

УДК 66.074.2

UDC 66.074.2

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)

ОСАЖДЕНИЕ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ В МУЛЬТИВИХРЕВОМ СЕПАРАЦИОННОМ УСТРОЙСТВЕ

DEPOSITION OF FINE SOLID PARTICLES IN A MULTIVORTEX SEPARATION DEVICE

Шаймарданов Ансель Ренатович
Студент

Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

Shaimardanov Ansel Renatovich
Student

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Биккулов Рустем Ядкарович
Канд. техн. наук

Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

Bikkulov Rustem Yadkarovich
Cand.Tech.Sci.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Современные задачи очистки воздуха и технологических газов от твердых частиц в агропромышленном комплексе требуют использования высокоэффективных устройств, обеспечивающих улавливание пыли с минимальными энергетическими затратами. Одним из перспективных решений является применение мультिवихревых сепарационных систем, способных эффективно удалять мелкодисперсные фракции за счет интенсификации вихревых потоков. В данной работе представлено численное моделирование осаждения частиц в канале мультिवихревого сепарационного устройства с элементами квадратной формы. Расчёты проводились в программной среде ANSYS Fluent при различных значениях входной скорости (0,5 и 0,75 м/с) и плотности частиц (от 1500 до 4500 кг/м³). Получены зависимости фракционной эффективности от диаметра частиц для разных условий. Результаты показывают существенное влияние плотности и начальной скорости на эффективность улавливания, особенно в диапазоне частиц до 5 мкм. Предложенный подход позволяет повысить точность прогноза работы оборудования и может быть использован при оптимизации конструкции сепараторов для различных технологических процессов в сельском хозяйстве и перерабатывающей промышленности

Modern challenges in air and process gas purification from solid particles in the agro-industrial complex require the use of highly efficient devices that can capture dust with minimal energy consumption. One promising solution is the use of multivortex separation systems capable of effectively removing fine particulate fractions by intensifying vortex flows. This study presents a numerical simulation of particle deposition in the channel of a multivortex separation device with square-shaped elements. The calculations were performed using the ANSYS Fluent software under varying inlet velocities (0.5 and 0.75 m/s) and particle densities (ranging from 1500 to 4500 kg/m³). Dependencies of fractional efficiency on particle diameter under different conditions were obtained. The results demonstrate a significant influence of particle density and initial velocity on collection efficiency, particularly for particles smaller than 5 µm. The proposed approach improves the accuracy of predicting separator performance and can be used to optimize the design of such devices for various technological processes in agriculture and the processing industry

Ключевые слова: МУЛЬТИВИХРЕВОЙ СЕПАРАТОР, ANSYS FLUENT, ФРАКЦИОННАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ, МОДЕЛИРОВАНИЕ, ДИСПЕРСНЫЕ ЧАСТИЦЫ, АГРОПРОМЫШЛЕННЫЙ КОМПЛЕКС

Keywords: MULTIVORTEX SEPARATOR, ANSYS FLUENT, FRACTIONAL EFFICIENCY, MODELING, DISPERSED PARTICLES, AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-208-046>

<http://ej.kubagro.ru/2025/04/pdf/46.pdf>

Введение. Обеспечение экологической безопасности в агропромышленном производстве требует постоянного совершенствования технологий очистки газовых выбросов от взвешенных частиц. Мелкодисперсная пыль, образующаяся в результате переработки зерна, измельчения кормов, сушки продуктов и других операций, представляет собой значительную угрозу как для оборудования, так и для здоровья персонала. Кроме того, попадание пыли в атмосферу ухудшает санитарно-гигиенические условия в сельскохозяйственных регионах.

Современные методы очистки, такие как рукавные фильтры или мокрые скрубберы, требуют значительных затрат на обслуживание и энергопотребление. В связи с этим возрастающий интерес вызывает использование циклонов и других сухих механических устройств, основанных на инерционных принципах разделения фаз. Одним из направлений, сочетающим простоту конструкции и высокую эффективность, стало применение мультивихревых устройств, где в ограниченном пространстве формируются многочисленные маломасштабные вихри, обеспечивающие центробежное осаждение частиц.

Уникальность таких устройств заключается в их способности работать в широком диапазоне параметров потока, включая высокую производительность и изменяющиеся свойства частиц. В отличие от традиционных циклонов, мультивихревые системы позволяют улавливать даже тонкодисперсные фракции за счет более интенсивного взаимодействия газовой и твердой фаз.

Сложности, возникающие при проектировании таких устройств, связаны с необходимостью точного расчета параметров потока, формы и размещения вихреобразующих элементов, а также прогноза эффективности в зависимости от свойств улавливаемых частиц. С этой целью все чаще применяются методы численного моделирования,

позволяющие учитывать особенности геометрии, турбулентности и взаимодействия фаз.

Состояние исследований и актуальность проблемы. Вопросы очистки воздуха от мелкодисперсных твердых частиц остаются одними из наиболее значимых в сфере агропромышленного производства. Возрастающие объемы механической и термической обработки сельскохозяйственной продукции приводят к увеличению концентрации пыли в технологических зонах. Наряду с негативным влиянием на здоровье персонала и износом оборудования, наличие пыли способствует загрязнению атмосферы и ухудшению экологической обстановки в районах с развитым сельским хозяйством. Особенно остро стоит задача улавливания частиц размером менее 10 мкм, которые способны длительное время находиться в воздухе и проникать в дыхательные пути человека.

Традиционные методы обеспыливания, включая циклоны, инерционные камеры и гравитационные осадители, демонстрируют недостаточную эффективность при работе с мелкодисперсными фракциями. Более современные фильтрационные системы, такие как рукавные или электрофильтры, требуют высоких затрат на эксплуатацию, регулярную замену фильтрующих элементов и зачастую оказываются экономически нецелесообразными для применения в малых и средних аграрных хозяйствах.

В этой связи повышенное внимание исследователей привлекают альтернативные решения, основанные на развитии вихревых и мультивихревых структур потока. Ранее была разработана конструкция мультивихревого сепарационного устройства, в котором осаждение частиц достигается за счёт возникновения множественных вихрей в системе каналов с ограниченным поперечным сечением. Такие вихри формируют мощные локальные центробежные силы, обеспечивая перемещение твердых включений к стенкам каналов и их последующее осаждение.

Экспериментальные исследования подтверждают, что геометрическая форма и компоновка вихреобразующих элементов оказывают критическое влияние на эффективность улавливания. В частности, применение элементов с квадратным поперечным сечением способствует формированию более устойчивых вихрей и увеличивает площадь контакта потока с поверхностями, что особенно важно при осаждении мелких частиц.

Однако физическое моделирование процессов в таких устройствах сопряжено с рядом трудностей: невозможно учесть все параметры частиц, режимов потока и турбулентности. В этом контексте численное моделирование становится важнейшим инструментом, позволяющим исследовать поведение частиц в мультिवихревом потоке при варьировании входных условий и геометрии устройства.

Таким образом, актуальность настоящего исследования обусловлена необходимостью повышения эффективности улавливания тонкодисперсных частиц в условиях агропромышленного производства и отсутствием универсального метода для точного прогноза работы мультिवихревых сепараторов. Проведение численного моделирования позволяет воспроизвести реальную картину движения фаз, выявить закономерности осаждения и оптимизировать конструктивные параметры устройства. Это, в свою очередь, обеспечивает основу для разработки эффективных систем обеспыливания, адаптированных к условиям эксплуатации в аграрной отрасли.

Цель исследований. Целью работы является моделирование осаждения частиц в каналах мультिवихревого сепаратора.

Материалы и методы исследований. Для изучения процессов осаждения мелкодисперсных твердых частиц в канале мультिवихревого сепарационного устройства использован метод численного моделирования на основе вычислительной гидродинамики (CFD). В качестве программной

платформы применён программный пакет ANSYS Fluent, обладающий широкими возможностями для моделирования многокомпонентных течений, процессов взаимодействия фаз, турбулентности и теплообмена. Программа позволяет строить как стационарные, так и нестационарные модели, учитывая особенности движения дисперсных частиц в потоке газа.

Геометрия исследуемого канала включала прямоугольный участок с системой квадратных элементов, создающих мультивихревые зоны. Конструкция была разработана таким образом, чтобы обеспечить формирование множественных вихрей малого диаметра, что способствует интенсификации центробежного осаждения частиц. Для упрощения задачи использовалась двумерная модель, что позволило сократить вычислительные ресурсы без потери качества результатов [1].

Расчетная сетка была построена с повышенным сгущением в областях предполагаемого возникновения вихрей и у стенок каналов, где происходят основные процессы осаждения. Для оценки влияния размера ячеек на точность результатов была проведена проверка независимости от сетки.

Входными параметрами модели являлись скорость воздушного потока и плотность дисперсных частиц. Скорость на входе задавалась в диапазоне от 0,5 м/с до 0,75 м/с, что соответствует реальным значениям для систем локальной очистки воздуха. Плотность частиц варьировалась от 1500 до 4500 кг/м³, что охватывает широкий спектр возможных загрязнителей, включая органическую пыль, минеральные фракции и металлические включения.

Результаты исследований. На основании численного моделирования в ANSYS Fluent получены зависимости фракционной эффективности сепарационного устройства от размера частиц при различных значениях их плотности и скоростях потока на входе. Результаты представлены в виде графиков (рис. 1 и рис. 2),

демонстрирующих эффективность осаждения частиц размером от 1 до 10 мкм при плотности от 1500 до 4500 кг/м³ и скоростях 0,5 и 0,75 м/с соответственно.

Анализ рисунка 1 (входная скорость 0,5 м/с) показывает, что при увеличении плотности частиц эффективность устройства возрастает. Наиболее выраженный прирост наблюдается в диапазоне частиц от 1 до 5 мкм. Например, для частиц размером 4 мкм эффективность возрастает от 60% при плотности 1500 кг/м³ до 100% при плотности 4500 кг/м³. Это связано с увеличением центробежных сил, действующих на более плотные включения, что способствует их быстрому осаждению вблизи стенок канала. Для частиц свыше 6 мкм эффективность устройства приближается к 100% практически при всех плотностях, что свидетельствует о высоком потенциале системы для улавливания частиц среднего размера.

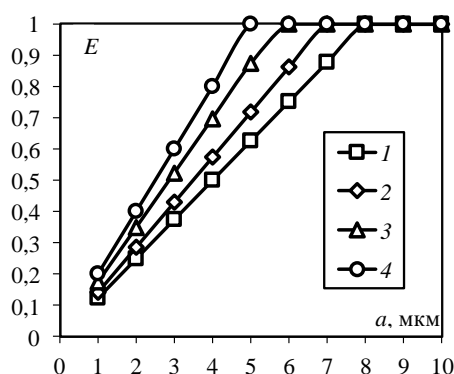


Рисунок 1 – Фракционная эффективность от размера частиц при различной плотности частиц, кг/м³: 1 – 1500; 2 – 2500; 3 – 3500; 4 – 4500. Скорость на входе 0,5 м/с

В рисунке 2 представлены результаты для увеличенной входной скорости – 0,75 м/с. Здесь наблюдается заметное улучшение показателей эффективности для всех диапазонов размеров и плотностей частиц. Даже для самых легких частиц (1500 кг/м³) размером 3 мкм фракционная эффективность превышает 70%, тогда как при меньшей скорости она составляла около 50%. Это обусловлено более интенсивным развитием вихревого движения внутри каналов при увеличенной скорости, что

усиливает воздействие центробежных сил на дисперсные фазы. Наиболее значительное различие наблюдается для частиц размером от 2 до 5 мкм, то есть именно в том диапазоне, где улавливание обычно вызывает наибольшие трудности.

Качественный анализ полей скорости и траекторий движения частиц показывает, что основная зона осаждения формируется вдоль стенок квадратных элементов, где наблюдается концентрация вихревых структур. При увеличении скорости вихри становятся более устойчивыми и симметричными, способствуя равномерному распределению частиц по поверхности сепарационного канала. На основе результатов моделирования подтверждена эффективность выбранной геометрии мультивихревого устройства.

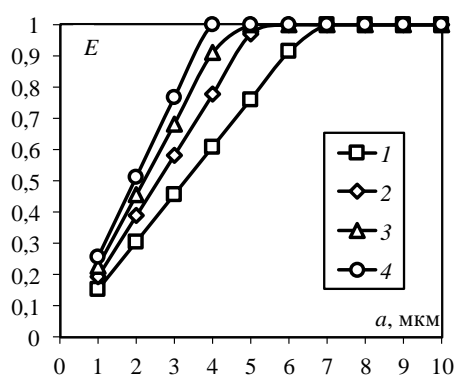


Рисунок 2 – Фракционная эффективность от размера частиц при различной плотности частиц, кг/м³: 1 – 1500; 2 – 2500; 3 – 3500; 4 – 4500. Скорость на входе 0,75 м/с

Таким образом, численные расчёты показали, что наибольшее значение для повышения фракционной эффективности имеет сочетание высокой плотности частиц и увеличенной скорости потока. Также подтверждена перспективность применения квадратных вихреобразующих элементов для интенсификации процессов сепарации мелкодисперсных частиц в агропромышленном производстве.

Выводы. 1. Численное моделирование показало, что эффективность осаждения мелкодисперсных частиц в мультивихревом сепарационном

устройстве напрямую зависит от плотности частиц и скорости воздушного потока на входе. При увеличении этих параметров наблюдается значительный рост фракционной эффективности, особенно в диапазоне частиц размером от 2 до 5 мкм. 2. Использование квадратных вихреобразующих элементов способствует формированию устойчивых локальных вихрей, обеспечивающих равномерное распределение потока и интенсификацию центробежного отделения твердых включений. Такая геометрия конструкции доказала свою эффективность при улавливании частиц различной плотности.

Библиографический список

1. Шаймарданов, А. Р. Численное моделирование работы квадратного сепаратора для улавливания мелкодисперсных частиц из газового потока / А. Р. Шаймарданов, Р. Я. Биккулов, И. Н. Мадышев // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2025. – № 205. – С. 299-307.

References

1. Shajmardanov, A. R. Chislennoe modelirovanie raboty kvadratnogo separatora dlja ulavlivaniya melkodispersnyh chastic iz gazovogo potoka / A. R. Shajmardanov, R. Ja. Bikkulov, I. N. Madyshev // Politematicheskij setevoj jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2025. – № 205. – S. 299-307.