описывающее влияние входной скорости газового потока на потери давления в классификаторе:

$$\Delta p = 3,8945W^{1,99}. \quad (7)$$

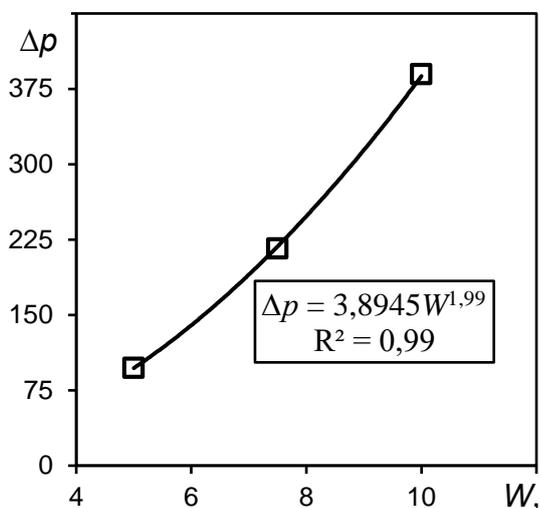


Рис. 7. Зависимость изменения потери давления в классификаторе с соосно расположенными трубами от входной скорости газового потока

Также при использовании модели турбулентности Transition SST было исследовано изменение скорости газового потока в прямоугольных щелях в зависимости от точки измерения. Для определения скорости газового потока в различных точках прямоугольной щели, она была разделена на 7 участков с шагом 10 мм. На первом и последнем участках скорость газа была равно нулю, так как это были крайние положения в верхних и нижних частях щели, которые непосредственно контактировали с внутренней цилиндрической трубой. В промежуточных участках скорость газа была равна в среднем 12,4 м/с. При этом максимальная скорость газа достигалась в верхних участках, которая составляла до 14,8 м/с. Минимальная скорость газового потока фиксировалась в центральной части прямоугольных щелей равная 11 м/с. По мере отдаления к нижним исследуемым участкам щели от центрального скорость газового потока снова увеличивалась до 12,7 м/с (рис. 7).

Данное распределение скоростей газового потока можно объяснить следующим образом: при движении газа по внутренней цилиндрической трубе, большая часть потока направляется сразу же в сужения, т.е. в верхние участки прямоугольных

щелей, вследствие этого там достигаются максимальные значения скоростей. Остальная часть газового потока распределяется на центральную и нижнюю части прямоугольных щелей и на область, которая следует после отверстия в конусообразной части внутренней цилиндрической трубы. При прохождении газа через нижнее отверстие в конусообразной части трубы он направляется в верхнюю часть устройства при этом огибая прямоугольные щели с наружной стороны, вследствие данного процесса происходит изменение структуры потока в нижней и центральной частях прямоугольных щелей, что приводит к изменению значений скоростей газового потока в них. В частности, восходящий поток подбирает и толкает газ, выходящий из нижних участков прямоугольных щелей, но по мере продвижения к центральной части щелей, он становится дополнительным сопротивлением для выходящего потока из щели, вследствие чего скорость газа в центральных участках щелей падает (рис. 8).

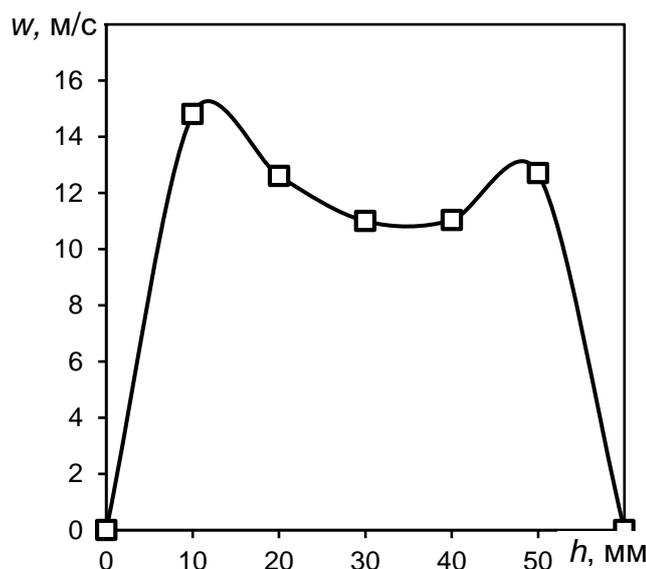


Рис. 8. Зависимость изменения скорости движения газового потока из прямоугольной щели от расположения участка, на котором определялась скорость

Таким образом, проведенные исследования показали, что применение численного моделирования при разработке аппаратов может существенно упростить данный процесс и снизить экономические затраты. Среди рассмотренных *laminar*, *Spalart-Allmaras*, *k- ω* , *RSM* и *Transition SST* моделей наиболее адекватной является модель *Transition SST*, при использовании которой погрешность при определении

потери давления в классификаторе при изменении количества ячеек в расчетной сетке от 1241551 до 3159388 составила 0,43 %.

Также особый интерес представляет вид отверстия 4 в нижней части внутренней трубы (конусообразное или цилиндрическое) и глубина погружения внутренней трубы в классификатор на степень фракционирования частиц размером до 30 мкм и более 30 мкм. В качестве материала задавались частицы силикагеля с плотностью 1075 кг/м³. В ходе численных исследований характерным размером было выбрано расстояние h_d соответствующего расстоянию между отверстием конусообразной внутренней трубы 4 и верхней границей пылевого бункера 7 (рис. 1).

Были рассмотрены следующие значения параметра h_d : 20, 50 и 100 мм, которые соответствовали 3 исследуемым моделям первой группы (с конусообразным отверстием). Во второй группе рассматривались 3 устройства с цилиндрической внутренней трубой, т.е. сечение трубы осталось постоянным по всей ее длине. Были исследованы следующие значения параметра h_d : 20 и 30 мм. Следует отметить, что третье исследуемое устройство 2 группы частично входило в пылевой бункер на 10 мм. Таким образом, параметр h_d соответствовал отрицательному значению - 10 (рис. 9).

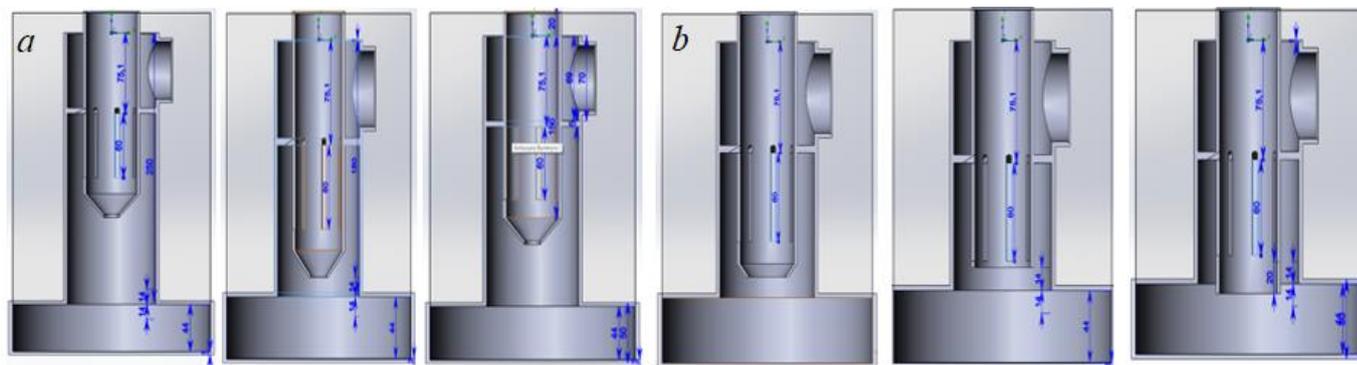


Рис. 9. Две группы исследуемых классификаторов:
a – конусообразное отверстие; *b* – цилиндрическое отверстие

Результаты исследований показали, что устройства, относящиеся к 1 группе, являются наиболее эффективными для процессов классификации частиц из газовых потоков. В большой мере это объясняется 2 факторами: 1) при движении запыленного газового потока по внутренней конусообразной трубе постепенно уменьшается ее

радиус, что повышает значение центробежных сил, действующих на поток, 2) меньший размер выходного отверстия конусообразной внутренней трубы относительно цилиндрической, что перераспределяет количество запыленного газового потока, проходящего через прямоугольные отверстия и выходное отверстие 4 (рис. 1), пропускная способность прямоугольных отверстий в конусообразной трубе увеличивается относительно цилиндрической, в то же время пропускная способность выходного отверстия 4 уменьшается относительно пропускной способности в цилиндрической трубе, что является причиной повышения значений центробежных сил в завихрениях, которые образуются за прямоугольными отверстиями.

Эффективность улавливания частиц в классификаторе рассчитывалась:

$$E = 1 - \frac{n_k}{n}, \quad (8)$$

где m – число частиц, диспергированных в газовом потоке;

n_k – число частиц пыли, в бункере 7.

Эффективность улавливания частиц силикагеля из запыленного газового потока размером более 30 мкм классификатором с соосно расположенными трубами в среднем составила в среднем 70,5 и 35,2 % для устройств 1 и 2 группы соответственно (рис. 10 и рис. 11).

Таким образом, проведенные численные исследования показали, что решения задач классификации частиц сыпучего материала на основе силикагеля из газовых потоков различного размера эффективнее использовать сепаратор с внутренней трубой конусообразного типа, так как достигается большее значение центробежных, инерционных, гравитационных и прочих сил, действующих на запыленный поток, способствующих выбиванию частиц из его структуры, чем в классификаторе с цилиндрической внутренней трубой. В среднем эффективность классификатора с конусообразной внутренней трубой больше на 35,3 %, чем классификатора с цилиндрической внутренней трубой.

Классификация частиц из запыленного потока классификатором размером более 30 мкм осуществлялось с эффективностью в среднем равной 29,4, 66,9 и 93,7 % при значении параметра h_d равного 20, 30 и -10 мм соответственно (рис. 11).

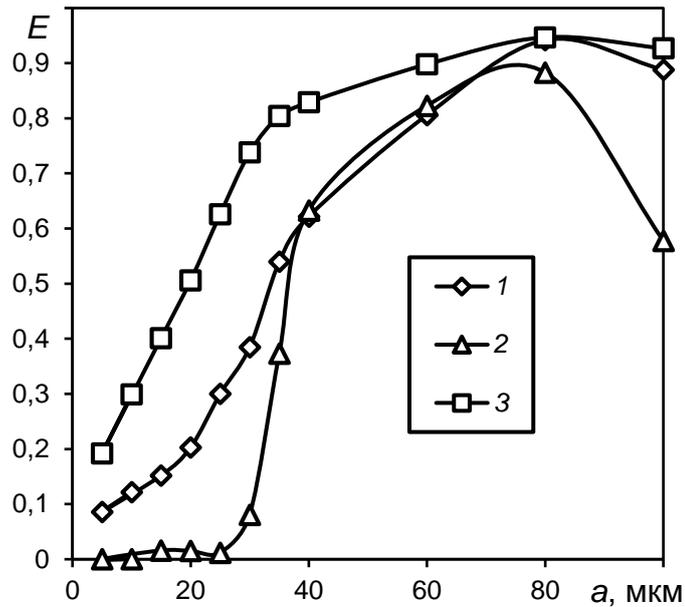


Рис. 10. Зависимость изменения эффективности фракционирования частиц сыпучего материала на основе силикагеля из газового потока от их размера в классификаторе с конусообразной внутренней трубой при различных значениях параметра h_d , мм:

1 – 20, 2 – 50, 3 – 100

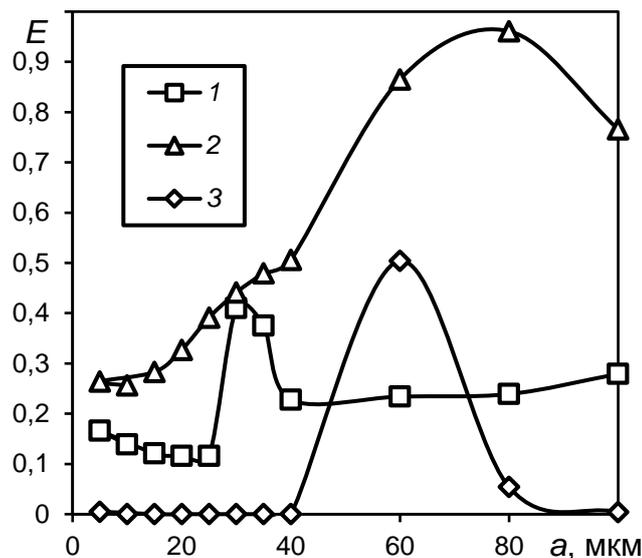


Рис. 11. Зависимость изменения эффективности фракционирования частиц сыпучего материала на основе силикагеля из газового потока от их размера в классификаторе с цилиндрической внутренней трубой при различных значениях параметра h_d , мм:

1 – 20, 2 – 30, 3 – -10

Следует отметить, что наиболее подходящим устройством среди 3 исследуемых моделей является классификатор с параметром h_d равным -10 мм, так как при фракционировании частиц размером менее 30 мкм достигается практически нулевая

эффективность и при улавливании частиц размером более 30 мкм достигается высокая эффективность выше 90 % (рис. 11).

По проведенным исследованиям была изготовлена промышленная модель классификатора с соосно расположенными трубами (рис. 12), которая была интегрирована в технологическую линию изготовления катализатора на основе силикагеля. Следует отметить, что на момент изготовления классификатора была произведена часть исследований, поэтому изготавливался классификатор с внутренней трубой, которая имела цилиндрическое отверстие 4. Классификатор был интегрирован в технологическую линию предприятия «Салаватский катализаторный завод» в мае 2020 г. На текущий момент на предприятии используется 3 данных устройства.



Рис. 12. Изготовление, апробация и использование классификатора с соосно расположенными трубами на предприятии

Классификатор с соосно расположенными трубами был использован и применяется в настоящее время вместо центробежного классификатора (циклона). В ходе промышленных испытаний было установлено, что селективность

классификатора в среднем на 12 % выше, чем у центробежного циклона, который использовался ранее. В ходе промышленных испытаний эффективность улавливания частиц размером более 30 мкм составляла в среднем 96 %. В настоящее время осуществляется изготовление классификатора с соосно расположенными трубами с конусообразным отверстием.

Таким образом, на основе проведенных исследований была изготовлена конструкция классификатора с соосно расположенными трубами, которая сейчас интегрирована в технологическую линию предприятия «Салаватский катализаторный завод» в количестве 3 шт. Проведенные теоретические, численные и промышленные исследования показали, что создание вихревой структуры в межтрубном пространстве позволяет с высокой эффективностью отделять частицы размером более 30 мкм из газового потока.

В ходе теоретических исследований получена инженерная методика расчета на основе формул (1-5) классификатора для получения стабилизированной вихревой структуры. Показано, что классификатор с соосно расположенными трубами возможно изготовить из труб по ГОСТу. Рассмотрено влияние щели на образование вихрей: сужение прямоугольной щели от 10 до 30 % приводит к увеличению завихрений в среднем на 11,1 %.

В ходе численных исследований получено, что наиболее подходящей моделью турбулентности для расчета классификатора является модель Transition SST. При использовании которой погрешность при определении потери давления в классификаторе при изменении количества ячеек в расчетной сетке от 1241551 до 3159388 составила 0,43 %. Численные моделирования показали, что потери давления в классификаторе составляют не более 400 Па. Получено уравнение (7), позволяющее рассчитать потери давления от входной скорости газового потока. Показано, что наиболее эффективной формой выходного отверстия внутренней трубы является конусообразная.

В ходе промышленных испытаний получено, что селективность разработанного классификатора составляет не менее 95 %.

Заключение

На основе анализа обзора существующих аппаратов для фракционирования частиц (центробежные, гравитационные, ситовые и др.) разработан классификатор с соосно расположенными трубами. Наличие стабилизированной вихревой структуры позволяет достичь высокой селективности в отличие от других классификаторов. Простота конструкции, минимальное количество местных сопротивлений и точек контакта вихрей с внутренними поверхностями классификатора позволяют достичь минимальных потерь давления, что существенно снижает энергопотребление на предприятиях.

В ходе работы разработана и создана конструкция классификатора с соосно расположенными трубами. Определена наиболее подходящая модель турбулентности – Transition SST. Показано, что потери давления в классификаторе составляют не более 400 Па. Наиболее оптимальной формой выходного отверстия внутренней трубы является конусообразная. Проведена успешная промышленная апробация устройства. В настоящее время на предприятии «Салаватский катализаторный завод» применяется 3 классификатора с соосно расположенными трубами.

Использование классификатора в г. Казани особенно актуально, в связи с развитой промышленностью в городе. Установка классификатора на предприятии «Казанский гипсовый завод» позволит повысить селективность фракционирования гипсового порошка. Также в перспективе классификатор может войти в линейку аппаратов промышленного предприятия «Инжехим», которые изготавливает промышленные аппараты для предприятий других городов России и стран мира и предприятия «Новатор», который занимается изготовлением сельхозтехники и оборудования.

Достоинствами конструкции классификатора с соосно расположенными трубами являются: малая металлоемкость, высокая селективность, простота использования, низкие потери давления и возможность изготовления конструкции на предприятии.

Список используемой литературы

1. **Altun, O., Benzer, H.** Selection and mathematical modeling of high efficiency air classifiers. Powder Technol. 264, pp. 1–8, 2014.
2. **Lanzerstorfer, C.** Application of air classification for improved recycling of sinter plant dust. Resour. Conserv. Recycl. 94, pp. 66–71, 2015.
3. CFS 5 and CFS 8 Fine Classifiers // URL: <https://www.netzschgrinding.com/en/products-solutions/classifying/cfs-5-cfs-8-fine-classifier/> (дата обращения: 15.10.2020).
4. **Yurovskaya M.A., Lebedev A.E. and Leontev V.K.** Improving the operating efficiency of a dust collector-classifier. Chemical and Petroleum Engineering. V. 55, Nos. 3-4, pp. 324-328, 2019.
5. **Henryk, O.** Cut size determination of centrifugal classifier with fluidized bed. Arch. Min. Sci., Vol. 58, No 3, pp.823–841, 2013.
6. **Viktor R., Nir K., Khalil D., Avi L., Haim K., Isabelle P., Francois R.,** Aerodynamic classification in a spiral jet mill. Powder Technology, 243, pp.110-119, 2013.
7. **Brosh T., Batat Y., Kalman H., Levy A., Brown B.** Particle motion and classification in a jet mill, Bulk Solids & Powder Science & Technology, 3(2), pp. 83–88, 2008.
8. **Zhanpeng S., Guogang S., Xiaonan Y., Yi Yuana, Qinglian W., Jianxin L.** Effects of fine particle outlet on performance and flow field of a centrifugal air classifier. Chemical engineering research and design, 117, pp.139–148, 2017.
9. **Wakizono Y., Maeda T., Fukui K., Yoshida H.** Effect of ring shape attached on upper outlet pipe on fine particle classification of gas-cyclone, Separation and Purification Technology, 131, pp. 84-93, 2015.
10. **Nobukiyo R., Inada Y., Fukui K., Yoshida H.** Improvement of particle collection performance of dry-cyclone by use of local fluid flow control method, Kagaku Kogaku Ronbunshu 33(2), pp. 92–100, 2007.
11. **Thermalloy A.** Numerical study of classification of ultrafine particles in a gas-solid field of elbow-jet classifier, Chemical Engineering Communications, 197(7), pp. 1016-1032, 2010.