

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)

### **СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УЛАВЛИВАНИЯ ЧАСТИЦ РАЗЛИЧНЫМИ СЕПАРАЦИОННЫМИ УСТРОЙСТВАМИ ДЛЯ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО СЕКТОРА**

### **COMPARISON OF PARTICLE CAPTURE EFFICIENCY BY VARIOUS SEPARATION DEVICES FOR THE AGRO-INDUSTRIAL SECTOR**

Абдуллина Азалия Айратовна

Студент

SPIN – код автора: 8779-4251

*Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия*

Abdullina Azaliya Airatovna

Student

RSCI SPIN-code: 8779-4251

*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*

Сепарация мелкодисперсных частиц представляет собой особую сложность, так как эти частицы склонны к агрегации и с трудом поддаются разделению традиционными методами. Растущие требования к качеству обработки продукции и соблюдению экологических стандартов стимулируют разработку инновационных подходов к технологиям сепарации. В рамках исследования разработано новое устройство с V-образными инерционными элементами, направленное на повышение эффективности разделения мелкодисперсных частиц. Рассматривались различные конфигурации устройства с изменением углов раствора V-образных элементов (на 45°, 60°, 90° и 120°. Для анализа процессов применялось численное моделирование в программной среде ANSYS Fluent, что позволило детально изучить поведение газовых потоков и взаимодействие частиц в сложных геометрических условиях. Результаты показали, что устройство демонстрирует высокую эффективность очистки, достигающую 70–90% при низких скоростях потока на входе (0,5–1 м/с). Использование V-образных инерционных элементов в сепарационных устройствах открывает перспективы для повышения эффективности очистки мелкодисперсных частиц в агропромышленности, особенно при соблюдении контролируемых условий потока. Дальнейшая оптимизация таких конструкций может способствовать созданию энергоэффективных и экологически безопасных технологий

The separation of fine particles poses a significant challenge, as these particles tend to aggregate and are difficult to separate using traditional methods. Increasing demands for high-quality product processing and compliance with environmental standards drive the development of innovative approaches to separation technologies. As part of this research, a new device with V-shaped inertial elements was developed to improve the efficiency of fine particle separation. Various device configurations were considered by adjusting the angles of the V-shaped elements (45°, 60°, 90°, and 120°). The results showed that the device demonstrated high separation efficiency, reaching 70–90% at low inlet flow velocities (0.5–1 m/s). The use of V-shaped inertial elements in separation devices offers promising prospects for enhancing the efficiency of fine particle separation in the agro-industrial sector, particularly under controlled flow conditions. Further optimization of such designs may contribute to the development of energy-efficient and environmentally friendly technologies

Ключевые слова: АГРОПРОМЫШЛЕННЫЕ

Keywords: AGRO-INDUSTRIAL TECHNOLOGIES,

ТЕХНОЛОГИИ, СЕПАРАЦИЯ  
МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ, V-ОБРАЗНЫЕ  
ИНЕРЦИОННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ, ЧИСЛЕННОЕ  
МОДЕЛИРОВАНИЕ, ANSYS FLUENT,  
ЭФФЕКТИВНОСТЬ СЕПАРАЦИИ, ОЧИСТКА ОТ  
ПРИМЕСЕЙ, ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ

FINE PARTICLE SEPARATION, V-SHAPED  
INERTIAL ELEMENTS, NUMERICAL  
MODELING, ANSYS FLUENT, SEPARATION  
EFFICIENCY, IMPURITY REMOVAL, ENERGY  
EFFICIENCY

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-205-001>

**Введение.** Современные технологии в агропромышленном комплексе требуют эффективных решений для очистки зерновых масс и продуктов их переработки от примесей. Этот процесс существенно влияет на качество конечного продукта и играет важную роль в обеспечении экономической эффективности производства. Сепарация мелкодисперсных частиц представляет собой особую сложность, так как эти частицы обладают высокой склонностью к агрегации и с трудом поддаются разделению традиционными методами.

Растущие требования к качеству обработки сельскохозяйственной продукции и соблюдению экологических норм подталкивают к разработке новых подходов в области сепарационных технологий. Применение инновационных конструкций, способных эффективно справляться с задачей разделения мелкодисперсных частиц, становится важным направлением научных исследований и разработок.

В условиях интенсивного развития аграрного сектора особую значимость приобретает поиск решений, позволяющих минимизировать потери продукции и повысить ее ценность на рынке. Для этого необходимы системы, способные работать с высоким уровнем производительности при сохранении энергоэффективности и экономической целесообразности.

Кроме функциональности, современное оборудование должно отвечать критериям экологической устойчивости. В условиях ужесточения нормативов по выбросам пыли и мелкодисперсных частиц необходимость минимизации их воздействия на окружающую среду становится

<http://ej.kubagro.ru/2025/01/pdf/01.pdf>

важнейшей задачей. Это актуально не только с точки зрения соблюдения законодательства, но и с точки зрения повышения конкурентоспособности продукции на международных рынках.

Разработка универсальных сепарационных систем, которые могут эффективно работать с различными видами сельскохозяйственного сырья, является одной из ключевых задач. Такие устройства должны адаптироваться к изменениям в характеристиках сырья, включая его влажность, размеры частиц и содержание примесей. Это требует междисциплинарного подхода, объединяющего знания в области механики, материаловедения, аэродинамики и вычислительной техники.

Дополнительным направлением, требующим внимания, является снижение эксплуатационных затрат на обслуживание и ремонт сепарационного оборудования. Применение новых материалов с повышенной износостойкостью, а также внедрение цифровых технологий для мониторинга и управления процессом сепарации открывают новые горизонты для повышения эффективности работы агропромышленных предприятий.

**Состояние исследований и актуальность проблемы.** Вопросы, связанные с сепарацией мелкодисперсных частиц, находятся в центре внимания множества исследовательских групп по всему миру. Существующие методы, включая аэродинамическое разделение, гравитационное осаждение и использование циклонов, обладают как преимуществами, так и ограничениями. Например, циклоны являются высокоэффективными устройствами для грубой очистки, однако их эффективность существенно снижается при работе с частицами размером менее 10 микрон.

В последние годы значительное внимание уделяется разработке инерционных сепарационных систем. Такие устройства способны разделять частицы на основе их массы и инерционных свойств, что

позволяет преодолевать ограничения традиционных методов. Использование V-образных инерционных элементов в конструкции сепараторов открывает новые возможности для повышения эффективности процессов разделения. Однако вопросы оптимизации конструкции и условий работы таких систем остаются недостаточно исследованными.

Современные исследования показывают, что численное моделирование является мощным инструментом для прогнозирования эффективности различных конструкций сепараторов. Использование программных комплексов, таких как ANSYS Fluent, позволяет не только детально изучать поведение частиц в сложных потоках, но и адаптировать конструкции для конкретных технологических условий. Это особенно важно в агропромышленном секторе, где требования к универсальности и надежности оборудования постоянно возрастают.

Особое внимание уделяется вопросам оптимизации конструкции сепарационных устройств для работы с мелкодисперсными частицами в условиях высоких скоростей потоков. Высокая инерция частиц и их взаимодействие с элементами конструкции часто приводят к вторичному загрязнению, что требует внедрения новых подходов к геометрии элементов и материалов.

Кроме того, одной из актуальных задач является разработка методов снижения энергозатрат при работе сепарационных систем. Это включает как оптимизацию геометрии потоков, так и использование энергосберегающих технологий, например, рециркуляции газов или интеллектуального управления процессами. Таким образом, комплексный подход к решению данных проблем позволит не только улучшить производительность, но и сократить затраты на эксплуатацию оборудования.

Стабильное развитие агропромышленного комплекса требует интеграции новых технологий, сочетающих высокую эффективность с

минимальным воздействием на экологию. Успешное решение задач в области сепарации мелкодисперсных частиц может значительно повысить производительность предприятий, улучшить качество продукции и обеспечить устойчивость отрасли в долгосрочной перспективе.

**Цель исследований.** Сравнение эффективности различных конструкций нового разработанного сепарационного устройства.

**Материалы и методы исследований.** В данной работе было рассмотрено изменение в устройстве с сепарирующими V-образными элементами [1] угла раствора этих элементов  $\alpha$  (рис.1); для этого были созданы 4 конструкции: №1 – с углом раствора  $45^{\circ}$ , №2 –  $60^{\circ}$ , №3 –  $90^{\circ}$ , №4 –  $120^{\circ}$ .

В рамках исследования создана математическая модель, предназначенная для описания процессов захвата мелкодисперсных частиц в предложенном устройстве. Для разработки модели использовалось специализированное программное обеспечение ANSYS Fluent, которое предоставляет широкий функционал для решения задач гидродинамики и анализа потоков с участием нескольких фаз. Эта программа позволяет тщательно исследовать динамику газовых потоков и их взаимодействие с твердыми частицами даже в условиях сложной геометрии системы.

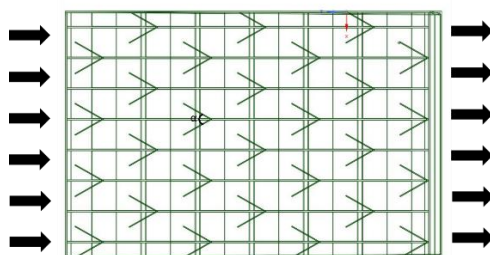


Рисунок 1 – Вид сверху на новое устройство с сепарирующими V-образными элементами.

С целью анализа результативности процесса сепарации, то есть эффективности устройства, проводилось исследование, направленное на

определение доли частиц, успешно отделяемых от газового потока в ходе его прохождения через сепаратор. Отметим, что размер частиц был различен и составлял от 10 до 316 мкм, а их плотность была равна 4000 кг/м<sup>3</sup>. Для начала определялась эффективность каждой фракции согласно формуле (1):

$$E_i = 1 - \frac{N_{\text{пок}}}{N}, \quad (1)$$

где  $E_i$  – фракционная эффективность устройства;  $N_{\text{пок}}$  и  $N$  – число частиц определенной фракции, покинувших сепарационное устройство и общее, соответственно.

Так как целью данной работы является сравнение эффективности различных устройств в целом, то далее согласно (2) определялась средняя эффективность устройства, как среднее арифметическое фракционных эффективностей:

$$E_{\text{cp}} = \frac{\sum E_i}{n}, \quad (2)$$

где  $E_{\text{cp}}$  - средняя эффективность устройства;  $n$  – количество запущенных частиц различной фракции.

**Результаты исследований.** В процессе численного моделирования были получены сведения об эффективности работы устройств при различных скоростях потока на входе в систему  $w$  и различном значении угла раствора  $V$ -образного элемента  $\alpha$  (табл. 1).

Таблица 1 – Средняя эффективность  $E$  сепарационных устройств при различном угле раствора сепарационного углового элемента  $\alpha$  и различной скорости потока на входе  $w$ .

Средняя эффективность $E$ , %				
$w$ , м/с \ $\alpha$ , °	45	60	90	120
0,5	86,9	87,2	87,7	82,1
1	84,8	80,2	79,6	73,4
2	57,3	53,4	59,1	61,9
3	42,6	39,6	43,7	34,8
4	34,6	34,6	31,6	26,7

Для упрощения анализа данных представим их в графическом виде, наглядно демонстрирующем, как средняя эффективность зависит от скорости потока на входе в систему и угла раствора сепарирующих элементов (рис. 2). Согласно полученным значениям, наиболее эффективные результаты очистки, составляющие 73,4% - 86,9%, обеспечиваются при сравнительно низких скоростях, 0,5 - 1 м/с. А при скоростях относительно выше, составляющие 2-4 м/с, эффективность падает 57,3 до 26,7. Данный феномен, скорее всего связан с возвращением частицы обратно в поток при высоком значении ее импульса, который приобретает при ударе о поверхность сепарирующего элемента или стенки устройства.

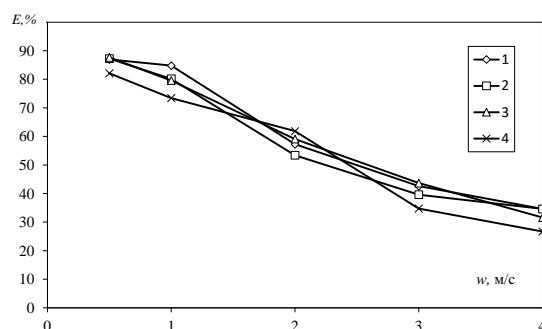


Рисунок 2 – График зависимости средней эффективности устройства от скорости потока на входе при различном значении угла раствора сепарирующего V-образного элемента  $\alpha$ , °: 1-45, 2-60, 3-90, 4-120.

Проведенный анализ конструкций позволяет сделать вывод, что при низких скоростях потока до 0,5 м/с наилучшие результаты достигаются при углах раствора V-образных элементов 90° и 60°, с эффективностью 87,7% и 87,2% соответственно. Для диапазона скоростей 0,5–1 м/с наиболее подходящим вариантом оказывается угол раствора 45°, обеспечивающий эффективность 84,8%. При скорости потока 1–2 м/с максимальную производительность демонстрирует конструкция с углом



раствора  $120^\circ$ , а в диапазоне скоростей 2–3 м/с оптимальным решением является угол  $90^\circ$ , где эффективность достигает 43,7%. На высоких скоростях 3–4 м/с предпочтительными являются конструкции с углами  $45^\circ$  и  $60^\circ$ , показывающие эффективность 34,6%.

Если устройство эксплуатируется при относительно низких скоростях до 1 м/с, конструкция с углом  $45^\circ$  (конструкция №1) оказывается наиболее эффективной, так как обеспечивает практически максимальные показатели эффективности. При анализе всего диапазона скоростей (0,5–4 м/с) конструкция №1 также сохраняет свое лидерство, демонстрируя среднюю эффективность на уровне 61,2%. Для конструкций с углами  $60^\circ$ ,  $90^\circ$  и  $120^\circ$  средняя эффективность составляет 59%, 60,3% и 55,8% соответственно.

**Выводы.** 1. Проведенные исследования показали, что угол раствора V-образных элементов существенно влияет на эффективность разделения при различных скоростях потока. Конструкция с углом  $45^\circ$  обеспечивает стабильную производительность на всем спектре скоростей, что делает ее универсальной для широкого применения. 2. В случае использования устройства при скоростях до 1 м/с предпочтительной будет конструкция №1 с углом раствора  $\alpha=45^\circ$ , так как она обеспечивает максимальную среднюю эффективность порядка 80%.

#### Библиографический список

1. Салахова, Э. И. Влияние сепарационной решетки на эффективность улавливания твердых частиц в устройстве с дугообразными элементами / Э. И. Салахова, В. Э. Зинуров, О. С. Дмитриева, А. В. Дмитриева, А. А. Абдуллина // Вестник Технологического университета. – 2023. – Т. 26. – № 8. – С. 41-46.

#### References

1. Salahova, Je. I. Vlijanie separacionnoj reshetki na jeffektivnost' ulavlivanija tverdyh chastic v ustrojstve s dugoobraznymi jelementami / Je. I. Salahova, V. Je. Zinurov, O. S. Dmitrieva, A. V. Dmitrieva, A. A. Abdullina // Vestnik Tehnologicheskogo universiteta. – 2023. – T. 26. – № 8. – S. 41-46.