

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)

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ РАЗМЕРОВ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ЩЕЛЕЙ КЛАССИФИКАТОРА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ УЛАВЛИВАНИЯ ЧАСТИЦ**

**INVESTIGATION OF THE EFFECT OF RECTANGULAR SLOT SIZE VARIATION IN A CLASSIFIER ON PARTICLE CAPTURE EFFICIENCY**

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*

Мугинов Арслан Маратович  
Студент  
SPIN – код автора: 3425-1647  
*Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия*

Muginov Arslan Maratovich  
Student  
RSCI SPIN-code: 3425-1647  
*Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia*

В статье рассматривается разработка параметрической модели мультивихревого классификатора, предназначенного для высокоэффективного фракционирования твердых частиц различного размера. Актуальность исследования обусловлена необходимостью совершенствования процессов сепарации в современных технологических линиях, где важны высокие показатели селективности и энергоэффективности. Предложенная модель учитывает геометрические и гидродинамические параметры, позволяющие адаптировать конструкцию под определенные характеристики сырья и режимы работы. Оптимизация конструктивных элементов достигалась варьированием степени раскрытия щелей, позволяющим выявить влияние различных геометрических факторов на долю улавливаемых частиц и распределение потока. В ходе исследований установлено, что при степени открытия 100% (линия 3) для частиц размером около 20 мкм эффективность  $E$  достигает 0,24, что существенно превосходит аналогичные показатели для других вариантов конфигурации (0,02 при 10% и 0,03 при 40%). Однако дальше кривая набирает высоту более плавно и лишь к 90–100 мкм выходит на уровень 0,67–0,77. Максимальные значения вплоть до 0,93–0,94 наблюдаются при размерах 170–180 мкм

The article examines the development of a parametric model for a multi-vortex classifier designed to achieve highly efficient fractionation of solid particles of various sizes. The relevance of this research stems from the need to refine separation processes in modern technological lines, where high selectivity and energy efficiency are of critical importance. The proposed model takes into account geometric and hydrodynamic parameters that make it possible to adapt the design to specific raw material characteristics and operating conditions. Optimization of the structural elements was achieved by varying the degree of slot opening, thereby enabling an assessment of how different geometric factors affect the fraction of captured particles and flow distribution. The study found that at a 100% slot opening (line 3), for particles measuring about 20  $\mu\text{m}$ , the efficiency  $E$  reaches 0.24, which significantly surpasses the corresponding values in other configuration options (0.02 at 10% and 0.03 at 40%). However, beyond that point, the curve rises more gradually and only attains the 0.67–0.77 range at 90–100  $\mu\text{m}$ . The maximum values, up to 0.93–0.94, are observed at particle sizes of 170–180  $\mu\text{m}$

Ключевые слова: МУЛЬТИВИХРЕВОЙ КЛАССИФИКАТОР, ФРАКЦИОНИРОВАНИЕ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ, ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, МЕТОД КОНЕЧНЫХ ОБЪЕМОВ, СЕЛЕКТИВНОСТЬ, ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ, ВИХРЕВЫЕ ЗОНЫ

Keywords: MULTI-VORTEX CLASSIFIER, FRACTIONATION OF SOLID PARTICLES, NUMERICAL MODELING, FINITE VOLUME METHOD, SELECTIVITY, ENERGY EFFICIENCY, VORTEX ZONES

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-206-020>

<http://ej.kubagro.ru/2025/02/pdf/20.pdf>

**Введение.** Современная агропромышленная отрасль стремительно меняется под влиянием технологических инноваций и растущих требований к качеству и безопасности продовольствия. В условиях глобальных вызовов, связанных с увеличением численности населения и ограниченностью ресурсов, сельскохозяйственному сектору приходится искать способы более эффективной переработки сырья и оптимизации производственных процессов. Применение передовых машин и аппаратуры в аграрном производстве становится неотъемлемой частью комплексной модернизации отрасли, способствующей как повышению выхода готовой продукции, так и снижению затрат на энергию, воду и другие важные ресурсы.

Важным направлением развития агропромышленного комплекса выступает совершенствование технологий первичной и вторичной обработки сельскохозяйственного сырья. Успех в этой области позволяет производителям добиваться стабильных показателей качества продукции и сокращать долю потерь при транспортировке и хранении.

Однако динамика роста производительности и расширения ассортимента продукции, выпускаемой аграрными предприятиями, создает новые требования к работе технологических узлов. Способность оборудования обрабатывать большие объемы сырья с сохранением параметров качества – один из ключевых факторов конкурентоспособности. Кроме того, рынку нужны гибкие системы, которые можно адаптировать к переменчивым условиям эксплуатации и к разнообразным видам сырья, отличающимся по физико-механическим характеристикам. Эти задачи напрямую связаны с развитием наук, занимающихся проектированием и исследованием агротехнологических машин и механизмов, и требуют привлечения междисциплинарных подходов.

В контексте глобализации и усложнения логистических цепочек перед отраслью встают вопросы быстрого реагирования на колебания спроса и повышения надежности технологических процессов. Именно поэтому в последние годы существенно возрос интерес к поиску и внедрению новаторских решений, объединяющих в себе высокую производительность, экономичность и экологическую безопасность. Политика многих стран направлена на поддержку разработок в области «зеленых» технологий, что дополнительно стимулирует инвестирование в исследования по созданию более эффективных машин, снижающих нагрузку на природу.

**Состояние исследований и актуальность проблемы.** В научном сообществе повышенное внимание уделяется разработке оборудования, позволяющего осуществлять тонкую сепарацию и сортировку аграрных материалов. Традиционные способы предварительной обработки, среди которых вибрационные, воздушные и комбинированные методы, во многом определили основу современных технологических линий.

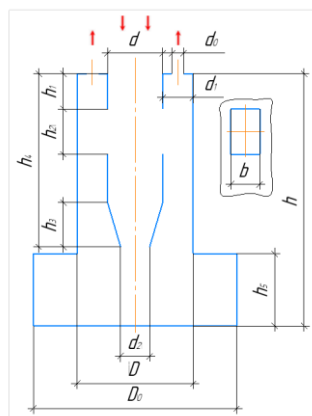


Рисунок 1 – Основные размеры центробежного классификатора

Существующая научная литература отражает значительные достижения в улучшении конструкций сепарационных установок, однако на практике все еще нередко эксплуатируются машины с невысокой точностью разделения и большими энергорасходами. Подобные агрегаты

зачастую не справляются с выходящими за рамки обычных параметров показателями потока сырья, особенно когда речь идет о культурах с мелкими, неоднородными или трудно отделяемыми фракциями. К тому же, в условиях изменяющихся климатических факторов, существенно влияющих на структуру исходного растительного материала, оборудование, разработанное по устаревшим схемам, чаще всего требует дополнительной переналадки или не подходит вовсе.

Участившиеся исследования показывают, что модернизация агропромышленной техники должна сочетаться с новыми способами анализа и контроля состояния сырья. Внедрение цифровых решений, в том числе систем мониторинга в реальном времени, позволяет более точно определять настройки рабочих органов и своевременно корректировать технологический процесс. Такой подход находит отклик как у крупных сельскохозяйственных предприятий, так и у компаний среднего масштаба, стремящихся повысить эффективность производства без существенного расширения штата персонала.

Актуальность задач по совершенствованию сепарационных и сортировочных технологий подтверждается мировыми тенденциями, направленными на ресурсосбережение и экологически ориентированное ведение хозяйства. Производители стремятся получать продукцию равномерного качества при минимуме потерь, что требует поиска альтернатив традиционным методам классификации. При этом существенную роль играет не только достижение требуемой точности фракционирования, но и адаптивность применяемого оборудования к переменчивым условиям: объёмам сырья, сезонным факторам, особенностям перерабатываемых культур. Так, в работе [1] была предложена усовершенствованная конструкция подобного аппарата (рисунок 1), позволяющая проводить эффективное фракционирование за счёт комбинированного воздействия вращающегося потока и

регулируемых щелей для вывода фракций. Однако, несмотря на имеющиеся конструктивные преимущества, остаётся нерешённой проблема повышения селективности работы классификатора, особенно в условиях переменной крупности исходного материала.

**Цель исследований.** Целью работы является численное моделирование улавливания частиц в центробежном классификаторе при варьировании размеров прямоугольных щелей с целью выявления оптимальных параметров, обеспечивающих требуемую селективность разделения.

**Материалы и методы исследований.** Для исследования процессов разделения мелкодисперсных частиц в модернизированном центробежном классификаторе была выбрана методология численного эксперимента с использованием программного пакета ANSYS Fluent. Данный подход позволяет детально проанализировать гидродинамическую картину внутри устройства при варьировании геометрических параметров и граничных условий, не прибегая к затратным лабораторным или промышленным экспериментам.

В основе современных численных методов решения уравнений в частных производных (например, уравнений Навье–Стокса для турбулентных потоков) лежат несколько ключевых концепций: метод конечных разностей, метод конечных элементов и метод конечных объёмов. Метод конечных разностей преимущественно оперирует сеткой одинакового шага и аппроксимирует производные, используя дискретные значения в узлах сетки. Метод конечных элементов, напротив, разрезает вычислительную область на набор элементарных участков (треугольников, тетраэдров и т. д.), для каждого из которых формируются локальные аппроксимации функций. Наконец, метод конечных объёмов сводит расчёт к интегрированию дифференциальных уравнений по малым объёмам, что обеспечивает сохранение фундаментальных балансов (массы, импульса,

энергии) внутри каждого объёма. Именно последний подход наиболее часто реализуется в CFD-программах (Computational Fluid Dynamics), к числу которых относится ANSYS Fluent.

В ходе настоящего исследования была создана трёхмерная модель классификатора, после чего произведено формирование расчётной сетки, совместимой с методами конечных объёмов. В качестве входного граничного условия на штуцере подачи задавалась постоянная скорость потока воздуха 12 м/с, а на выходе поддерживалось атмосферное давление. Внутри аппарата учитывался эффект «отскока» частиц от стенок, то есть при столкновении с твёрдой поверхностью мелкодисперсная фракция не прилипала, а отражалась, сохраняя часть своей кинетической энергии. Параллельно изучалось влияние размеров прямоугольной щели для вывода части потока, причём изменялось раскрытие от 100% до 10% исходной величины. Данная корректировка геометрии позволила выявить связь между степенью открытия щели и вероятностью удержания частиц внутри классификатора.

**Результаты исследований.** Анализ данных, представленных на рисунке 2, позволяет выявить закономерности в характере улавливания мелкодисперсных частиц при изменении степени раскрытия прямоугольных щелей выходного канала. На графике представлены три кривые, соответствующие различным конфигурациям щелей: 1 – 10% от исходного размера, 2 – 40% и 3 – 100%.

При полном раскрытии щелей (линия 3) наблюдается более высокое улавливание в диапазоне мельчайших частиц (ниже 30–35 мкм) по сравнению с другими вариантами. Очевидно, что увеличенный выходной зазор способствует созданию более благоприятного режима для осаждения ультрадисперсных включений: часть из них “теряет” достаточное количество кинетической энергии и остаётся в зоне классификации.

Однако по мере роста диаметра частиц эффективность аппарата при такой конфигурации растёт относительно медленнее.

Наименьшее раскрытие (10%, линия 1) поначалу даёт низкий уровень улавливания очень мелких частиц: для значений размера до 30 мкм видна сравнительно малая вероятность удержания. Однако уже начиная с 40–45 мкм, кривая резко поднимается и вплоть до 150–160 мкм поддерживается на самом высоком уровне среди всех исследованных вариантов. Это означает, что уменьшение проходного сечения, хотя и не обеспечивает столь результативную работу с ультрадисперсным материалом, зато даёт значимые преимущества при осаждении средних и относительно крупных частиц.

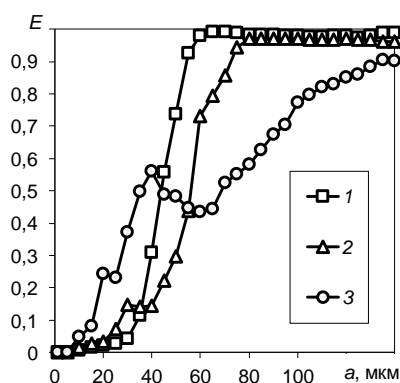


Рисунок 2 – Степень улавливания частиц аппаратом при различной степени раскрытия щелей: 1 – 10 %; 2 – 40 %; 3 – 100 %

Промежуточное раскрытие (40%, линия 2) демонстрирует “средний” характер улавливания. На малых размерах фракций (ниже 30 мкм) показатель селективности выше, чем у варианта 10%, но существенно уступает полному раскрытию. При этом для частиц порядка 60–120 мкм результирующая степень улавливания выравнивается и достигает достаточно высоких значений. Это подтверждает, что умеренное раскрытие обеспечивает более сбалансированный режим сепарации, не



являясь, однако, оптимальным ни для особо мелкой, ни для крупной дисперсной фазы.

При степени открытия 100% (линия 3) для частиц размером около 20 мкм эффективность  $E$  достигает 0,24, что существенно превосходит аналогичные показатели для других вариантов конфигурации (0,02 при 10% и 0,03 при 40%). Однако дальше кривая набирает высоту более плавно и лишь к 90–100 мкм выходит на уровень 0,67–0,77. Максимальные значения вплоть до 0,93–0,94 наблюдаются при размерах 170–180 мкм.

**Выводы.** 1. Проведённое численное моделирование показало, что при полном раскрытии щелей центробежный классификатор демонстрирует наилучшие результаты по улавливанию ультрадисперсных частиц. 2. Наименьшее сечение выходного канала обеспечивает максимальную селективность по отношению к средним и крупным фракциям, но плохо справляется с захватом очень мелких частиц, что может приводить к дополнительным потерям ценного мелкодисперсного сырья. 3. Оптимальным решением для широкого диапазона размеров дисперсной фазы выступает промежуточное раскрытие щелей (около 40%).

#### 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 parametriceskoj 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.