

УДК 631.3

UDC 631.3

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)

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗДЕЛЕНИЯ СЫПУЧЕГО ПОРОШКА ПО КРУПНОСТИ В КЛАССИФИКАТОРЕ ДЛЯ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

MODELING OF BULK POWDER SIZE SEPARATION IN A CLASSIFIER FOR THE AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX

Голубева Ирина Львовна
Канд. техн. Наук, доцент
*Казанский государственный энергетический
университет, Казань, Россия*

Golubeva Irina Lvovna
Cand.Tech.Sci., associate professor
*Kazan State Power Engineering University, Kazan,
Russia*

Оловянишников Анатолий Дмитриевич
Студент
*Казанский государственный энергетический
университет, Казань, Россия*

Olovyanishnikov Anatoly Dmitrievich
Student
*Kazan State Power Engineering University, Kazan,
Russia*

Якимов Николай Дмитриевич
Д-р физ.-мат. наук, профессор
SPIN – код автора: 2960-4372
*Казанский государственный энергетический
университет, Казань, Россия*

Yakimov Nikolay Dmitrievich
Dr.Sci.Phys.-Math., Professor
RSCI SPIN-code: 2960-4372
*Kazan State Power Engineering University, Kazan,
Russia*

Современные вызовы, стоящие перед агропромышленным сектором, обуславливают необходимость внедрения высокоэффективных технологий, направленных на качественное разделение сыпучих веществ по фракциям, в том числе зерновых загрязнений, пылевых частиц и минеральных компонентов. Среди перспективных подходов особое место занимают мультивихревые классификаторы, в которых организуются устойчивые закрученные потоки, способствующие селективному разделению частиц по размеру и массе. В представленной работе выполнено численное моделирование работы классификатора, функционирующего в диапазоне фракций до 140 мкм. С использованием ANSYS Fluent исследовано поведение газа и частиц в межтрубном пространстве, где формируются вихревые структуры. Рассмотрены две модели с различной плотностью расчётной сетки (814786 и 1180100 ячеек) для оценки сеточной независимости. Установлено, что более детализированная модель позволяет достовернее отразить динамику разделения, особенно в критическом диапазоне размеров 20–70 мкм. Выявлено, что чрезмерное раскрытие щелей нарушает стабильность вихрей и снижает эффективность устройства. Полученные зависимости фракционной эффективности от размера частиц могут быть использованы при проектировании оборудования для тонкой очистки сырья

The current challenges faced by the agro-industrial sector necessitate the implementation of high-efficiency technologies aimed at precise fractional separation of bulk materials, including grain contaminants, dust particles, and mineral components. Among the promising approaches, special attention is given to multivortex classifiers, where stable swirling flows are organized to facilitate selective separation of particles by size and mass. In the present study, numerical modeling was performed to analyze the operation of a classifier functioning in the particle size range up to 140 μm . Using ANSYS Fluent, the behavior of gas and particles in the interpipe space, where vortex structures are formed, was investigated. Two computational models with different mesh densities (814,786 and 1,180,100 cells) were examined to assess mesh independence. It was found that the more detailed model provides a more reliable representation of the separation dynamics, especially in the critical size range of 20–70 μm . Excessive slot opening was shown to disrupt vortex stability and reduce classification efficiency. The obtained dependencies of fractional efficiency on particle size can be used in the design of equipment for fine purification of raw agricultural materials

Ключевые слова: АГРОПРОМЫШЛЕННЫЙ

Keywords: AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX,

КОМПЛЕКС, МУЛЬТИВИХРЕВОЙ
КЛАССИФИКАТОР, ЧИСЛЕННОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ, ANSYS FLUENT,
ФРАКЦИОННАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ,
ВИХРЕВЫЕ СТРУКТУРЫ, CFD, СЕТОЧНАЯ
НЕЗАВИСИМОСТЬ

MULTIVORTEX CLASSIFIER, NUMERICAL
MODELING, ANSYS FLUENT, FRACTIONAL
EFFICIENCY, VORTEX STRUCTURES, CFD,
MESH INDEPENDENCE

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-208-043>

Введение. Современный агропромышленный комплекс (АПК) находится в фазе активной технологической трансформации. Одним из ключевых направлений является совершенствование процессов механической обработки, очистки и разделения сельскохозяйственного сырья. Качественное фракционирование не только повышает потребительские свойства продукции, но и увеличивает эффективность последующих технологических операций – от помола до сушки и упаковки.

Основная проблема, с которой сталкиваются существующие решения, заключается в ограниченной эффективности классификации мелкодисперсных частиц, особенно в диапазоне менее 100 мкм. В таких условиях традиционные циклонные и инерционные классификаторы демонстрируют снижение производительности, нестабильность и высокую чувствительность к параметрам потока. Более того, большинство таких устройств не адаптированы к работе с переменными условиями окружающей среды и требуют регулярной очистки из-за накопления загрязнений на внутренних поверхностях.

Одним из перспективных направлений является использование мультिवихревых классификаторов, в которых поток газа организуется таким образом, чтобы формировались устойчивые закрученные структуры – вихри. Вихревые потоки создают условия для естественного расслоения частиц, где более легкие и мелкие фракции увлекаются к оси, а более тяжелые и крупные выносятся к периферии. Такая организация движения

не требует механических разделителей, снижает износ оборудования и повышает его ресурс.

Особый интерес представляют классификаторы, в которых вихревые структуры формируются в межтрубных каналах [1]. Это позволяет увеличить площадь взаимодействия потока и частиц, а также реализовать управление траекторией движения частиц за счет изменения геометрии каналов, углов ввода и степени открытия щелей.

Современные программные комплексы, такие как ANSYS Fluent, предоставляют широкие возможности для моделирования турбулентных течений с учетом движения дисперсной фазы. Это открывает путь к точному анализу эффективности новых конструкций классификаторов еще на этапе проектирования, до создания физических прототипов.

Таким образом, внедрение численного моделирования в процесс разработки оборудования для АПК позволяет существенно снизить затраты на испытания, повысить точность классификации и ускорить вывод новых решений на рынок.

Состояние исследований и актуальность проблемы. Современные технологические процессы агропромышленного комплекса всё чаще требуют высокоточной сепарации материалов, особенно на стадиях сортировки, очистки и подготовки сельскохозяйственного сырья. Это особенно актуально при работе с зерновыми культурами, мукой, комбикормами и минеральными удобрениями, где присутствуют различные фракции частиц, отличающиеся по размеру и плотности. Разделение таких смесей позволяет не только повысить товарную ценность конечного продукта, но и снизить износ оборудования, сократить затраты на последующую обработку и обеспечить санитарно-гигиенические требования.

В условиях необходимости тонкой сепарации (в диапазоне 20–100 мкм) их эффективность существенно снижается. Это связано с тем, что

взаимодействие потока с мелкодисперсными частицами становится крайне чувствительным к изменению конструкции аппарата, режимов подачи воздуха, геометрии стенок и другим параметрам.

Решением может стать внедрение мультивихревых классификаторов, в которых используются контролируемые закрученные потоки. Такие устройства способны генерировать устойчивые вихревые структуры, формирующиеся за счёт специально организованной геометрии: щелей, каналов и направляющих элементов. Исследования показывают, что вихри позволяют более точно отделять фракции, минимизируя перекрёстное загрязнение. Однако сложность модели движения частиц в вихревых потоках требует привлечения вычислительных методов высокого уровня.

Цель исследований. Целью настоящего исследования является разработка и численный анализ модели мультивихревого классификатора с использованием средств вычислительной гидродинамики (ANSYS Fluent) для оценки фракционной эффективности разделения частиц размером до 140 мкм. В рамках цели ставится задача определить влияние дискретизации расчётной сетки на точность результатов, провести анализ сеточной независимости

Материалы и методы исследований. Исследуемый объект представлял собой фрагмент конструкции мультивихревого классификатора – сектор, в котором реализуются основные вихревые явления. Геометрическая модель включала центральную ось, полость с системой труб и щелей, через которые подаётся воздух, инициирующий формирование вихрей.

Для построения расчётной сетки использовался ANSYS Meshing. Было создано две версии модели с различной степенью детализации: 1. Модель 1 включала 814786 объёмных ячеек, из которых 200249 приходились на поверхность. Минимальный размер ячейки составлял 0,023 мм, максимальный – 0,608 мм. Использовано пять пристеночных

слоёв. Максимальное значение показателя skewness составляло 0,53; 2. Модель 2 состояла из 1180100 ячеек (поверхностная сетка – 269986 ячеек). Минимальный размер – 0,0203 мм, максимальный – 0,521 мм. Аналогично были заданы пять пристеночных слоёв с контролем размеров для точного описания турбулентности.

Граничные условия на входе задавались как скорость потока с постоянной величиной – 12 м/с, соответствующей рабочим режимам классификатора. На выходе – атмосферное давление. Стенки задавались как неподвижные с отражением частиц и налипанием частиц на стенках бункера.

Дисперсная фаза представлялась в виде инерционных частиц, вводимых в поток с фиксированной скоростью и массой. Расчёт траекторий проводился с учётом силы сопротивления, гравитации и взаимодействия с вихревой структурой. Размер частиц варьировался от 1 до 140 мкм. Каждая серия расчётов включала более 100 траекторий частиц для повышения статистической достоверности.

Фракционная эффективность определялась как отношение количества частиц определённого размера, покинувших устройство через заданный выход, к общему количеству частиц, поданных на вход. Для анализа чувствительности модели к качеству сетки производилось сопоставление результатов двух моделей с различным числом ячеек. Это позволяло судить о влиянии дискретизации на поведение вихрей и, как следствие, на эффективность классификации.

Результаты исследований. В результате проведенного численного моделирования были получены данные, позволяющие глубоко проанализировать внутреннюю аэродинамическую структуру мультивихревого классификатора, а также установить закономерности изменения фракционной эффективности в зависимости от геометрических и сеточных параметров модели. Использование двух расчетных сеток

различной плотности позволило провести всестороннее сравнение полученных результатов и определить влияние степени дискретизации на точность моделирования.

На первом этапе были визуализированы поля скоростей и векторы направлений движения газа в межтрубном пространстве устройства. Результаты показали, что внутри классификатора формируются множественные вторичные вихри, образующие замкнутые циркуляционные петли. На рисунке 1 представлена картина скорости с наложением векторного поля, иллюстрирующая наличие шести устойчивых вихревых зон, равномерно распределённых по окружности. Эти вихри создают аэродинамический барьер, разделяющий частицы по инерционным свойствам: мелкодисперсные фракции (до 20-30 мкм) стремятся к осевой части классификатора, тогда как более крупные фракции отбрасываются к периферии и задерживаются в внешних зонах.

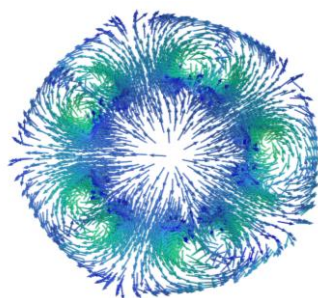


Рисунок 1 – Образование вихрей в межтрубном пространстве

Было выявлено, что при степени открытия щелей до 120 % наблюдается нарушение симметрии вихревых структур (рис. 1). В некоторых зонах циркуляция ослабевала, формируя более слабые или нестабильные вихри, в других – вихри смещались и начинали взаимодействовать друг с другом. Это приводило к разрушению устойчивых траекторий движения частиц и снижению точности их разделения. Особенно заметным это влияние становилось для частиц

среднего размера (20-70 мкм), чья траектория зависела как от инерции, так и от структуры локального потока.

Анализ фракционной эффективности (рис. 2) продемонстрировал незначительное различие между моделями 1 (с 814786 ячейками) и 2 (с 1180100 ячейками).

В начальной зоне графика ($a < 10$ мкм) эффективность была близка к нулю, что объясняется тем, что частицы малого размера следуют за воздушным потоком и не отклоняются вихревой структурой. При дальнейшем увеличении размера (до 20-30 мкм) наблюдается резкий рост эффективности, достигающей значения около 0,6. Кривые имеют ярко выраженный провал около 25 мкм, связанный, вероятно, с неустойчивостью вихрей в этой области и недостаточной плотностью сетки для их точного описания.

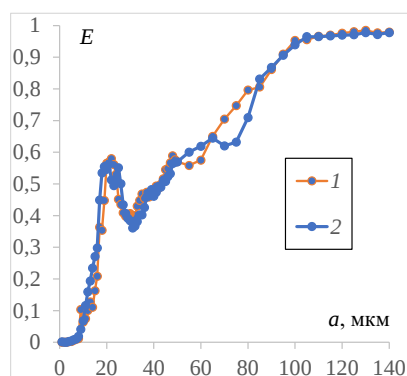


Рисунок 2 – Фракционная эффективность от размера частиц при различном количестве ячеек в сеточной модели, шт.: 1 – 200249; 2 – 269986

Для диапазона 40-70 мкм фракционная эффективность продолжала расти, но с меньшим градиентом. Это особенно важно, так как в практических условиях большинство промышленных фракций попадает именно в этот диапазон.

При $a > 80$ мкм эффективность достигала плато, приближаясь к значению 0,95. Дальнейшее увеличение размера частиц почти не влияло на результат, что свидетельствует о высокой селективности устройства при

классификации крупнодисперсных компонентов. Это подтверждает целесообразность применения мультивихревых классификаторов для предварительной или окончательной очистки сыпучих агропромышленных продуктов.

Сравнение между двумя моделями показало, что сеточная независимость достигается при числе ячеек, превышающем 814786 шт. Разница между кривыми эффективности в наиболее чувствительных зонах (20-70 мкм) достигала 8–10%, что при практическом применении может оказать существенное влияние на производительность и чистоту отделяемых фракций.

Выводы. 1. Установлено, что при использовании расчетной сетки с числом ячеек более 814786 шт. достигается сеточная независимость результатов. Модели с меньшей детализацией могут давать искажённые значения эффективности, особенно в критических зонах разделения частиц среднего размера. 2. Зависимость фракционной эффективности от размера частиц носит характер S-образной кривой, с резким ростом в области 20–60 мкм и стабилизацией при размерах свыше 80 мкм. Эта особенность должна учитываться при проектировании устройств, ориентированных на конкретный зерновой или пылевой материал.

Библиографический список

1. Прец, М. А. Анализ эффективности работы классификатора с цилиндрической внутренней трубой при изменении глубины погружения / М. А. Прец, А. М. Мутинов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2024. – № 204. – С. 460-468.

References

1. Prec, M. A. Analiz jeffektivnosti raboty klassifikatora s cilindricheskoj vnutrennej truboj pri izmenenii glubiny pogruzhenija / M. A. Prec, A. M. Muginov // Politematicheskij setevoj jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2024. – № 204. – S. 460-468.