

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)

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТНЫХ РЕЖИМОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ МУЛЬТИВИХРЕВОГО КЛАССИФИКАТОРА

NUMERICAL STUDY OF THE EFFECT OF HIGH-SPEED MODES ON THE EFFECTIVENESS OF A MULTI-VORTEX CLASSIFIER

Прец Мария Арнольдовна
Старший преподаватель
SPIN – код автора: 8457-2157
Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

Prets Maria Arnoldovna
Senior Lecturer
RSCI SPIN-code: 8457-2157
Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Зиангиров Айдар Фаилевич
Студент
SPIN – код автора: 3338-8985
Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

Ziangirov Aydar Failevich
Student
RSCI SPIN-code: 3338-8985
Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Обеспечение чистоты воздушной среды от мелкодисперсных включений представляет собой одну из приоритетных задач в агропромышленном секторе, поскольку влияет не только на санитарные условия производства, но и на качество конечного продукта. Настоящая работа посвящена численному анализу работы мультिवихревого классификатора, функционирующего в условиях двухфазного потока с твёрдой дисперсной фазой. Моделирование проведено с использованием программного комплекса Ansys Fluent, где в качестве физической модели турбулентности применялась схема $k-\omega$ SST, обеспечивающая точное описание вихревых структур внутри аппарата. Анализировалось влияние отношения средней скорости воздуха через прямоугольные щели к скорости через отверстие в нижней части внутренней трубы классификатора на пороговый размер частиц, которые задерживаются с эффективностью не менее 95%. Установлено, что увеличение данного отношения приводит к значительному снижению граничного размера эффективно осаждаемых частиц, позволяя эффективно сепарировать более мелкие фракции. Полученная эмпирическая зависимость позволяет оптимизировать режимы работы классификатора и его конструктивные параметры для применения в системах аспирации зернохранилищ, комбикормовых заводов, а также в животноводческих комплексах для очистки воздуха от мелкой пыли и органических загрязнений. Результаты моделирования подтверждают перспективность применения мультिवихревых классификаторов в технологиях АПК и демонстрируют возможность повышения

Ensuring air purity from fine particulate matter remains one of the key challenges in the agro-industrial sector, as it directly affects both sanitary production conditions and the quality of final agricultural products. This study focuses on the numerical analysis of a multivortex classifier operating under two-phase flow conditions with a solid dispersed phase. The simulation was carried out using the Ansys Fluent software package, where the $k-\omega$ SST turbulence model was employed to accurately capture the vortex structures formed inside the apparatus. The study examined the influence of the ratio between the average air velocity through rectangular slots and the velocity through the bottom opening of the inner tube on the threshold particle size retained with an efficiency of at least 95%. It was found that increasing this velocity ratio significantly reduces the threshold size of particles effectively separated by the classifier, allowing for improved retention of smaller fractions. The resulting empirical relationship provides a basis for optimizing both the operating modes and the structural parameters of the classifier for use in aspiration systems of grain storage facilities, feed production plants, and livestock complexes, where fine dust and organic aerosols must be removed from the air. The modeling results confirm the feasibility and potential benefits of implementing multivortex classifiers in agro-industrial processes, highlighting their contribution to improving both environmental and technological efficiency

экологической и технологической эффективности производств

Ключевые слова: МУЛЬТИВИХРЕВОЙ КЛАССИФИКАТОР, ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ANSYS FLUENT, ЭФФЕКТИВНОСТЬ СЕПАРАЦИИ, АГРОПРОМЫШЛЕННЫЙ КОМПЛЕКС, МЕЛКОДИСПЕРСНЫЕ ЧАСТИЦЫ, ОЧИСТКА ВОЗДУХА

Keywords: MULTIVORTEX CLASSIFIER, NUMERICAL MODELING, ANSYS FLUENT, SEPARATION EFFICIENCY, AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX, FINE PARTICLES, AIR PURIFICATION

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-208-037>

Введение. Повышение конкурентоспособности продукции агропромышленного комплекса требует совершенствования технологических процессов и аппаратурного обеспечения. Одной из важнейших операций является фракционирование твердых дисперсных материалов по заданным размерам, позволяющее существенно улучшить качество готовой продукции и расширить сферы её применения. От точности выполнения данной операции зависит не только качество выпускаемой продукции, но и экономические показатели предприятий АПК.

Существующие технологии сепарации и классификации дисперсных материалов часто оказываются недостаточно эффективными в силу ограничений, связанных с размером разделяемых частиц, низкой селективностью или высокими энергозатратами. Это обуславливает необходимость разработки и внедрения инновационных аппаратов и систем, способных обеспечить тонкое разделение при минимальных затратах. Особое внимание в этой связи заслуживают мультिवихревые классификаторы, обеспечивающие высокую производительность при относительной простоте конструкции и минимальных энергозатратах.

Такие классификаторы обладают высоким потенциалом применения в АПК, в частности для сортировки семян перед посевом, очистки зерновых культур и улучшения качества мукомольных продуктов. Также мультिवихревые аппараты перспективны в производстве гранулированных

<http://ej.kubagro.ru/2025/04/pdf/37.pdf>

кормов, витаминизированных добавок, комбинированных удобрений, где точность и эффективность процесса сепарации оказывают значительное влияние на конечные эксплуатационные свойства продукции.

Применение вихревых технологий основано на формировании в рабочей камере аппарата вихревых потоков, где осуществляется фракционирование частиц в зависимости от их размера и массы. При этом крупные частицы осаждаются в соответствующие накопители под воздействием центробежных сил, а мелкие удаляются из зоны разделения восходящим газовым потоком. В результате достигается высокая селективность разделения, что делает данный метод особенно перспективным для применения в современных технологиях переработки сельскохозяйственного сырья и продуктов АПК.

Расширение спектра применяемых материалов, повышение требований к экологичности производств и необходимости снижения себестоимости продукции диктуют необходимость непрерывного поиска и внедрения новых эффективных решений в области аппаратов классификации и сепарации. Данное обстоятельство определяет необходимость всестороннего изучения и разработки мультивихревых классификаторов для широкого применения в агропромышленном производстве [1].

Особенно актуальной задачей становится адаптация мультивихревых классификаторов к условиям реального агропроизводства, включающим переменные характеристики поступающего сырья, нестабильные потоки воздуха и пылевыведение различного происхождения. В этих условиях возрастает значимость численного моделирования и оптимизации конструктивных параметров таких аппаратов. Современные методы вычислительной гидродинамики (CFD) позволяют не только предсказать поведение частиц в вихревом поле, но и сформировать научно обоснованные рекомендации по улучшению конструкции и эксплуатации

классификатора. Это открывает возможности для повышения точности фракционирования, снижения затрат на очистку воздуха и достижения более устойчивых и ресурсосберегающих технологий в АПК.

Состояние исследований и актуальность проблемы. Процессы классификации и сепарации твёрдых дисперсных широко освещены в научно-технической литературе и включают разнообразные методы, основанные на различии физических свойств частиц — плотности, размеров, аэродинамического сопротивления и инерционности. Тем не менее, несмотря на наличие обширной базы исследований, практическое применение классифицирующих аппаратов по-прежнему сопряжено с рядом технологических и экономических ограничений.

Наиболее распространёнными в производственной практике остаются классификаторы гравитационного, центробежного и ситового типов. Однако каждый из этих подходов имеет существенные недостатки. Так, ситовые устройства, применяемые в основном для предварительной классификации зерна, минеральных удобрений или кормов, ограничены по размеру разделяемых частиц – как правило, эффективно работают с фракциями не мельче 50-100 мкм. К тому же, они подвержены быстрому абразивному износу, частым простоям для технического обслуживания, а также не подходят для влажных или склонных к агломерации материалов.

Гравитационные классификаторы, основанные на различии скоростей осаждения частиц, также обладают рядом недостатков: они малопригодны для работы с мелкодисперсными фракциями менее 20 мкм, имеют большие габариты, низкую производительность на единицу объёма и чувствительны к внешним вибрациям и колебаниям потока. Это ограничивает их применение в современных компактных производственных линиях АПК.

Центробежные классификаторы, включая традиционные циклоны, применяются значительно шире, особенно при разделении смесей с

плотными и крупными частицами. Особенно это проявляется при работе с неравномерным, пылевидным или слабоинерционным сырьём, типичным, например, для переработки зерновых остатков, шелухи, измельчённой соломы или костной муки.

На фоне этих ограничений особый интерес вызывают мультивихревые классификаторы, работающие на основе стабилизированного вихревого движения газа. Их ключевые преимущества включают компактность, отсутствие движущихся механических частей, возможность плавного регулирования режимов за счёт изменения геометрических параметров (щелей, сечений, углов и пр.), а также хорошую адаптацию под свойства конкретного материала.

Однако несмотря на технические преимущества, мультивихревые аппараты до сих пор остаются малоизученными с точки зрения системного анализа и оптимизации. Для их эффективного применения в агропромышленности требуется определение границ применимости, оптимальных конструктивных решений и режимов работы, адаптированных под конкретные задачи — например, очистку воздуха на зернохранилищах, разделение кормовых добавок или удаление пыли в животноводческих помещениях.

Цель исследований. Целью работы является численное исследование влияния параметра W_R на пороговый размер частиц, при котором эффективность сепарации в мультивихревом классификаторе составляет не менее 95 %.

Материалы и методы исследований. Численное моделирование было выполнено с использованием программного пакета Ansys Fluent, основанного на решении уравнений Навье–Стокса в трехмерной постановке с учётом турбулентности и дисперсной фазы. Для описания турбулентного течения воздуха в классификаторе применялась модель $k-\omega$ SST, позволяющая точно воспроизводить поведение вихревых структур и

зону с высокими градиентами скорости, что критически важно для оценки эффективности мультивихревого устройства. Расчёты проводились в стационарной постановке.

Для моделирования частиц использовалась модель дискретной фазы (DPM) в лагранжевом приближении, в рамках которой частицы считались сферическими, несвязными между собой и движущимися в потоке под действием сил сопротивления, гравитации и инерции. Размер частиц варьировался от 1 до 200 мкм, плотность составляла 1075 кг/м³. Температура воздушного потока задавалась равной 25 °С, а скорость на входе классификатора — 12 м/с. Давление на выходе поддерживалось равным 10⁵ Па. Предусматривались различные сценарии взаимодействия частиц со стенками аппарата: на стенках бункера частицы осаждались (условие прилипание), а на остальных – отражались.

Модель классификатора была построена на основе параметров базовой конструкции, при этом варьировались параметры W_R – отношение средней скорости через прямоугольные щели к средней скорости через отверстие в нижней части внутренней трубы. Геометрия устройства включала цилиндрическую наружную и внутреннюю трубу, а также кольцевое пространство с прямоугольными щелями. Для повышения вычислительной эффективности моделирование проводилось на секторной области с учетом симметрии. Расчетная сетка генерировалась с учетом критериев независимости от размера ячеек: число ячеек составляло около 437 000. Ключевым исследуемым параметром был пороговый размер частиц $a(E \geq 95\%)$, при котором эффективность сепарации достигала 95%.

Результаты исследований. На основании численного моделирования установлена выраженная зависимость порогового размера частиц от скоростного параметра W_R , характеризующего степень воздействия восходящего потока на зону вихревого разделения. Полученные данные демонстрируют, что при $W_R = 1,1$ пороговый размер

$a(E \geq 95\%)$ составляет около 200 мкм, то есть только крупные фракции эффективно осаждаются в классификаторе. По мере увеличения отношения скоростей до $W_R = 3,8$ наблюдается существенное снижение порогового размера до 60 мкм, что свидетельствует о возможности эффективного улавливания более мелкодисперсных частиц.

Количественный анализ также показал, что зависимость $a(E \geq 95\%)$ от W_R подчиняется степенному закону с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,91$, что подтверждает высокую согласованность модели с расчетными данными. Полученная регрессионная зависимость может быть использована как инженерный инструмент для прогнозирования поведения классификатора при различных режимах работы.

С качественной точки зрения увеличение W_R достигается путем уменьшения степени раскрытия прямоугольных щелей (уменьшение k), что приводит к повышению скорости потока в этих щелях. Это, в свою очередь, усиливает центробежные силы, ответственные за отделение частиц от восходящего потока. Одновременно снижается скорость через нижнее отверстие внутренней трубы, ослабляя дестабилизирующее влияние восходящего потока. Таким образом, формируется более стабильная вихревая структура, способная эффективно сепарировать даже частицы с низкой массой (рис. 1).

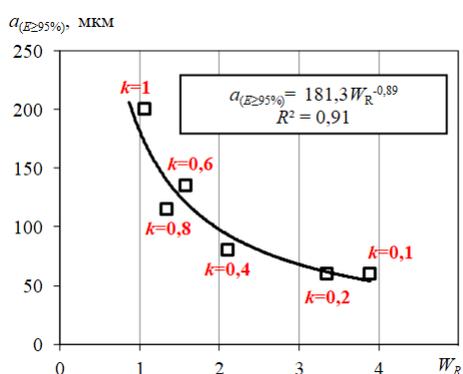


Рисунок 1 – Пороговый размер частиц при $E \geq 95\%$ в зависимости от параметра W_R

Наблюдается также, что при высоких значениях W_R переход эффективности сепарации от 5 % до 95 % происходит на более коротком диапазоне размеров частиц, что свидетельствует о высокой селективности процесса.

Таким образом, численные данные позволяют утверждать, что оптимизация параметра W_R обеспечивает гибкую настройку аппарата под различные типы дисперсных материалов, используемых в агропромышленном комплексе – от пыли зерновых до минеральных добавок и кормовых смесей.

Выводы. 1. Установлена количественная зависимость порогового размера частиц $a(E \geq 95\%)$ от параметра W_R , позволяющая прогнозировать эффективность мультивихревого классификатора при различных режимах подачи воздушного потока. 2. Увеличение W_R от 1 до 4 сопровождается снижением порогового размера с 200 до 60 мкм, что позволяет использовать классификатор для сепарации более тонких фракций без изменения геометрии аппарата. 3. Оптимизация геометрических параметров щелей (через коэффициент k) позволяет регулировать скорость вращательного потока, усиливая центробежные силы и повышая селективность разделения.

Библиографический список

1. Прец, М. А. Разработка параметрической модели мультивихревого классификатора для фракционирования твердых частиц / М. А. Прец, А. М. Мугинов, А. И. Юмадилова // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2024. – № 203. – С. 280-288.

References

1. Prec, M. A. Razrabotka parametricheskoj modeli mul'tivihrevogo klassifikatora dlja frakcionirovanija tverdyh chastic / M. A. Prec, A. M. Muginov, A. I. Jumadilova // Politematicheskij setevoj jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2024. – № 203. – S. 280-288.