

УДК 621.928.6

UDC 621.928.6

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки)

4.3.1. Technologies, machinery and equipment for the agro-industrial complex (technical sciences)

### **АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ КЛАССИФИКАТОРА С ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ВНУТРЕННЕЙ ТРУБОЙ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ГЛУБИНЫ ПОГРУЖЕНИЯ**

### **ANALYSIS OF THE PERFORMANCE OF A CLASSIFIER WITH A CYLINDRICAL INNER TUBE UNDER VARIATIONS IN IMMERSION DEPTH**

Прец Мария Арнольдовна  
Старший преподаватель  
SPIN – код автора: 8457-2157  
*Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия*

Prets Maria Arnoldovna  
Senior Lecturer  
RSCI SPIN-code: 8457-2157  
*Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia*

Мугинов Арслан Маратович  
студент  
SPIN – код автора: 3425-1647  
*Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия*

Muginov Arslan Maratovich  
student  
RSCI SPIN-code: 3425-1647  
*Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia*

Классификаторы с коаксиально расположенными трубами играют важную роль в разделении мелкодисперсных частиц в запыленных газовых потоках, широко применяемых в агропромышленном комплексе. В данной работе исследуется влияние глубины погружения внутренней цилиндрической трубы на эффективность фракционирования частиц силикагеля размером от 1 до 100 мкм. Для проведения численного анализа использовалась программная среда ANSYS Fluent, что позволило моделировать движение газа и частиц с учетом ключевых параметров конструкции. Особое внимание уделялось параметру, который варьировался в диапазоне от -10 до 30 мм. В ходе моделирования изучались изменения структуры потока, интенсивности завихрений и распределения скоростей газа при разных значениях глубины погружения трубы. Полученные результаты показали, что минимальное значение -10 обеспечивает наибольшую эффективность улавливания частиц размером более 30 мкм (до 93,7%), в то время как осаждение частиц менее 30 мкм остается минимальным, что соответствует высоким требованиям селективности. При увеличении до 20 и 30 мм эффективность улавливания крупных частиц снижается, однако возрастает способность классификатора к захвату мелкодисперсных частиц. Созданная сеточная модель с детализированными областями позволила с высокой точностью воспроизвести характеристики потока, а контроль ортогональности сеточных

Classifiers with coaxially arranged tubes play a critical role in separating fine particles from dusty gas flows, widely utilized in the agro-industrial sector. This study investigates the effect of the immersion depth of the inner cylindrical tube on the efficiency of fractionating silica gel particles ranging from 1 to 100  $\mu\text{m}$ . Numerical analysis was performed using the ANSYS Fluent software, enabling the modeling of gas and particle movement while accounting for key design parameters. Particular attention was given to the immersion depth parameter, which was varied within the range of -10 to 30 mm. The simulation explored changes in flow structure, vortex intensity, and gas velocity distribution under different immersion depths of the tube. The results demonstrated that a minimum immersion depth of -10 mm provided the highest efficiency for capturing particles larger than 30  $\mu\text{m}$  (up to 93.7%), while the deposition of particles smaller than 30  $\mu\text{m}$  remained minimal, meeting high selectivity requirements. When the immersion depth increased to 20 and 30 mm, the efficiency of capturing larger particles decreased, but the classifier's ability to trap finer particles improved. The developed mesh model with detailed regions allowed for precise reproduction of flow characteristics, while the control of element orthogonality ensured the reliability of calculations. Based on the obtained data, we have proposed recommendations for selecting optimal classifier parameters under various operating conditions in agro-industrial applications

элементов обеспечил надежность расчетов. На основе полученных данных предложены рекомендации по выбору оптимальных параметров работы классификатора для различных условий эксплуатации в агропромышленных процессах

Ключевые слова: КОАКСИАЛЬНЫЙ КЛАССИФИКАТОР, ГЛУБИНА ПОГРУЖЕНИЯ ТРУБЫ, ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ANSYS FLUENT, ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФРАКЦИОНИРОВАНИЯ, СИЛИКАГЕЛЬ, ЗАВИХРЕНИЯ, ГАЗОВЫЙ ПОТОК

Keywords: COAXIAL CLASSIFIER, IMMERSION DEPTH OF TUBE, NUMERICAL MODELING, ANSYS FLUENT, FRACTIONATION EFFICIENCY, SILICA GEL, VORTICES, GAS FLOW

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-204-048>

**Введение.** Эффективность процессов обработки и переработки сельскохозяйственных продуктов тесно связана с совершенствованием технологического оборудования, которое позволяет оптимизировать производственные процессы. Современное агропромышленное производство нуждается в системах, способных эффективно работать в условиях высоких объемов и разнообразия обрабатываемых материалов. Одной из ключевых задач является разделение частиц различной фракции, которое напрямую влияет на качество и стоимость конечного продукта.

Исторически сложилось, что технологии сепарации развивались медленно, ограничиваясь механическими методами. Однако с ростом производственных масштабов и внедрением новых материалов возникла необходимость создания высокопроизводительных систем, способных работать с минимальными потерями сырья. Это стало основой для разработки новых подходов в проектировании и конструировании сепараторов, которые могут эффективно адаптироваться под изменяющиеся условия.

Развитие современных технологий, таких как численное моделирование, позволило не только улучшить понимание физических процессов, но и существенно сократить время на создание прототипов. Это особенно актуально для систем, работающих в аграрной отрасли, где требуется высокоточная настройка оборудования для достижения

<http://ej.kubagro.ru/2024/10/pdf/48.pdf>

максимальной эффективности. В условиях глобальной конкуренции и стремления к устойчивому развитию, решения, обеспечивающие оптимизацию процессов сепарации, становятся важным элементом технологического прогресса.

### **Состояние исследований и актуальность проблемы.**

Сепарационные технологии, применяемые в агропромышленности, за последние десятилетия претерпели значительные изменения. Традиционные гравитационные и механические методы уступают место более сложным системам, использующим аэродинамические и центробежные принципы. Такие подходы демонстрируют высокую эффективность, особенно при обработке материалов с мелкодисперсными частицами.

Исследования, посвященные повышению производительности классификаторов, активно проводятся как в отечественной, так и зарубежной практике. Однако многие работы сосредоточены на улучшении отдельных параметров, таких как скорость обработки или степень разделения частиц, игнорируя комплексность взаимодействия множества факторов. Это приводит к необходимости создания более универсальных подходов, учитывающих как физико-механические свойства материалов, так и специфику работы в агропромышленной среде.

В последние годы значительное внимание уделяется численным методам моделирования, которые позволяют с высокой точностью прогнозировать поведение потоков внутри систем. Применение CFD-методов становится неотъемлемой частью разработки эффективных классификаторов, так как они дают возможность исследовать различные конфигурации и параметры без необходимости создания множества физических прототипов.

Существующий запрос на создание универсальных, надежных и экономически эффективных систем разделения делает проблему

усовершенствования центробежных классификаторов с мультивихревыми элементами крайне актуальной. Достижение высокой точности и производительности при минимальных затратах энергии остается ключевой задачей в контексте современного агропромышленного производства.

В работе предлагается центробежный классификатор с мультивихревой системой (рис. 1). Работа которого начинается с подачи загрязненного газа через входной патрубков. Поток направляется вниз по центральной трубе, где расположены отверстия. При прохождении через них траектория газа изменяется, и поток разделяется на струи, которые направляются к стенкам корпуса. Здесь под действием инерции крупные частицы отделяются и оседают в нижней части устройства [1].

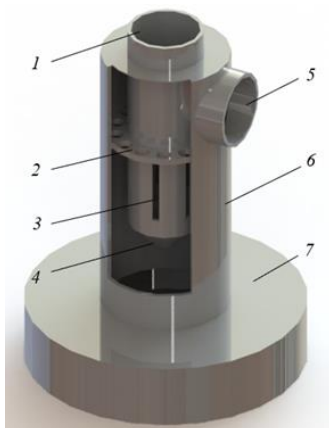


Рисунок 1 – Сепарационный модуль: 1 – патрубков для подачи газа; 2 – решетка с трубами, расположенными коаксиально; 3 – отверстия прямоугольной формы; 4 – отверстие для сброса материала; 5 – патрубков для выхода газа; 6 – корпус; 7 – сборный бункер

Газ продолжает движение через решетку с коаксиально расположенными трубами, где создаются вихри. Эти вихри усиливают центробежные силы, способствуя отделению мелких частиц, которые затем попадают в сборный отсек. Чистый газ выходит через выходной патрубков. Уникальная структура вихрей увеличивает эффективность

работы устройства, особенно при работе с мелкодисперсными материалами.

**Цель исследований.** Целью данного исследования является оценить эффективность улавливания частиц классификатором.

**Материалы и методы исследований.** Конструкция аппарата предполагает наличие внутренней трубы, параметры которой варьировались для анализа влияния на эффективность работы устройства. Особое внимание было уделено внутренней трубе устройства, а именно глубине ее погружения относительно бункера, обозначенной параметром  $h_d$ . Этот параметр изменялся для оценки его влияния на эффективность работы классификатора и оптимизации условий отделения частиц.

Для анализа использовалась численная модель, построенная в программном комплексе ANSYS Fluent. При моделировании задавались фиксированные граничные условия: объемный расход газа на входе составлял  $0,03 \text{ м}^3/\text{с}$ , давление на выходе принималось равным атмосферному значению –  $101325 \text{ Па}$ . Температура окружающей среды и газа устанавливалась на уровне  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . В качестве исследуемого материала использовались частицы размером от 1 до 100 мкм.

Для повышения точности моделирования была создана сеточная модель с детализированными областями, в которых возникают интенсивные завихрения. В расчетах применялись упрощения: предполагалось, что газовая и твердая фазы не взаимодействуют между собой, а поведение газа описывалось уравнениями для идеального газа. Такие допущения позволили сосредоточиться на анализе влияния параметра  $h_d$  на эффективность работы устройства, исключив влияние других факторов. Особое внимание уделялось выбору оптимального размера ячеек: в критических зонах использовались мелкие ячейки для детального описания потоков, а в областях с равномерным течением применялась укрупненная сетка для снижения вычислительных затрат.

При построении сеточной модели строго соблюдалась ортогональность элементов, что имеет ключевое значение для обеспечения точности и устойчивости численных расчетов. Ортогональные ячейки способствуют снижению уровня дискретизационных ошибок, особенно в зонах со сложной геометрией и интенсивными турбулентными потоками. Контроль ортогональности выполнялся на всех этапах создания сетки, что позволило обеспечить корректное моделирование движения газа и взаимодействия его с конструктивными элементами классификатора. Такой подход гарантирует высокую достоверность полученных данных и позволяет использовать их для оптимизации параметров устройства.

Эффективность классификатора определялась по количеству частиц, осаждаемых в бункере, относительно общего числа введенных частиц. Стоит отметить, что в ходе исследования оценивались параметры движения частиц в области завихрений, возникающих при изменении траектории газового потока. Расчеты проводились с учетом гравитационных и инерционных сил, действующих на частицы в потоке. Для каждой из исследуемых глубин погружения трубы определялись параметры траектории движения газа и вероятность осаждения частиц. Такой подход позволил комплексно оценить влияние конструктивных изменений на общую эффективность работы классификатора.

**Результаты исследований.** Эффективность работы классификатора с цилиндрической внутренней трубой при различных значениях глубины погружения трубы  $h_d$  варьировалась в зависимости от размера частиц. Средние показатели для фракционирования частиц размером от 1 до 100 мкм составили 22,1%, 50,3% и 5,1% при  $h_d$  равном 20, 30 и -10 мм соответственно. Эти значения примерно вдвое ниже по сравнению с классификатором, использующим внутреннюю трубу конусообразной формы, что указывает на ограниченную производительность цилиндрической конструкции.

При анализе эффективности улавливания мелких частиц (менее 30 мкм) классификатор показал следующие результаты: 13,1% для  $h_d = 20$  мм, 30,1% для  $h_d = 30$  мм и всего 1,1% для  $h_d = -10$  мм. Это подчеркивает, что минимальная глубина погружения трубы способствует снижению осаждения мелкодисперсных частиц, что может быть полезным для задач, требующих высокой селективности при отделении крупных частиц.

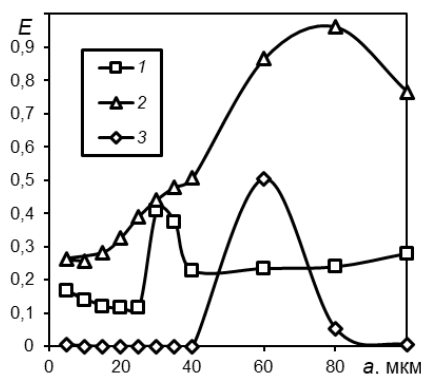


Рисунок 2 – Зависимость изменения эффективности классификатора от диаметра частиц при различных значениях параметра  $h_d$ , мм: 1 – 20, 2 – 30, 3 – -10

Для частиц размером более 30 мкм эффективность классификации показала обратную зависимость. Наибольшие результаты достигались при  $h_d = -10$  мм, где эффективность составила 93,7%, что значительно выше, чем 66,9% при  $h_d = 30$  мм и 29,4% при  $h_d = 20$  мм. Эти данные свидетельствуют о том, что уменьшение глубины погружения усиливает действие центробежных сил, способствующих осаждению крупных частиц.

Следует отметить, что классификатор с параметром  $h_d = -10$  мм продемонстрировал оптимальные результаты для частиц размером свыше 30 мкм, практически не улавливая частицы меньшего размера, что делает его наиболее подходящим для задач, требующих высокой точности разделения по размеру. Однако конструкция с минимальной глубиной погружения имеет недостаток: при увеличении размера частиц свыше 80 мкм эффективность аппарата значительно снижается и приближается к

нулю, что может ограничивать применение данной конфигурации в определенных процессах (рис. 2).

**Выводы.** 1. Исследование показало, что глубина погружения внутренней трубы  $h_d$  существенно влияет на эффективность фракционирования частиц. Оптимальным значением параметра является  $h_d = -10$  мм, при котором достигается высокая эффективность отделения крупных частиц (свыше 30 мкм) – до 93,7%, в то время как улавливание мелких частиц минимально, что обеспечивает высокую степень селективности процесса. 2. При увеличении  $h_d$  до 20 и 30 мм эффективность улавливания крупных частиц снижается до 29,4% и 66,9% соответственно. Одновременно возрастает эффективность улавливания мелкодисперсных частиц, что делает такие значения менее подходящими для задач, требующих избирательного отделения крупных частиц. 3. Классификатор с  $h_d = -10$  мм демонстрирует снижение эффективности при работе с частицами размером свыше 80 мкм, что ограничивает его применение для материалов с высокой долей крупнодисперсной фракции. Это требует доработки конструкции для таких случаев. 4. Предложенные параметры классификатора позволяют адаптировать устройство под задачи агропромышленных процессов, где требуется точное отделение крупных частиц из запыленных газовых потоков. Результаты исследования подтверждают необходимость индивидуальной настройки параметров для повышения эффективности и селективности работы оборудования.

#### Библиографический список

1. 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.

#### References



1. Zinurov, V. Je. Gazodinamika protočnoj chasti klassifikatora s soosno raspolzhennymi trubami / V. Je. Zinurov, A. V. Dmitriev, I. I. Nasyrova, O. S. Dmitrieva // Vestnik Tehnologicheskogo universiteta. – 2022. – T. 25. – № 4. – S. 71-76.