

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 МОДЕЛИРОВАНИЕ ФРАКЦИОНИРОВАНИЯ ЧАСТИЦ В КЛАССИФИКАТОРЕ ПРИ ВАРЬИРОВАНИИ РАЗМЕРОВ КОЛЬЦЕВОГО ПРОСТРАНСТВА

NUMERICAL MODELING OF PARTICLE FRACTIONATION IN A CLASSIFIER WITH VARIABLE ANNULAR SPACE

Прец Мария Арнольдовна
Старший преподаватель
SPIN – код автора: 8457-2157
precmari@gmail.com

Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

Prets Maria Arnoldovna
Senior Lecturer
RSCI SPIN-code: 8457-2157
precmari@gmail.com

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 агропромышленном комплексе возрастает потребность в высокоэффективных технологиях классификации сыпучего сырья для повышения качества готовых продуктов и снижения затрат на переработку. В представленной работе выполнено численное моделирование при варьировании диаметра вихревого пространства d_s . Исследование проводилось путём создания трёхмерных геометрических моделей с последующей генерацией расчётных сеток разной плотности, что позволило выявить оптимальные условия для достижения сеточной независимости. С помощью моделей газодинамики и дисперсной фазы DPM изучено влияние указанных параметров на граничный размер сепарируемых частиц, выражаемый процентилем a_5 . Полученные результаты подтверждают линейную взаимосвязь между диаметром завихрений d_s и границей мелкой фракции a_5 (коэффициент детерминации $R^2 = 0,92$), что указывает на достаточно простой характер регулирования процесса. Научная новизна исследования заключается в комплексном применении вычислительных методов для анализа структуры многократного вихревого потока и прогнозирования гранулометрического состава отбираемых фракций

The demand for highly efficient classification technologies for bulk raw materials is increasing in the agro-industrial sector to improve product quality and reduce processing costs. This study presents numerical modeling with variations in the diameter of the vortex space d_s . The research was conducted by creating three-dimensional geometric models followed by the generation of computational grids of different densities, allowing the identification of optimal conditions for achieving grid independence. Using gas dynamics models and the Discrete Phase Model (DPM), the influence of these parameters on the cutoff size of separated particles, expressed by the a_5 percentile, was investigated. The obtained results confirm a linear relationship between the vortex diameter d_s and the cutoff size of fine fractions a_5 (coefficient of determination $R^2 = 0,92$), indicating a relatively simple process regulation mechanism. The scientific novelty of the study lies in the comprehensive application of computational methods for analyzing the structure of multiple vortex flows and predicting the granulometric composition of the separated fractions

Ключевые слова: МУЛЬТИВИХРЕВОЙ КЛАССИФИКАТОР, АГРОПРОМЫШЛЕННЫЙ КОМПЛЕКС, ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФРАКЦИОНИРОВАНИЯ, ДИСПЕРСНАЯ ФАЗА, ГРАНИЧНЫЙ РАЗМЕР

Keywords: MULTIVORTEX CLASSIFIER, AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX, NUMERICAL MODELING, FRACTIONATION EFFICIENCY, DISCRETE PHASE, CUTOFF SIZE

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-207-037>

<http://ej.kubagro.ru/2025/03/pdf/37.pdf>

Введение. Современный агропромышленный комплекс предъявляет всё более жёсткие требования к качеству и однородности исходного сырья, применяемого в различных технологических процессах. Наряду с классическими методами очистки и сортировки всё большую популярность приобретают устройства, позволяющие тонко разделять многокомпонентные смеси по размеру частиц и другим физико-механическим характеристикам. Высокая точность фракционирования особенно важна для улучшения семенного материала, производства комбикормов с заданными свойствами и получения порошковых субстанций требуемой дисперсности.

При этом одной из ключевых задач остаётся повышение эффективности отбора крупной и мелкой фракций с минимизацией потерь целевых компонентов. В условиях постоянно увеличивающихся объёмов перерабатываемого сырья и ужесточения экологических норм остро встает вопрос об энергетически выгодных, надёжных и компактных методах классификации. Традиционные пылеуловители и сепарационные установки не всегда справляются с возрастающими нагрузками либо требуют сложных многоступенчатых схем. Поэтому разработка и внедрение новых типов классификаторов с высоким КПД и гибкими возможностями настройки под различные материалы представляются актуальными и востребованными.

Существенный интерес вызывает использование многократного вихревого потока для более тонкого разделения, поскольку завихрения создают большие центробежные силы и формируют стабильные зоны движения твёрдых частиц. С помощью таких вихревых систем удаётся эффективно управлять траекторией и скоростью осаждения отдельных фракций, что повышает точность отделения. Более того, конструкции, базирующиеся на мультивихревом принципе, часто отличаются

компактностью и сравнительно невысоким энергопотреблением по сравнению с некоторыми классическими сепараторами, что делает их особенно привлекательными для применения в АПК. Внедрение подобных технологий способствует как повышению рентабельности переработки сырья, так и улучшению экологической обстановки в производственных помещениях за счёт снижения пылевыведения и сокращения выбросов в окружающую среду. Всё это подтверждает значимость исследований, ориентированных на совершенствование процессов многоступенчатой классификации в агропромышленном секторе, и стимулирует дальнейшее развитие устройств вихревого типа, способных решать широкий спектр технологических задач.

Развитие методов численного моделирования позволяет значительно ускорить процесс проектирования новых классификаторов, избегая затратных экспериментальных исследований на ранних этапах. Современные вычислительные подходы дают возможность детально анализировать аэродинамику газового потока и движение частиц в вихревом пространстве, что особенно важно при разработке энергоэффективных и компактных аппаратов.

Системный подход к изучению мультивихревых классификаторов и моделирование их рабочих характеристик открывают новые перспективы для совершенствования процессов разделения в агропромышленном секторе. Повышение точности классификации частиц позволяет минимизировать потери полезного сырья и добиться большей однородности конечных продуктов, что особенно важно для сельскохозяйственных и пищевых технологий. Таким образом, внедрение инновационных методов исследования и оптимизации работы классификаторов способствует развитию отрасли и расширению возможностей их применения в различных технологических процессах.

Состояние исследований и актуальность проблемы. Вопросы повышения эффективности пылеулавливания и классификации гранулированного сырья давно привлекают внимание исследователей в области переработки продукции сельского хозяйства [1]. В научной литературе описано множество конструктивных решений и инженерных подходов к созданию сепараторов и вихревых аппаратов, в том числе циклонов, центробежных классификаторов и других устройств, использующих эффекты турбулентного перемешивания и центробежных сил. Однако высокий уровень дисперсности исходного материала, наряду с необходимостью точного разделения на фракции, требует постоянного совершенствования имеющихся технологий и разработки новых технических систем.

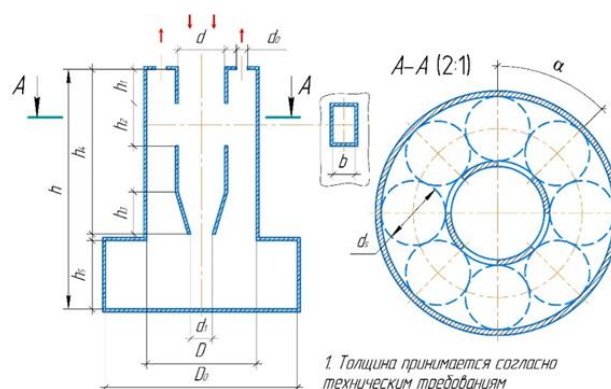


Рисунок 1 – Мультивихревой классификатор

Одним из перспективных путей развития является внедрение методов численного моделирования процессов газодинамики и движения частиц. Вычислительные эксперименты на основе современных программных комплексов позволяют визуализировать и анализировать трехмерные поля скоростей, зону действия центробежных сил, а также траектории движения различных по размеру частиц. Такой подход существенно ускоряет процесс поиска оптимальных геометрических параметров для устройств, работающих на принципах вихревой сепарации,

и снижает затраты на изготовление опытных образцов, поскольку значительная часть экспериментов переносится в виртуальную среду.

При этом всё ещё недостаточно полно исследованы вопросы влияния пространственного расположения каналов, зазоров и конфигурации внутреннего объёма на селективность отделения. Особенно это касается аппаратов с многократным формированием завихрений, где перемежающийся вращательный поток, проходя через систему прямоугольных либо щелевых отверстий, способен обеспечивать более тонкий отбор фракций. Актуальность данной проблемы в контексте АПК связана не только с совершенствованием процессов очистки и сортировки сырья, но и с обеспечением требуемой однородности конечных продуктов, будь то зерновые культуры, комбикорма или минеральные удобрения.

В работе [1] было предложено устройство, в котором формируется множество завихрений в пространстве между труб. Дальнейшее исследование возможностей подобной конструкции с позиций гидродинамики и фракционного анализа позволяет расширить область применения вихревых технологий и оптимизировать их характеристики под специфику агропромышленной отрасли.

Цель исследований. Целью работы является численное моделирование мультивихревого классификатора (рис. 1).

Материалы и методы исследований. Исследование проводилось в три основных этапа. Сначала была создана серия из шестнадцати объёмных 3D-моделей мультивихревого классификатора, каждая из которых базировалась на определённых габаритах и имела одно изменённое конструктивное измерение в заданном диапазоне. В частности, диаметр вихревого пространства d_s варьировался от 17,5 до 29 мм. Для корректировки d_s дополнительно варьировали диаметр внутренней трубы d (в пределах 43–66 мм).

На втором этапе из каждой 3D-модели формировались проточные объёмы, по которым строились расчётные сетки. Основными параметрами сеточного построения служили: максимальный размер ячейки (MS), угол нормали к криволинейной поверхности (CNA), а также число ячеек в узких зазорах (CPG). Критерием сеточной независимости выбрали стационарный показатель потерь давления (Δp): при увеличении числа ячеек свыше 437 тыс. значение Δp практически переставало меняться.

На завершающем этапе задавались граничные и исходные условия: температура воздушного потока ($25\text{ }^{\circ}\text{C}$), плотность сферических частиц (1075 кг/м^3), их размер (от 1 до 200 мкм), скорость подачи воздуха (12 м/с) и атмосферное давление на выходе (10^5 Па). В рамках модели дисперсной фазы DPM учитывались факторы прилипания частиц на стенках бункера и упругого отскока на остальной поверхности. Секторное моделирование позволяло сокращать вычислительные затраты, сохраняя при этом осесимметрию внутреннего объёма. Эффективность устройства оценивалась с помощью процентиля a_5 , эффективность устройства оценивалась с помощью процентиля a_5 , который представляет собой размер частиц, не более которого в улавливаемой фракции содержится 5 % от общей массы дисперсной фазы. Этот параметр позволяет определить граничный размер отсечения мелкой фракции, что особенно важно для контроля селективности разделения частиц различного размера. Чем ниже значение a_5 , тем эффективнее классификатор справляется с удалением более мелких частиц, обеспечивая точность фракционирования. В ходе моделирования была выявлена линейная зависимость a_5 от диаметра завихрений в кольцевом пространстве d_s , что позволяет прогнозировать поведение аппарата при изменении его геометрических параметров.

Результаты исследований. В ходе вычислительного эксперимента установлено, что ключевым фактором, влияющим на гранулометрический состав отбираемых частиц, служит диаметр вихревого пространства d_s . До

этого отмечалось, что увеличение d_s снижает значение процентиля a_5 , то есть уменьшает размер тех частиц, которые составляют 5 % от совокупной массы дисперсной фазы в улавливаемой фракции. Данная тенденция связана с более интенсивной циркуляцией потока через прямоугольные щели при увеличенных поперечных сечениях кольцевых зазоров, что способствует эффективному уносу мелких частиц.

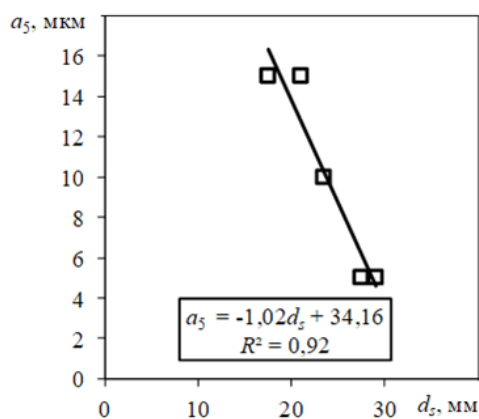


Рисунок 2 – Зависимость процентиля a_5 от диаметра завихрений в кольцевом пространстве мультивихревого классификатора

В ходе исследований установлена линейная зависимость процентиля a_5 от диаметра завихрений d_s , описываемая уравнением вида $a_5 = -1,02d_s + 34,16$ с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,92$ (рис. 2). С ростом d_s наблюдается более выраженная сортировка по размеру, поскольку усиленные центробежные силы отводят крупные фракции к стенкам и в зону осаждения, тогда как мелкие частицы продолжают движение вверх вместе с газовым потоком. Таким образом, изменение геометрического параметра d_s даёт возможность «тонкой настройки» классификатора под требования по отсечению нежелательных или, напротив, ценных мелкодисперсных фракций.

Исследование подтвердило возможность регулирования характеристик фракционирования за счёт изменения геометрических параметров классификатора, что открывает перспективы для его адаптации

к конкретным технологическим процессам в агропромышленном комплексе. Кроме того, численный анализ позволил выявить оптимальные параметры расчётной сетки, что снижает вычислительные затраты при дальнейшем моделировании. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании классификаторов для тонкого разделения материалов различной природы, включая зерновые культуры, комбикорма и минеральные удобрения.

Выводы. 1. Параметр d_s является одним из ключевых факторов, определяющих граничный размер отделяемых фракций в мультивихревом классификаторе. Увеличение диаметра вихревого пространства приводит к снижению процентиля a_5 и повышенной селективности по мелким частицам. 2. Получена линейная зависимость процентиля a_5 от d_s с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,92$, что указывает на высокую степень предсказуемости модели. 3. Рост скорости газа в прямоугольных щелях усиливает завихрения, улучшая условия для разделения твёрдой фазы на крупную и мелкую фракции.

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.