

УДК 66.074.2

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

**РАЗРАБОТКА И ЧИСЛЕННОЕ  
МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
СЕПАРАТОРА С СООСНО  
РАСПОЛОЖЕННЫМИ ТРУБАМИ ДЛЯ  
АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА**

Бадретдинова Гузель Рамилевна  
Старший преподаватель  
SPIN – код автора: 8132-6325  
*Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия*

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

Галиев Азат Альбиртович  
Аспирант  
SPIN – код автора: 2980-2531  
*Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия*

Очистка запыленных газовых потоков в агропромышленном комплексе играет ключевую роль в повышении экологической безопасности, снижении износа оборудования и обеспечении стабильности технологических процессов. В данной работе исследуется эффективность сепаратора с соосно расположенными трубами, предназначенного для улавливания твердых частиц, образующихся при переработке сырья. Проведено численное моделирование аэродинамических характеристик и динамики частиц в ANSYS Fluent с использованием трехмерной модели, разработанной в КОМПАС-3D. В ходе исследования проанализированы различные эксплуатационные параметры, включая скорость газового потока и размер твердых включений, что позволило выявить основные закономерности процесса осаждения. Результаты моделирования показали, что эффективность улавливания частиц существенно зависит от их размера и скорости воздушного потока. При скоростях 3–6 м/с эффективность осаждения частиц размером 1 мкм остается на низком уровне (0,41–0,43), тогда как более крупные частицы (7 мкм) достигают показателей 0,97 уже при 6 м/с. С увеличением скорости газа до 10 м/с эффективность улавливания частиц среднего размера (4 мкм) возрастает до 0,9, а для частиц 7 мкм стабилизируется на уровне 0,99. Дальнейшее

UDC 66.074.2

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

**DEVELOPMENT AND NUMERICAL  
MODELING OF THE EFFICIENCY OF A  
SEPARATOR WITH COAXIALLY ARRANGED  
PIPES FOR THE AGRICULTURAL INDUSTRY**

Badretdinova Guzel Ramilevna  
Senior Lecturer  
RSCI SPIN-code: 8132-6325  
*Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia*

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

Galiev Azat Albirtovich  
Postgraduate student  
RSCI SPIN-code: 2980-2531  
*Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia*

The purification of dust-laden gas flows in the agricultural industry plays a crucial role in enhancing environmental safety, reducing equipment wear, and ensuring the stability of technological processes. This study investigates the efficiency of a separator with coaxially arranged pipes designed to capture solid particles generated during raw material processing. Numerical modeling of aerodynamic characteristics and particle dynamics was conducted in ANSYS Fluent using a three-dimensional model developed in KOMPAS-3D. Various operational parameters, including gas flow velocity and particle size, were analyzed to identify the key patterns of particle deposition. The simulation results demonstrated that particle capture efficiency is significantly influenced by particle size and gas velocity. At flow velocities of 3–6 m/s, the deposition efficiency for 1  $\mu\text{m}$  particles remained low (0.41–0.43), while larger particles (7  $\mu\text{m}$ ) achieved an efficiency of 0.97 at 6 m/s. As the gas velocity increased to 10 m/s, the capture efficiency for medium-sized particles (4  $\mu\text{m}$ ) rose to 0.9, while for 7  $\mu\text{m}$  particles, it stabilized at 0.99. Further increases in velocity (up to 15–18 m/s) had minimal impact on the separation efficiency of larger particles, highlighting the ongoing challenge of improving fine particle capture. The developed modeling approach allowed for the identification of key deposition zones within the separator's working chamber and provided insights into potential design optimizations. The identified

повышение скорости (до 15–18 м/с) практически не изменяет эффективность сепарации крупных частиц, однако остается актуальной задача повышения эффективности очистки от мелкодисперсных включений. Разработанный метод моделирования позволил определить ключевые зоны осаждения частиц в рабочей камере сепаратора и выявить возможные пути его конструктивной оптимизации. Выявленные закономерности могут быть использованы для дальнейшего совершенствования технологии очистки газовых потоков в агропромышленном комплексе, обеспечивая баланс между энергоэффективностью и качеством очистки. Представленный подход может найти применение при проектировании новых сепарационных устройств с высокой эффективностью, что особенно актуально в условиях ужесточения экологических норм и требований к промышленной безопасности

Ключевые слова: СЕПАРАТОР, ОЧИСТКА ГАЗОВ, ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ANSYS FLUENT, АГРОПРОМЫШЛЕННЫЙ КОМПЛЕКС, УЛАВЛИВАНИЕ ЧАСТИЦ, ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

patterns can be utilized for further refinement of gas purification technologies in the agricultural industry, ensuring a balance between energy efficiency and filtration performance. This approach can be applied to the design of new high-efficiency separation devices, which is particularly relevant given the tightening of environmental regulations and industrial safety requirements

Keywords: SEPARATOR, GAS PURIFICATION, NUMERICAL MODELING, ANSYS FLUENT, AGRICULTURAL INDUSTRY, PARTICLE CAPTURE, ENVIRONMENTAL SAFETY

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-208-002>

**Введение.** В агропромышленном комплексе (АПК) значительное внимание уделяется вопросам очистки воздуха и удаления мелкодисперсных частиц, образующихся при переработке сырья, сушке зерна, измельчении кормов и других технологических процессах. Загрязненные газовые потоки, содержащие частицы различной дисперсности, могут негативно сказываться на качестве конечной продукции, рабочем оборудовании и экологической безопасности производства. В условиях роста объемов производства и увеличения нагрузки на перерабатывающие предприятия становится очевидной необходимость внедрения более эффективных технологий очистки. Современные методы фильтрации и сепарации должны не только обеспечивать высокую степень очистки, но и соответствовать требованиям энергоэффективности, экономичности и долговечности.

<http://ej.kubagro.ru/2025/04/pdf/02.pdf>

Развитие технологий воздушной сепарации обусловлено не только производственными потребностями, но и возрастающими экологическими стандартами, направленными на снижение выбросов вредных примесей. Традиционные системы очистки часто демонстрируют недостаточную эффективность при работе с частицами малых размеров, поскольку механизмы их осаждения зависят от сложных аэродинамических процессов.

Одним из перспективных решений является использование сепараторов с соосно расположенными трубами, которые обеспечивают эффективное отделение твердых частиц за счет центробежных и инерционных сил. Такие устройства могут применяться в различных технологических линиях АПК, повышая уровень очистки воздушных потоков и снижая потери сырья. В отличие от традиционных циклонных или фильтрационных установок, конструкция с соосными трубами позволяет добиться более равномерного распределения потока, снижая вероятность образования застойных зон и повторного выброса частиц в воздух. Численное моделирование позволяет детально исследовать процессы улавливания частиц в запыленных потоках, оптимизируя конструкцию сепаратора и определяя оптимальные условия его работы. Проведение подобных исследований способствует не только повышению эффективности очистки, но и продлению срока службы оборудования за счет снижения абразивного износа внутренних поверхностей.

Современные вычислительные методы позволяют получать детализированные данные о распределении скоростей и давления внутри сепараторов, что дает возможность выявлять потенциальные зоны рециркуляции и неравномерности потока. Анализ аэродинамических характеристик таких систем позволяет не только повышать их эффективность, но и прогнозировать влияние различных эксплуатационных факторов на производительность. Разработка

математических моделей, основанных на фундаментальных законах гидродинамики и турбулентности, дает возможность изучить влияние различных параметров на процесс сепарации и повысить точность прогнозирования работы оборудования.

**Состояние исследований и актуальность проблемы.** На сегодняшний день разработка и совершенствование сепарационных технологий является важной задачей для многих отраслей промышленности, включая агропромышленный комплекс. В литературе представлены различные конструкции сепараторов, работающих на принципах гравитационного, инерционного и центробежного отделения частиц.

Современные исследования в области сепарации запыленных потоков направлены на поиск конструктивных решений, позволяющих увеличить вероятность осаждения мелкодисперсных частиц. В частности, рассматриваются устройства с комбинированными принципами действия, совмещающими центробежные и инерционные механизмы. Среди таких решений особый интерес представляют сепараторы с соосно расположенными трубами, которые обеспечивают многократное изменение направления потока, что способствует более эффективному осаждению частиц. Анализ существующих конструкций показывает, что включение дополнительных направляющих и кольцевых элементов в конструкцию сепаратора позволяет увеличить турбулентность потока и снизить вероятность повторного выброса частиц.

Параметры потока, такие как скорость газа, распределение давления и образование вихрей, играют решающую роль в процессе очистки. Однако большинство опубликованных работ рассматривают либо традиционные циклонные конструкции, либо методы фильтрации, в то время как количественные исследования эффективности сепараторов с соосными трубами остаются недостаточно изученными. Кроме того,

влияние различных сценариев взаимодействия частиц с поверхностями (прилипание или отражение) на эффективность очистки требует дополнительного изучения, поскольку от этого зависят эксплуатационные характеристики сепаратора, включая степень его загрязнения и необходимость в регулярной очистке [1].

Таким образом, необходимость дальнейшего совершенствования конструкций сепараторов, обеспечивающих высокую эффективность улавливания мелкодисперсных частиц, остается актуальной задачей. Проведение численного моделирования позволяет получить детализированные данные о процессах сепарации, что способствует оптимизации конструкции и повышению эксплуатационных характеристик устройств.

**Цель исследований.** Целью данной работы является проведение численного моделирования улавливания твердых частиц из запыленного потока в сепараторе с соосно расположенными трубами. Исследование проводится для двух сценариев взаимодействия частиц с поверхностями: с условием прилипания и с условием отражения. Проведение моделирования направлено на определение влияния скорости газового потока и размеров частиц на эффективность улавливания.

**Материалы и методы исследований.** Для исследования эффективности сепаратора была разработана трехмерная модель в КОМПАС-3D, где детально проработаны все конструктивные элементы устройства. Модель включала входной патрубок, кольцевые направляющие, основную рабочую камеру и выходные щели. Экспорт модели в ANSYS Fluent позволил провести комплексный анализ аэродинамических характеристик газового потока, выявить основные области осаждения частиц и оценить их траектории движения.

ANSYS Fluent, будучи одним из ведущих инструментов для численного моделирования газодинамических процессов, предоставляет

широкие возможности для анализа сложных турбулентных течений и взаимодействия частиц с потоком. Применение данной программной среды позволило рассмотреть детализированное распределение давления, скорости и турбулентных параметров внутри рабочей камеры сепаратора. Использование моделей турбулентности, таких как  $k-\epsilon$  и  $k-\omega$  SST, дало возможность оценить влияние вихревых структур на перераспределение частиц и их осаждение. Кроме того, за счет использования функции отслеживания траекторий частиц (Discrete Phase Model) удалось выявить зоны повышенной концентрации твердых включений, что позволило предложить пути оптимизации конструкции устройства.

Дополнительно, в ANSYS Fluent были реализованы расчеты теплообмена и влияния температуры на поведение частиц, что особенно важно при работе с потоками, содержащими аэрозоли или нагретые газовые смеси. Проведенные симуляции показали, что изменение температуры газового потока может оказывать значительное влияние на динамику движения частиц, что открывает перспективы для дальнейшей адаптации конструкции сепаратора под различные технологические процессы. Высокая точность полученных данных позволила минимизировать необходимость в дорогостоящих натуральных экспериментах, обеспечив надежные прогнозы эффективности очистки воздуха в реальных производственных условиях.

Рассматривались сценарии прилипания частиц к стенкам и их отражения, что позволило оценить степень их осаждения. Расчеты проводились с использованием метода Лагранжа, что позволило получить наиболее точные данные о взаимодействии частиц с потоками газа и поверхностями устройства. В ходе анализа также варьировался размер частиц в диапазоне от 1 до 10 мкм.

Использование численного моделирования позволило не только определить зоны высокой концентрации частиц, но и выявить

оптимальные параметры работы сепаратора, что может быть полезным для дальнейшего совершенствования конструкции и адаптации ее к различным производственным условиям.

**Результаты исследований.** Согласно данным, представленным в таблице 1, при малых скоростях газа (3–6 м/с) эффективность улавливания для частиц размером 1 мкм остается низкой (около 0,41–0,43), в то время как более крупные частицы (7 мкм) осаждаются значительно лучше, достигая эффективности 0,97 уже при 6 м/с.

Таблица 1 – Результаты численного моделирования (эффективность  $E$  от размера частиц и скорости газа)

$W$ , м/с	$E$ (1 мкм)	$E$ (4 мкм)	$E$ (7 мкм)
3	0,41	0,48	0,7
4	0,42	0,52	0,85
5	0,44	0,58	0,92
6	0,43	0,65	0,97
7	0,46	0,72	0,99
8	0,45	0,79	0,99
9	0,45	0,85	0,99
10	0,47	0,9	0,99
12	0,5	0,95	0,99
15	0,52	0,98	0,99
18	0,53	0,99	0,99

Анализ данных показывает, что эффективность улавливания частиц среднего размера (4 мкм) значительно возрастает при увеличении скорости газа до 10 м/с, достигая 0,9. Для частиц размером 7 мкм эффективность стабилизируется на уровне 0,99 при скоростях 7 м/с и выше. Это свидетельствует о высокой эффективности предложенной конструкции сепаратора при работе с частицами среднего и крупного размера.

Однако улавливание наиболее мелких частиц (1 мкм) остается проблематичным. Даже при увеличении скорости газа до 18 м/с эффективность очистки для таких частиц не превышает 0,53. В частности, может потребоваться добавление дополнительных элементов, изменяющих траекторию движения частиц, или модификация условий взаимодействия частиц с поверхностями сепаратора.

Дополнительно проведенный анализ распределения частиц внутри рабочей камеры показал, что основные зоны осаждения расположены в областях турбулентных вихрей, формирующихся вокруг кольцевых элементов.

**Выводы.** 1. Влияние скорости газа – при увеличении скорости входного потока эффективность улавливания частиц среднего и крупного размера (4–7 мкм) значительно возрастает и достигает предельных значений при 10 м/с и выше. 2. Проблема улавливания мелкодисперсных частиц – эффективность улавливания частиц размером 1 мкм остается низкой даже при высоких скоростях потока, что требует дальнейших исследований и возможных модификаций конструкции. 3. Распределение частиц в рабочей камере – численное моделирование показало, что основные зоны осаждения частиц сосредоточены в областях турбулентных вихрей, создаваемых кольцевыми элементами сепаратора.

#### Библиографический список

1. Оценка энергетических затрат при улавливании мелкодисперсных частиц в сепараторе с соосно расположенными трубами / В. Э. Зинуров, А. В. Дмитриев, Г. Р. Бадретдинова [и др.] // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2021. – Т. 25, № 2(157). – С. 196-206.

#### References

1. Ocenka jenergeticheskikh zatrat pri ulavlivanii melkodispersnyh chastic v separatore s soosno raspolozhennymi trubami / V. Je. Zinurov, A. V. Dmitriev, G. R. Badretdinova [i dr.] // Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. – 2021. – T. 25, № 2(157). – S. 196-206.