

УДК 62-94

UDC 62-94

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)

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ  
ОЧИСТКИ ГАЗОВЫХ ПОТОКОВ ОТ  
МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ФРАКЦИЙ В  
АГРОПРОМЫШЛЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ**

**IMPROVEMENT OF GAS FLOW  
PURIFICATION PROCESSES FROM FINE  
PARTICLES IN AGRICULTURAL  
PRODUCTION**

Шарипов Ильнар Ильдарович  
Канд. техн. наук  
SPIN – код автора: 8046-8265

Sharipov Ilnar Ildarovich  
Cand.Tech.Sci.  
RSCI SPIN-code: 8046-8265

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*

В современных агропромышленных комплексах значительное внимание уделяется очистке газовых потоков от дисперсных включений, поскольку избыточная запылённость способна негативно влиять на производительность оборудования, санитарно-гигиенические условия труда и экологическую обстановку. Настоящая работа посвящена исследованию эффективности улавливания мелкодисперсных частиц в центробежном сепараторе с использованием вычислительной гидродинамики. В качестве инструмента численного моделирования использовался пакет Ansys Fluent с моделью дискретной фазы (DPM), что позволило описать движение и взаимодействие частиц с потоком и стенками конструкции. При проведении расчётов учитывался широкий диапазон скоростей на входе, от 1 до 10 м/с, и различные размеры твёрдых включений (1–10 мкм). Тщательный анализ траекторий движения частиц и вихревых структур в кольцевом пространстве продемонстрировал, что наиболее существенный вклад в сепарацию вносит центробежная сила, возникающая при закручивании потока. Полученные результаты показали, что частицы субмикронного размера задерживаются хуже и требуют повышенных скоростей для достижения даже умеренной эффективности очистки. В то же время, более крупные частицы могут улавливаться с эффективностью выше 90% уже при скорости потока порядка 7–10 м/с

In modern agro-industrial complexes, significant attention is paid to gas flow purification from dispersed inclusions, as excessive dust concentration can negatively impact equipment performance, sanitary working conditions, and the environmental situation. This study focuses on investigating the efficiency of fine particle capture in a centrifugal separator using computational fluid dynamics. The numerical modeling was carried out using the Ansys Fluent software package with the Discrete Phase Model (DPM), which made it possible to describe the motion and interaction of particles with the flow and the separator walls. The calculations considered a wide range of inlet velocities, from 1 to 10 m/s, and various particle sizes (1–10 µm). A detailed analysis of particle trajectories and vortex structures in the annular space demonstrated that centrifugal force, generated by the swirling flow, plays the most significant role in the separation process. The results showed that submicron particles are less efficiently captured and require higher gas velocities to achieve even moderate separation efficiency. At the same time, larger particles can be captured with an efficiency exceeding 90% at gas flow velocities of approximately 7–10 m/s

Ключевые слова: ЦЕНТРОБЕЖНЫЙ  
СЕПАРАТОР; ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ;  
ГАЗООЧИСТКА; МЕЛКОДИСПЕРСНЫЕ  
ЧАСТИЦЫ; ANSYS FLUENT; DPM;  
АГРОПРОМЫШЛЕННЫЙ КОМПЛЕКС

Keywords: CENTRIFUGAL SEPARATOR;  
NUMERICAL MODELING; GAS PURIFICATION;  
FINE PARTICLES; ANSYS FLUENT; DPM; AGRO-  
INDUSTRIAL COMPLEX

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-206-014>

**Введение.** Различные технологические операции, связанные с обработкой зерна, производством кормов и переработкой сельскохозяйственного сырья, формируют пылевые выбросы в атмосферу. Эти выбросы могут оказывать неблагоприятное воздействие на качество воздуха в производственных помещениях и вблизи объектов АПК, а также снижать эффективность работы оборудования за счёт засорения узлов и агрегатов. Накопление мелкодисперсных взвесей внутри производственных комплексов в перспективе становится препятствием для полноценного функционирования систем вентиляции и кондиционирования, что создаёт дополнительные проблемы для поддержания нормальных условий труда.

Помимо производственных факторов, пыль в агропромышленном секторе способна включать в свой состав биологические компоненты, которые представляют повышенную опасность при вдыхании и могут приводить к развитию аллергических реакций и профессиональных заболеваний органов дыхания. К тому же, избыточная запылённость существенно ухудшает оптические свойства воздуха, затрудняя визуальный контроль технологических линий и повышая риск травматизма.

Накопленный к настоящему времени теоретический и практический опыт показывает, что традиционные подходы к обеспыливанию требуют постоянного совершенствования. Наиболее эффективные технологии ориентированы на улавливание мелких частиц, которые трудноудаляемы обычными механическими фильтрами. Многообразие свойств пылевых загрязнений диктует необходимость комплексного подхода, основанного на изучении аэродинамики потока, взаимодействия твёрдых включений с барьерами различной геометрии и применения современных программных средств для математического описания процессов.

<http://ej.kubagro.ru/2025/02/pdf/14.pdf>

В аграрном секторе высокая концентрация пыли нередко сопряжена с сезонными колебаниями интенсивности технологических операций. Это вынуждает учитывать колебания параметров входящего потока, а также химический и гранулометрический состав загрязнений. Тем самым, поиск и развитие передовых решений в области обеспыливания остаются актуальными для отрасли и требуют комплексных исследований, сочетающих теоретические изыскания и апробацию на практике.

Одним из перспективных направлений повышения эффективности газоочистки является использование центробежных сепараторов, обладающих высокой производительностью и способных улавливать частицы широкого диапазона размеров. Такие устройства применяют кинетическую энергию потока для создания вихревого движения, при котором твёрдые включения, под воздействием центробежных сил, перемещаются к стенкам и выводятся из системы. Однако эффективность их работы зависит от множества параметров, включая скорость газа, геометрию каналов, размер частиц и условия взаимодействия твёрдой фазы со стенками конструкции.

Анализ существующих решений показывает, что оптимизация сепараторов требует детального изучения процессов, протекающих в их рабочем объёме. Современные методы вычислительной гидродинамики (CFD) позволяют прогнозировать траектории частиц, исследовать формирование вихревых структур и определять критические зоны устройства, где возможно снижение эффективности очистки. Разработка конструкций с улучшенными характеристиками аэродинамики способствует повышению степени улавливания дисперсных включений без значительного увеличения энергозатрат. В этом контексте особый интерес представляют модели с соосно расположенными трубами, обеспечивающие равномерное распределение потока и снижение

турбулентных потерь, что делает такие системы перспективными для применения в агропромышленном производстве.

**Состояние исследований и актуальность проблемы.** Современная наука располагает обширным спектром подходов к очистке газовых сред от твёрдых включений, среди которых наибольшее распространение получили циклоны, скрубберы, фильтрационные системы на основе тканых и мембранных материалов, а также электростатические сепараторы. Каждая из этих технологий находит применение в агропромышленном комплексе в соответствии с типом обрабатываемого сырья, необходимым уровнем очистки и экономическими ограничениями. Однако постоянный рост требований к защите окружающей среды и заботе о здоровье персонала приводит к необходимости дальнейшего совершенствования методов сепарации частиц, особенно когда речь идёт о субмикронных и микронных фракциях.

Использование специализированных программных комплексов позволяет аналитически оценить траектории движения отдельных взвешенных частиц, визуализировать распределение скоростей и давлений в фильтрующих устройствах и прогнозировать эффективность сепарации при различных входных параметрах. Подобный подход заметно ускоряет процесс разработки новых устройств, снижает затраты на экспериментальные стенды и помогает корректировать конструкцию ещё на этапах проектирования.

Одной из серьёзных проблем остаётся улавливание фракций, способных в течение долгого времени находиться во взвешенном состоянии. Такие частицы обладают малой массой, что усложняет процесс осаждения и приводит к более длительному контакту с рабочей средой. Кроме того, при повышенных скоростях потока эти частицы частично уносятся из зоны сепарации, снижая общую эффективность очистки. Поэтому значительное внимание уделяется поиску рациональных

конструктивных решений, повышающих центробежные силы и обеспечивающих интенсивное осаждение пыли.

В научных источниках подчёркивается, что оптимальная геометрия каналов и проточных элементов в сепараторе способна радикально улучшить разделение твёрдой фазы и газа. Дополнительно исследователи обращают внимание на широкий диапазон условий эксплуатации в аграрной сфере, включая переменные скорости, давлений и типы загрязнений. Так, в работе [1] был предложен центробежный сепаратор с соосной компоновкой труб, где разделение твёрдых включений от газового потока организовано в кольцевом объёме (рис. 1). При движении воздуха формируются закрученные вихри, и за счёт центробежного эффекта твёрдая фаза выводится из запылённого потока.

**Цель исследований.** Проведение численного моделирования процесса очистки воздушного потока, загруженного мелкодисперсными включениями, в центробежном сепараторе.

**Материалы и методы исследований.** Для теоретической оценки особенностей течения и улавливания пылевых частиц применялся коммерческий программный пакет Ansys Fluent. Расчёты вели с использованием модели дискретной фазы (Discrete Phase Model, DPM), что даёт возможность отслеживать движение большого количества твёрдых включений, учитывая их взаимодействие с потоком и стенками аппарата.

При моделировании варьировали диаметр частиц от 1 до 10 мкм и задавали плотность материала в пределах  $1075 \text{ кг/м}^3$ . Начальная скорость пылевого потока на входе в систему изменялась в диапазоне 1–10 м/с, что позволяло оценить поведение дисперсной фазы при различных условиях турбулентности. Давление на выходе сепаратора считалось равным атмосферному, а скорость воздуха на входной границе принималась постоянной, равной 0,5 м/с.

Процедура расчёта включала этап разбиения модельного объёма на сеточную структуру с заданным уровнем дискретизации. Затем в Ansys Fluent последовательно запускались итерации для решения уравнений Навье–Стокса, описывающих динамику газа, и дополнительных уравнений, отражающих движение частиц. Благодаря внедрённой модели взаимодействия частиц со стенками, имитировался процесс отражения мелкодисперсных включений от твёрдых поверхностей при столкновениях под различными углами.

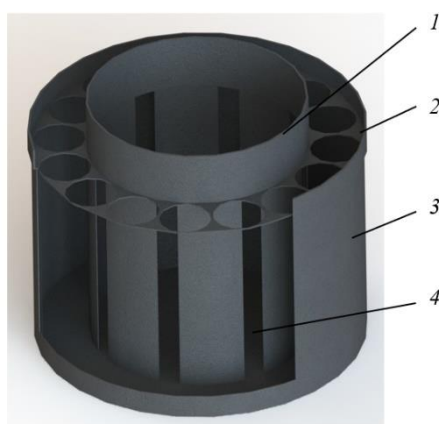


Рисунок 1 – Модель сепаратора: 1 – вход; 2 – кольцо с отверстиями; 3 – корпус; 4 – щели прямоугольного сечения

**Результаты исследований.** Численное моделирование подтвердило, что наибольшая доля улавливаемых частиц напрямую связана с их исходным размером и скоростью потока. Для частиц диаметром 1 мкм максимальная эффективность очистки фиксировалась при скоростях 6,5–10 м/с, где удавалось достичь примерно 15–16 % осаждения. При этом дальнейшее увеличение скорости выше 10 м/с приводило к незначительному росту эффективности, который стремился к асимптотическому пределу порядка 15–16 % (рис. 2).

В случае фракций 4 мкм продуктивность обеспыливания возрастала до 34–35% при входном газовом потоке 3–10 м/с и значительно повышалась при скоростях свыше 12–13 м/с, формируя рубеж 70% и выше.

Более крупные включения (7 мкм) могли осаждаться гораздо активнее, достигая уровня 75–76% при скоростях входа не менее 7 м/с. Далее, при скорости порядка 10–20 м/с, эффективность не опускалась ниже 90%. Самый значительный эффект наблюдался для 10 мкм, где уже в диапазоне 6,5–10 м/с обеспечивалось свыше 90% сепарации.

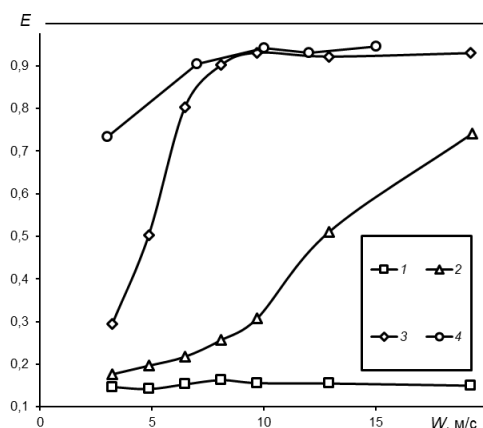


Рисунок 2 – Зависимость изменения эффективности улавливания твердых частиц из запыленных потоков от входной скорости газа при их различном размере  $a$ , мкм: 1 - 1, 2 - 4, 3 - 7, 4 - 10. Численное моделирование производилось при условии отражения частиц от стенок

Таким образом, учёт турбулентной структуры потоков и отражения частиц от стеновых поверхностей продемонстрировал ключевую роль центробежных сил в отделении твёрдой фазы. Полученные результаты позволяют определить оптимальный рабочий диапазон скоростей для улавливания определённых размеров пыли. При этом более высокая скорость потока предпочтительна для частиц среднего и большого диаметра, в то время как для субмикронной фракции существенный прирост эффективности практически не наблюдается.

**Выводы.** 1. Наиболее эффективно в сепараторе задерживаются частицы диаметром от 7 мкм и выше, где уже при умеренно высоких скоростях потока их улавливание превышает 90%. 2. Мелкие включения

размером порядка 1 мкм остаются в потоке при большинстве режимов, достигая уровня осаждения не более 15–16%.

### **Библиографический список**

1. Галимова, А. Р. Сепарационное устройство с соосно расположенными трубами для разделения водонефтяных эмульсий / А. Р. Галимова, В. Э. Зинулов, А. В. Дмитриев, В. В. Харьков // Вестник технологического университета. - 2021. – Т. 24. - № 3. – С. 50-54.

### **References**

1. Galimova, A. R. Separacionnoe ustrojstvo s soosno raspolzhennymi trubami dlja razdelenija vodoneftjanyh jemul'sij / A. R. Galimova, V. Je. Zinurov, A. V. Dmitriev, V. V. Har'kov // Vestnik tehnologicheskogo universiteta. - 2021. – T. 24. - № 3. – S. 50-54.