

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 ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО СЕПАРАТОРА ПРИ ОЧИСТКЕ ЗАПЫЛЁННОГО ГАЗОВОГО ПОТОКА

ANALYSIS OF CYLINDRICAL SEPARATOR EFFICIENCY IN CLEANING DUST-LADEN GAS FLOWS

Шаймарданов Ансель Ренатович
Студент
*Казанский государственный энергетический
университет, Казань, Россия*

Shaimardanov Ansel Renatovich
Student
*Kazan State Power Engineering University, Kazan,
Russia*

Шинкевич Татьяна Олеговна
Канд. техн. Наук, доцент
SPIN – код автора: 9724-1390
*Казанский государственный энергетический
университет, Казань, Россия*

Shinkevich Tatyana Olegovna
Cand.Tech.Sci., associate professor
RSCI SPIN-code: 9724-1390
*Kazan State Power Engineering University, Kazan,
Russia*

Усиливающиеся требования к качеству воздуха и охране окружающей среды стимулируют разработку инновационных технологий для очистки газов в различных отраслях промышленности. Данное исследование посвящено оценке эффективности работы цилиндрического сепаратора, предназначенного для улавливания мелких частиц из запылённого газового потока. Конструкция устройства оптимизирована для повышения эффективности за счёт использования центробежных сил, способствующих осаждению частиц на стенках сепаратора. Результаты показали, что цилиндрический сепаратор демонстрирует высокую эффективность при улавливании частиц размером более 4 мкм, достигая до 90% при скорости потока около 10 м/с. Однако для частиц размером менее 1 мкм эффективность остаётся ниже 20%, что указывает на необходимость дополнительных фильтрационных ступеней для удаления мелкодисперсной пыли. Моделирование также выявило, что увеличение скорости потока способствует повышению эффективности для частиц среднего и крупного размеров благодаря усилению центробежных сил. При этом устройство сохраняет низкие потери давления, не превышающие 800 Па даже при высоких скоростях потока, что критически важно для снижения эксплуатационных затрат. В заключение исследования установлено, что цилиндрический сепаратор является эффективным решением для предприятий, нуждающихся в очистке газов от частиц среднего размера. Однако для более мелких фракций пыли рекомендуется использование

The increasing demands for air quality and environmental protection drive the development of innovative gas purification technologies across various industries. This study focuses on evaluating the performance of a cylindrical separator designed to capture fine particles from dust-laden gas streams. The device's construction is optimized to enhance efficiency by utilizing centrifugal forces to promote particle deposition on the separator's walls. The results indicate that the cylindrical separator demonstrates high efficiency in capturing particles larger than 4 μm , achieving up to 90% efficiency at a gas flow velocity of approximately 10 m/s. However, for particles smaller than 1 μm , the efficiency remains below 20%, highlighting the need for additional filtration stages to effectively remove fine dust. The simulations also revealed that increasing the gas flow velocity improves the capture efficiency for medium and larger particles due to stronger centrifugal forces. At the same time, the device maintains low pressure losses, not exceeding 800 Pa even at higher flow velocities, which is critical for reducing operational costs. In conclusion, the study establishes that the cylindrical separator is an effective solution for industries that require gas cleaning from medium-sized particles. However, for finer dust fractions, supplementary filtration methods are recommended to meet air quality standards. The proposed separator design offers a balance between high capture efficiency and energy efficiency, making it suitable for applications in the agro-industrial sector

дополнительных методов фильтрации для достижения требуемых стандартов чистоты воздуха. Предлагаемая конструкция сепаратора обеспечивает баланс между высокой эффективностью и энергоэффективностью, что делает его подходящим для применения в агропромышленном секторе

Ключевые слова: ЦИЛИНДРИЧЕСКИЙ СЕПАРАТОР, ПЫЛЕУЛАВЛИВАНИЕ, ОЧИСТКА ГАЗОВ, УЛАВЛИВАНИЕ ЧАСТИЦ, ЦЕНТРОБЕЖНЫЕ СИЛЫ, ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ANSYS FLUENT, АГРОПРОМЫШЛЕННОЕ ПРИМЕНЕНИЕ, КАЧЕСТВО ВОЗДУХА, ЗАПЫЛЁННЫЕ ГАЗОВЫЕ ПОТОКИ

Keywords: CYLINDRICAL SEPARATOR, DUST COLLECTION, GAS PURIFICATION, PARTICLE CAPTURE, CENTRIFUGAL FORCES, NUMERICAL MODELING, ANSYS FLUENT, AGRO-INDUSTRIAL APPLICATIONS, AIR QUALITY, DUST-LADEN GAS STREAMS

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-204-032>

Введение. Одной из ключевых задач агропромышленного сектора является улучшение систем обработки зерна и других сыпучих материалов, особенно в условиях крупнотоварного производства. В последние годы в аграрном секторе усилился интерес к технологиям, направленным на уменьшение потерь при переработке сельскохозяйственной продукции и повышение качества получаемых материалов. Эффективное удаление примесей и посторонних включений из зернового сырья является важной задачей, так как напрямую влияет на качество конечного продукта, его сохранность и стоимость на рынке.

Технологические решения в этой области должны обеспечивать высокую степень очистки при минимальных затратах энергии и максимальной производительности оборудования. В то же время растут требования к надежности и долговечности оборудования, что особенно актуально для предприятий, работающих в условиях круглогодичной эксплуатации [1].

Для достижения этих целей необходимо применять инновационные подходы и усовершенствовать существующие конструкции, учитывая современные достижения в области механики и аэродинамики. Проблематика внедрения таких решений включает не только технические,

<http://ej.kubagro.ru/2024/10/pdf/32.pdf>

но и экономические аспекты, что требует системного подхода к разработке новых технологий.

Состояние исследований и актуальность проблемы.

Исследования в области сепарации зерновых и других сыпучих материалов ведутся уже несколько десятилетий, однако до сих пор существует значительный потенциал для повышения эффективности данного процесса. Традиционные методы очистки зерна часто не справляются с задачей удаления мелкодисперсных частиц и легких примесей, что особенно заметно при работе с влажным или загрязнённым сырьём. Развитие технологий сепарации направлено на увеличение производительности и точности очистки, что позволяет сократить потери и повысить выход готового продукта.

Существующие на сегодняшний день цилиндрические сепараторы демонстрируют высокие эксплуатационные характеристики, однако имеют ряд ограничений, связанных с потерями материала и затратами энергии на процесс. Оптимизация таких систем требует комплексного подхода, включающего как улучшение конструкции, так и применение новых материалов, обладающих высокой износостойкостью. Современные разработки в области аэродинамики и гидродинамики способствуют созданию более совершенных моделей сепараторов, которые способны работать с разными типами сырья и обеспечивать высокую степень очистки.

Актуальность исследований в данной области обусловлена растущей потребностью аграрного сектора в инновационных решениях, которые позволяют сократить затраты на производство и улучшить качество продукции. В условиях глобализации и усиления конкуренции на международных рынках, сельскохозяйственные предприятия стремятся к внедрению более эффективных технологий переработки. Это требует

новых подходов к проектированию оборудования, учитывающих как экономическую эффективность, так и устойчивое развитие производства.

Для повышения улавливания частиц, которые прилипают к стенкам устройства, предлагается цилиндрический сепаратор (рис. 1).

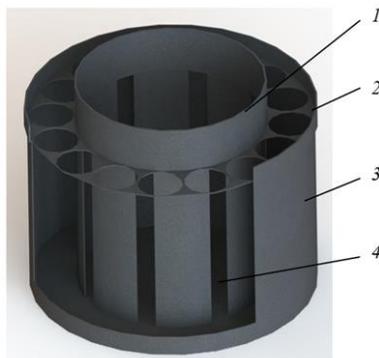


Рисунок 1 – Цилиндрический сепаратор: 1 – первая цилиндрическая труба (поступает газ); 2 – круглые отверстия для выхода газа; 3 – внешняя стенка; 4 – щели

Принцип работы устройства основан на использовании центробежных сил, создаваемых при закручивании потока газа внутри цилиндрической камеры. Внутри аппарата возникают центробежные силы, которые отбрасывают твердые частицы к стенкам устройства.

Попадая на стенки цилиндра, мелкие частицы либо оседают на них, либо прилипают к внутренней поверхности сепаратора под воздействием межмолекулярных и электростатических сил. В процессе движения поток разделяется на очищенный газ, выходящий через выпускные отверстия, и частицы, которые оседают в специальных отстойниках.

Цель исследований. Целью работы является оценка улавливания твердых частиц цилиндрическим сепаратором.

Материалы и методы исследований. Для проведения исследования эффективности работы цилиндрического сепаратора было использовано численное моделирование. В качестве инструмента для расчетов и анализа применялся программный комплекс ANSYS Fluent, обладающий широкими возможностями для решения задач аэродинамики и

теплообмена. Моделирование проводилось в трехмерной постановке, что позволяло учесть все особенности движения частиц в газовом потоке и обеспечить более точное представление о процессе сепарации.

Основой для моделирования служила геометрическая модель цилиндрического сепаратора, которая была создана с учетом реальных размеров устройства. В процессе разработки модели были детализированы все ключевые элементы: входной патрубок для подачи газового потока, щели для создания закручивания потока, а также выходные отверстия для выпуска очищенного газа. Входной поток газа характеризовался скоростью в диапазоне от 3 до 19 м/с

В ходе численного моделирования был применен метод дискретных фаз (Discrete Phase Model), который учитывал движение частиц под воздействием аэродинамических сил. Для описания взаимодействия частиц с поверхностями сепаратора использовались условия прилипания и отражения. Это позволило исследовать два крайних случая: когда частицы прилипают к стенкам устройства и когда они отталкиваются от них без оседания. Подобный подход обеспечивал комплексное понимание влияния различных факторов на улавливание частиц.

Для количественной оценки эффективности использовалось соотношение между количеством частиц, попавших в сепаратор, и числом частиц, которые остались в газе на выходе из устройства. Эффективность улавливания рассчитывалась в процентах как разница между исходным количеством частиц и числом частиц, оставшихся в очищенном потоке, деленная на общее количество частиц на входе.

Результаты исследований. В ходе численного моделирования работы цилиндрического сепаратора была исследована его эффективность при очистке запыленного газового потока от мелкодисперсных частиц разного размера. Полученные результаты представлены на рисунке 3, который иллюстрирует зависимость эффективности захвата частиц от

скорости газового потока для частиц размером 1, 4, 7 и 10 мкм при условии их отражения от стенок сепаратора.

Для частиц минимального размера (1 мкм) эффективность улавливания остается на низком уровне, даже при увеличении скорости газа до 19 м/с. Это объясняется тем, что такие мелкие частицы обладают низкой инерцией и, следовательно, могут легко следовать за потоком, практически не оседая на стенках устройства. Максимальная эффективность для этих частиц составила не более 20%, что свидетельствует о необходимости дополнительных стадий очистки при работе с высокодисперсными аэрозолями.

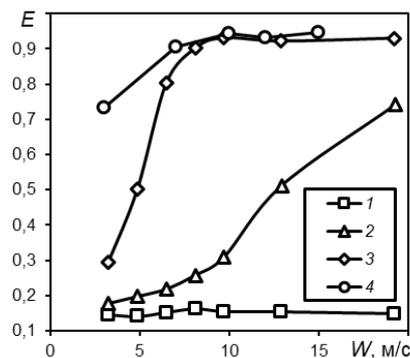


Рисунок 2 – Эффективность цилиндрического сепаратора от скорости. Размер частиц, мкм: 1 - 1, 2 - 4, 3 - 7, 4 - 10

С другой стороны, для частиц диаметром 4 мкм наблюдается более выраженное влияние скорости потока на эффективность улавливания. На начальных этапах увеличения скорости (до 5 м/с) эффективность резко возрастает, достигая значений около 50-60%. При дальнейшем повышении скорости до 10 м/с эффективность стабилизируется на уровне 70-75%, что свидетельствует о достижении оптимальных условий для захвата частиц такого размера.

Особенно высокие результаты были получены для частиц крупного размера (7 и 10 мкм). Для частиц размером 7 мкм эффективность улавливания быстро возрастает при скорости потока от 3 до 5 м/с, достигая

значений около 90%, после чего выходит на плато. Для частиц диаметром 10 мкм даже при минимальных скоростях потока (около 3 м/с) эффективность уже превышает 90%, что объясняется высокой инерцией таких частиц, которые под действием центробежных сил быстрее отклоняются к стенкам сепаратора и оседают на них.

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод о том, что эффективность работы сепаратора напрямую зависит как от размера частиц, так и от скорости газового потока. При оптимальных значениях скорости и соответствующих размерах частиц достигается высокая степень очистки, что подтверждает целесообразность использования данного типа сепараторов для очистки газов от более крупных фракций пыли. Тем не менее, для улавливания частиц размером менее 4 мкм могут потребоваться дополнительные устройства очистки или многоступенчатые системы, так как цилиндрический сепаратор в одиночку не обеспечивает достаточно высокой эффективности при работе с мелкодисперсными аэрозолями.

Кроме того, численный анализ показал, что при скорости потока выше 10 м/с, эффективность улавливания частиц размером 4 мкм и более остаётся стабильно высокой, при этом потери давления в устройстве не превышают критического уровня в 800 Па, что указывает на его высокую экономичность и низкое энергопотребление. Такой результат является значительным преимуществом при промышленном использовании устройства, так как позволяет снизить эксплуатационные расходы на очистку газовых выбросов.

На основе проведённого исследования рекомендуется использовать цилиндрический сепаратор для улавливания частиц диаметром 4 мкм и более, особенно в тех случаях, когда требуется высокая степень очистки и экономичность процесса. Для более мелких частиц (менее 4 мкм) целесообразно внедрение дополнительных ступеней очистки, таких как

рукавные фильтры или системы мокрой очистки, для повышения общей эффективности пылеулавливающей системы.

Выводы. 1. Устройство демонстрирует высокую степень улавливания для частиц диаметром 7 мкм и более, достигая значений до 90% уже при относительно низких скоростях газового потока (около 5 м/с). Для мелкодисперсных частиц размером 1 мкм эффективность остаётся низкой, даже при высоких скоростях, что указывает на ограниченные возможности данного устройства для захвата мельчайших фракций. 2. Увеличение скорости входного газового потока способствует росту эффективности улавливания частиц среднего и крупного размера. Оптимальный диапазон скоростей для максимальной эффективности составляет 10–15 м/с. Однако, для частиц размером менее 4 мкм увеличение скорости не приводит к значительному росту эффективности, что требует рассмотрения других технологий для очистки газов от таких частиц. 3. Моделирование показало, что цилиндрический сепаратор обеспечивает стабильно низкие потери давления, не превышающие 800 Па при скорости потока до 19 м/с.

Библиографический список

1. Абдуллина, А. А. Сравнение сепарационных элементов различной формы в пылеуловительном устройстве при очистке запыленного воздуха от пищевой пыли / А. А. Абдуллина, В. Э. Зинуров, Л. Т. Воронина, И. А. Валиуллин // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2024. – № 199. – С. 1-8.

References

1. Abdullina, A. A. Sravnenie separacionnyh jelementov razlichnoj formy v pylulovitel'nom ustrojstve pri ochistke zapylennogo vozduha ot pishhevoj pyli / A. A. Abdullina, V. Je. Zinurov, L. T. Voronina, I. A. Valiullin // Politematicheskij setevoj jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2024. – № 199. – S. 1-8.