

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)

### СЕПАРАЦИОННОЕ УСТРОЙСТВО С МНОГОСТУПЕНЧАТЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ДЛЯ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

### SEPARATION DEVICE WITH MULTI-STAGE ELEMENTS FOR THE AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX

Насырова Илюза Ильшатовна  
Студент  
SPIN – код автора: 8260-4618  
*Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия*

Nasyrova Ilyuza Ilshatovna  
Student  
RSCI SPIN-code: 8260-4618  
*Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia*

Рукавишников Виктор Алексеевич  
Д-р пед. наук, профессор  
*Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия*

Rukavishnikov Viktor Alekseevich  
Dr.Ped.Sci., Professor  
*Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia*

В статье рассмотрены результаты численного моделирования и анализа работы сепарационного устройства, предназначенного для очистки газовых потоков от мелкодисперсных твердых частиц в условиях агропромышленного комплекса. Основной особенностью разработанного устройства является использование многоступенчатых структурных элементов, высота которых изменяется от центра к периферии. Такая геометрия позволяет перераспределять потоки газа, минимизировать турбулентность и улучшать селективность осаждения частиц. Численное моделирование проведено с использованием программного комплекса ANSYS Fluent. В расчетах применялись уравнения Навье-Стокса, дополненные моделью турбулентности SST. Исследования охватывали диапазон частиц от 1 до 9 мкм и начальные скорости газового потока в пределах технологических условий. Результаты показали, что устройство эффективно улавливает частицы диаметром от 1 до 5 мкм при использовании 8–10 рядов элементов, достигая эффективности более 75%. Однако для частиц большего диаметра (7–9 мкм) эффективность снижается из-за их склонности к отскоку от элементов конструкции и возврату в поток. Это указывает на необходимость дальнейшей оптимизации геометрии устройства для улучшения удержания крупных частиц. Анализ показал, что снижение числа рядов элементов приводит к увеличению турбулентности, что негативно сказывается на общей эффективности устройства, особенно для более крупных частиц. Дополнительно выявлено, что оптимизация геометрии устройства и выбор материала элементов могут существенно снизить

The article presents the results of numerical modeling and analysis of a separation device designed for cleaning gas flows from fine solid particles in the agro-industrial complex. The main feature of the developed device is the use of multi-stage structural elements whose height decreases from the center to the periphery. This geometry enables the redistribution of gas flows, minimizes turbulence, and enhances the selectivity of particle deposition. Numerical modeling was conducted using the ANSYS Fluent software package. The calculations applied the Navier-Stokes equations supplemented with the SST turbulence model. The study covered particle sizes ranging from 1 to 9 microns and initial gas flow velocities within operational limits. The results showed that the device effectively captures particles with diameters of 1 to 5 microns when using 8–10 rows of elements, achieving an efficiency of over 75%. However, for larger particles (7–9 microns), efficiency decreases due to their tendency to rebound from the structural elements and re-enter the flow. This highlights the need for further optimization of the device geometry to improve the retention of larger particles. The analysis also demonstrated that reducing the number of element rows increases turbulence, which negatively affects the overall device efficiency, particularly for larger particles. Additionally, it was found that optimizing the geometry and selecting suitable materials for the structural elements can significantly reduce hydraulic resistance while maintaining high deposition efficiency. The results can be applied both in the development of new devices and the modernization of existing technologies, making them relevant for a wide range of industrial processes

гидравлическое сопротивление при сохранении высокой эффективности осаждения. Результаты могут быть применимы как при разработке новых устройств, так и при модернизации существующих технологий, что делает их значимыми для широкого спектра производственных процессов

Ключевые слова: СЕПАРАЦИЯ, МЕЛКОДИСПЕРСНЫЕ ЧАСТИЦЫ, МНОГОСТУПЕНЧАТЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ, АГРОПРОМЫШЛЕННОСТЬ, ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОСАЖДЕНИЯ, ГИДРОДИНАМИКА

Keywords: SEPARATION, FINE PARTICLES, MULTI-STAGE ELEMENTS, AGRO-INDUSTRY, NUMERICAL MODELING, DEPOSITION EFFICIENCY, HYDRODYNAMICS

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-204-057>

**Введение.** Современные агропромышленные технологии активно развиваются, обеспечивая повышение эффективности процессов переработки и подготовки сельскохозяйственного сырья. Значительная часть таких технологий связана с использованием инновационных устройств, которые улучшают качество обработки материала, снижают затраты ресурсов и минимизируют потери. В условиях возрастающего спроса на экологически чистую продукцию и необходимость адаптации к мировым стандартам производства, разработка новых решений для эффективной очистки и сепарации частиц приобретает особую актуальность.

Традиционные устройства для сепарации часто не обеспечивают требуемую производительность или точность, особенно при работе с мелкодисперсными или сложными многокомпонентными смесями. Это создает необходимость в проектировании новых конструкций, которые могли бы сочетать высокую надежность, низкое энергопотребление и способность к работе с широким диапазоном частиц.

Достижение высокой эффективности в процессах сепарации напрямую зависит от способности устройств обеспечивать оптимальные гидродинамические условия. Использование новых конструктивных решений, в том числе элементов с изменяющимися геометрическими

<http://ej.kubagro.ru/2024/10/pdf/57.pdf>

характеристиками, позволяет минимизировать зоны турбулентности и оптимизировать движение потока, что критически важно для улучшения селективности.

В последние годы в области разработки сепарационного оборудования активно используются междисциплинарные подходы, объединяющие инженерные и физико-химические исследования. Это позволяет создавать устройства, способные эффективно функционировать в условиях разнообразных технологических процессов.

Кроме того, увеличение роли цифровых технологий в проектировании и эксплуатации машин способствует более глубокому анализу рабочих процессов. Методы численного моделирования позволяют не только прогнозировать поведение потоков, но и оперативно корректировать параметры конструкции для достижения оптимальных характеристик. Это открывает новые перспективы для создания высокоэффективных и адаптивных сепарационных устройств, которые могут быть интегрированы в существующие технологические линии сельского хозяйства.

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

Сепарационные устройства различных конструкций на протяжении многих лет остаются объектом активного изучения. Традиционные подходы, такие как использование циклонов, вибрационных сит и гравитационных сепараторов, демонстрируют устойчивые результаты при обработке крупных частиц. Однако при работе с мелкодисперсными частицами или высокодисперсными аэрозолями эффективность таких устройств существенно снижается. Это связано с ограничениями геометрических параметров и физико-химических свойств обрабатываемых материалов.

На данный момент активно изучаются методы применения турбулентных потоков, поверхностных фильтров, а также конструкций с динамически изменяющимися параметрами. В работах последних лет

подчеркивается необходимость оптимизации конструкции элементов сепараторов, поскольку их форма и расположение оказывают непосредственное влияние на гидродинамику и распределение потоков.

Перспективным направлением является использование элементов с многоступенчатыми профилями (рис. 1), которые создают дополнительные барьеры для движения частиц. Такие конструкции позволяют более точно управлять потоком газа, снижая гидравлическое сопротивление и увеличивая удельную площадь контакта фаз. Однако в научной литературе вопросы взаимодействия мелкодисперсных частиц с такими элементами пока изучены недостаточно.

Дополнительным вызовом является необходимость адаптации новых конструкций к условиям эксплуатации в агропромышленности, где устройства должны обеспечивать стабильную работу при высокой запыленности и изменении параметров сырья. Для достижения этой цели требуется глубокое понимание механики взаимодействия частиц с элементами конструкции, что стимулирует развитие фундаментальных и прикладных исследований в данной области [1].

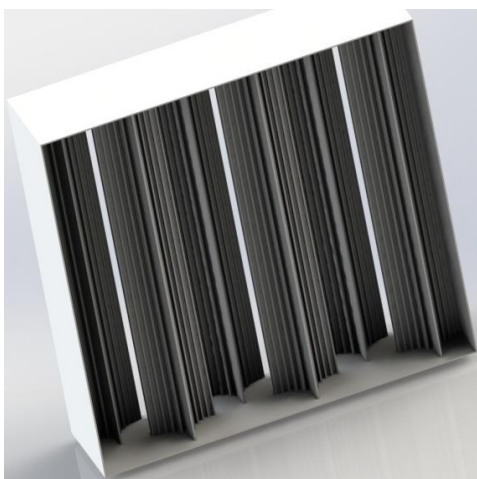


Рисунок 1 – Устройство, включающее элементы с многоступенчатыми профилями

**Цель исследований.** Целью работы является оценка очистки запыленных потоков с помощью устройства, включающего элементы с многоступенчатыми профилями.

**Материалы и методы исследований.** Для исследования эффективности работы сепарационного устройства была разработана новая конструкция с многоступенчатыми структурными элементами (рис. 1), которые формируют оптимальные условия для осаждения мелкодисперсных частиц. Конструкция представляет собой корпус, внутри которого расположены элементы с переменной высотой, организованные так, чтобы максимизировать взаимодействие между потоком газа и частицами. Высота элементов изменяется от центра к периферии, что способствует перераспределению потоков и снижению их турбулентности.

Для расчетов в Ansys Fluent использовались уравнения Навье-Стокса и уравнение сохранения массы, дополненные моделью турбулентности SST (Shear Stress Transport). Эта модель обеспечивает высокую точность прогнозирования характеристик потока в условиях сложной геометрии устройства. Расчеты проводились для различных начальных скоростей газового потока и диапазона размеров частиц от 1 до 10 мкм, что позволяет оценить влияние этих параметров на эффективность осаждения.

Геометрические параметры устройства включали несколько рядов элементов, каждый из которых состоял из структур с переменной толщиной и высотой. Между рядами сохранялось пространство, достаточное для свободного прохождения потока и минимизации потерь давления. Поток газа, состоящий из воздуха с примесями твердых частиц, вводился в устройство с фиксированной скоростью на входе, а на выходе поддерживались стандартные атмосферные условия.

В ходе исследований рассчитывались такие параметры, как количество осевших частиц, распределение скорости потока и величина потерь давления. Результаты моделирования позволили выявить

оптимальные геометрические характеристики устройства, обеспечивающие высокую эффективность осаждения частиц при минимальных энергозатратах.

**Результаты исследований.** Анализ визуализации движения газового потока, выполненный в ходе численного моделирования, позволил выявить особенности формирования структуры потока в пределах конструкции сепарационного устройства. В центральной части устройства наблюдается упорядоченное движение с минимальной турбулентностью, что связано с максимальной высотой элементов, направляющих поток. По мере приближения к периферии устройства интенсивность завихрений возрастает, что способствует увеличению вероятности контакта твердых частиц с поверхностью элементов.

Проведенные расчеты также показали, что взаимодействие газа с многоступенчатыми элементами создает характерные зоны замедления и рециркуляции. Эти зоны формируются благодаря особой геометрии элементов, где изменение их высоты от центра к краям позволяет перераспределить энергию потока. Такая структура движения газа способствует более равномерному распределению частиц в потоке, увеличивая вероятность их осаждения на элементах. Кроме того, модель продемонстрировала, что наличие рециркуляционных зон повышает эффективность осаждения частиц малого диаметра за счет их задержки в пространстве, прилегающем к поверхностям элементов.

На основе численного моделирования была исследована зависимость эффективности устройства от размера частиц и количества рядов элементов. Данные показали, что эффективность сепаратора остается стабильной для частиц диаметром от 1 до 5 мкм при использовании 8 или 10 рядов структурных элементов. Однако для более крупных частиц (7–9 мкм) наблюдается значительное снижение эффективности, особенно при уменьшении количества рядов до 6 или 4.

Падение эффективности осаждения крупных частиц связано с их склонностью к отскоку от поверхности элементов. При контакте с элементами конструкции такие частицы часто возвращаются в основной поток, снижая вероятность их удержания. Этот эффект особенно заметен при уменьшении количества рядов элементов, что приводит к недостаточной структуризации потока и увеличению скорости газа в критических зонах устройства.

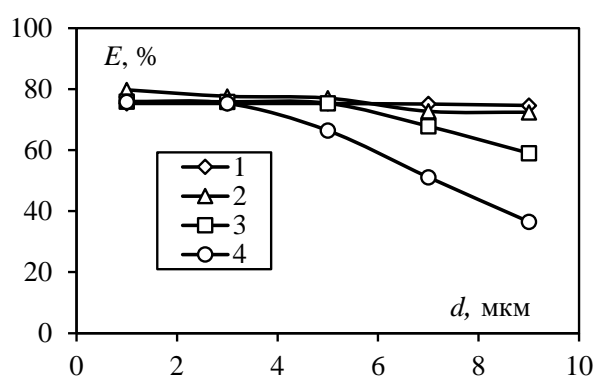


Рисунок 2 – Эффективность устройства с элементами с многоступенчатыми профилями от диаметра частиц. Количество рядов, шт: 1 - 10, 2 - 8, 3 - 6, 4 - 4

Кроме того, визуализация распределения скоростей потока показала, что при уменьшении числа рядов возникает неравномерность распределения потоков и образование застойных зон с пониженной эффективностью осаждения. В частности, при использовании 4 рядов элементов осаждение частиц диаметром 9 мкм составило всего 36,5%, что более чем в два раза ниже, чем при использовании 8 рядов. Это связано с увеличением турбулентности и снижением площади контакта фаз, что приводит к потере части частиц, не взаимодействующих с элементами конструкции.

Таким образом, оптимальное сочетание количества рядов и геометрических характеристик элементов позволяет достичь высокой эффективности улавливания частиц, минимизируя гидравлическое сопротивление. Данные исследования подчеркивают важность

комплексного подхода к проектированию сепараторов для работы в условиях агропромышленного комплекса, где требуется высокая надежность и эффективность даже при варьирующихся условиях эксплуатации.

**Выводы.** 1. Устройство с многоступенчатыми структурными элементами показало высокую эффективность осаждения частиц диаметром 1–5 мкм, достигая более 75% при использовании 8–10 рядов элементов. 2. Для частиц диаметром 7–9 мкм наблюдается снижение эффективности осаждения, обусловленное их склонностью к отскоку от элементов конструкции и возврату в основной поток. Это подчеркивает необходимость доработки конструкции для повышения удержания крупных частиц, например, за счет изменения геометрии или покрытия элементов. 3. Число рядов элементов существенно влияет на гидродинамику устройства и эффективность улавливания частиц. Увеличение числа рядов до 8–10 позволяет добиться оптимального распределения потоков и минимизации турбулентности.

#### Библиографический список

1. Улавливание мелкодисперсных твердых частиц из газовых потоков в прямоугольных сепараторах / А. В. Дмитриев, В. Э. Зинуров, О. С. Дмитриева, Л. Нгуен Ву // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2018. – Т. 22, № 3(134). – С. 138-144.

#### References

1. Ulavlivanie melkodispersnyh tverdyh chastic iz gazovyh potokov v prjamougol'nyh separatorah / A. V. Dmitriev, V. Je. Zinurov, O. S. Dmitrieva, L. Nguen Vu // Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta. – 2018. – Т. 22, № 3(134). – С. 138-144.