

УДК 631.362

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки)

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
СЕПАРАЦИОННОГО УСТРОЙСТВА
ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ ЗЕРНОВЫХ
СМЕСЕЙ**

Нафиков Инсаф Рафитович

Канд. техн. наук

*Казанский государственный аграрный
университет*

Герке Андрей Романович

Канд. техн. наук, доцент

*Казанский национальный исследовательский
технологический университет, Казань, Россия*

Зинурова Карина Ирековна

Студент

*Казанский государственный энергетический
университет, Казань, Россия*

Якимов Николай Дмитриевич

Д-р физ.-мат. наук, профессор

SPIN – код автора: 2960-4372

*Казанский государственный энергетический
университет, Казань, Россия*

Повышение требований к качеству зернового сырья и семенного материала требует совершенствования пневматических сепарационных устройств, обеспечивающих стабильное разделение частиц по размеру и плотности при минимальных энергетических затратах. В работе выполнено трехмерное численное моделирование вихревого сепарационного устройства для пневматической очистки зерновых смесей в программном комплексе ANSYS Fluent. Рассмотрены две конструкции корпуса, различающиеся конфигурацией нижней части: вариант 1 со скругленными стенками без явно выраженного бункера и вариант 2 с развитой конической частью. Геометрические параметры моделей унифицированы по диаметру центральной внутренней трубы 110 мм и числу периферийных трубок (6 шт.). Траектории частиц моделировались с использованием дискретной фазовой модели для условных сферических частиц плотностью 1000 и 3000 кг/м³ в диапазоне размеров 5–200 мкм. На основе расчетных данных построены кривые эффективности разделения как функции эквивалентного диаметра частиц для обеих конструкций. Показано, что конструкция 1 обеспечивает более резкий переход от зоны

UDC 631.362

4.3.1. Technologies, machinery and equipment for the agro-industrial complex (technical sciences)

**NUMERICAL MODELING OF A SEPARATION
DEVICE FOR PNEUMATIC CLEANING OF
GRAIN MIXTURES**

Nafkov Insaf Rafitovich

Cand.Tech.Sci.

*Kazan State Power Engineering University, Kazan,
Russia*

Gerke Andrey Romanovich

Cand.Tech.Sci., Associate Professor

*Kazan National Research Technological University,
Kazan, Russia*

Zinurova Karina Irekovna

Student

*Kazan State Power Engineering University, Kazan,
Russia*

Yakimov Nikolay Dmitrievich

Dr.Sci.Phys.-Math., Professor

RSCI SPIN-code: 2960-4372

*Kazan State Power Engineering University, Kazan,
Russia*

Increasing requirements for the quality of grain raw materials and seed material necessitate the improvement of pneumatic separation devices that ensure stable particle separation by size and density with minimal energy consumption. This study presents three-dimensional numerical modeling of a vortex-type separation device used for pneumatic cleaning of grain mixtures, performed in the ANSYS Fluent software package. Two design configurations of the device housing were considered, differing in the geometry of the lower section: variant 1 with rounded walls and no pronounced bunker, and variant 2 with an extended conical section. The geometric parameters of the models were unified with respect to the diameter of the central inner tube (110 mm) and the number of peripheral tubes (six). Particle trajectories were simulated using the discrete phase model for idealized spherical particles with densities of 1000 and 3000 kg/m³ in the size range of 5–200 μm. Based on the calculation results, separation efficiency curves were obtained as functions of particle equivalent diameter for both designs. It was shown that design 1 provides a sharper transition from the zone of incomplete separation to the region of high efficiency, whereas design 2 demonstrates an extended transition zone and local decreases in efficiency caused by recirculation zones within the flow

неполного разделения к области высокой эффективности, в то время как для конструкции 2 наблюдается растянутая область перехода и локальные снижения эффективности, обусловленные рециркуляционными зонами потока

Ключевые слова: АГРОПРОМЫШЛЕННЫЙ КОМПЛЕКС, ПНЕУМАТИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА, СЕПАРАЦИОННОЕ УСТРОЙСТВО, ВИХРЕВОЙ ПОТОК, ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Keywords: AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX, PNEUMATIC CLEANING, SEPARATION DEVICE, VORTEX FLOW, NUMERICAL MODELING

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-214-027>

Введение. Развитие агропромышленного комплекса сопровождается устойчивым ростом требований к качеству зернового сырья, семенного материала и кормовых смесей. Наличие минеральных включений, металлических частиц, пыли и легких органических примесей приводит к снижению товарных характеристик продукции, повышенному износу перерабатывающего оборудования, риску аварий и пожаров при дальнейших технологических операциях. Особую актуальность проблема эффективной очистки приобретает при переходе к ресурсосберегающим технологиям и высокопроизводительным линиям, где даже небольшое ухудшение эффективности сепарации приводит к значимым суммарным потерям.

Традиционно для подготовки зернового материала используются решетные и комбинированные зерноочистительные машины с вибрационными и воздушными каналами.

Конструкторская проработка таких устройств традиционно опиралась на упрощенные расчетные схемы и натурные эксперименты. Однако опыт эксплуатации показывает, что небольшие изменения геометрии каналов, диаметров труб и конфигурации нижней части корпуса могут существенно влиять на формирование вихревого потока, зону рециркуляции и, как следствие, на эффективность разделения частиц. Получить детальное представление о структуре внутреннего потока только

экспериментальными методами затруднительно, особенно при работе с полидисперсной зерновой смесью [1].

Развитие вычислительных методов гидrogазодинамики и рост доступной вычислительной мощности сделали возможным широкое применение численного моделирования при проектировании технологического оборудования агропромышленного комплекса. Современные программные комплексы позволяют описывать трехмерную структуру турбулентного потока воздуха, учитывать движение большого числа частиц различного размера и плотности, а также оценивать влияние конструктивных параметров на показатели работы сепаратора.

В этой связи целесообразно использование методов вычислительной гидродинамики (CFD) для анализа и оптимизации новых конструкций сепарационных устройств, предназначенных для пневматической очистки зерновых смесей.

При этом современные тенденции в аграрной инженерии подчеркивают необходимость перехода от эмпирического подхода к проектированию оборудования к научно обоснованной оптимизации, основанной на цифровом моделировании. Способность CFD-моделей воспроизводить локальные особенности аэродинамического поля: градиенты скоростей, вихревые структуры, зоны стагнации и повторного присоединения потока делает их незаменимым инструментом при создании компактных и энергоэффективных сепараторов.

Состояние исследований и актуальность проблемы. За последние годы численное моделирование процессов пневматической очистки и сепарации зернового материала получило широкое развитие. Зарубежные исследования демонстрируют эффективность совмещенного использования методов CFD и дискретного элемента (DEM) для описания сложных газо-твердых потоков в очистных устройствах комбайнов и зерноочистительных машин. Показано, что DEM–CFD-подход позволяет

учитывать реальную геометрию частиц, их столкновения и влияние на структуру воздушного потока, что существенно улучшает согласование расчетных и экспериментальных данных.

На основе DEM–CFD разрабатываются модели устройств воздушной очистки риса и других культур, позволяющие изучать влияние скорости воздушного потока, углов наклона рабочих органов и конфигурации каналов на *impurity-rate* и потери зерна. Такие работы подтверждают, что изменение геометрии каналов и схемы подвода воздуха нередко дает больший эффект, чем простое увеличение расхода воздуха или частоты колебаний сит.

Отдельное направление исследований связано с применением CFD при проектировании пневматических аспираторов и воздушных сепараторов для зерновых смесей. В ряде работ показано, что предварительный CFD-анализ позволяет выявлять зоны рециркуляции, неравномерности скоростного поля и неблагоприятные траектории частиц, а также корректировать конфигурацию воздуховодов, направляющих аппаратов и циклонов еще на стадии проектирования. Это ведет к повышению эффективности очистки и снижению удельного энергопотребления оборудования.

Несмотря на наличие значительного количества исследований, посвященных моделированию классических аспирационных каналов и ситовых устройств, вопросы оптимизации компактных вихревых сепараторов для агропромышленного комплекса изучены недостаточно. Многие конструкции разрабатываются по аналогии с промышленными циклонами, хотя условия работы с зерновыми смесями принципиально отличаются от газо-пылевых систем в промышленной вентиляции: существенно иной диапазон размеров и плотностей частиц, высокая полидисперсность, возможность агломерации и ударного разрушения зерна. Дополнительной проблемой является необходимость совместного

учета разделения по размеру и плотности, поскольку в одной и той же фракции могут присутствовать как легкие органические включения, так и тяжелые минеральные примеси.

В этой связи возрастаёт интерес к сравнительному анализу различных конструктивных решений именно в вихревых сепараторах, в том числе к оценке влияния конфигурации нижней части корпуса и формы разгрузочного бункера на структуру потока и эффективность разделения.

Следовательно, актуальной научно-практической задачей является разработка и исследование с использованием методов численного моделирования новых конструкций компактных вихревых сепарационных устройств, ориентированных на пневматическую очистку зерновых смесей и других порошкообразных продуктов агропромышленного комплекса.

Цель исследований. Целью данной работы является сравнительный анализ влияния геометрии нижней части корпуса вихревого сепарационного устройства на эффективность разделения частиц различной плотности.

Материалы и методы исследований. Объектом исследования выбрано вихревое сепарационное устройство для пневматической очистки зерновых смесей, конструктивно выполненное в виде коаксиальной системы труб. В центре корпуса расположена внутренняя труба диаметром 110 мм. Вокруг нее равномерно по окружности размещены 6 вертикальных трубок, по которым осуществляется подача смеси и отвод тяжелой фракции. Нижняя часть корпуса формирует зону закрутки и отделения частиц.

Были исследованы два конструктивных исполнения устройства. В первом варианте нижняя область корпуса формируется плавным расширением цилиндрической части и закругленными стенками без выделенного приемного бункера. Во втором варианте нижняя секция выполнена в виде выраженной конической камеры, образующей бункер

для сбора тяжелых частиц. Все остальные геометрические параметры обоих устройств оставались одинаковыми, что позволило корректно сравнивать полученные результаты.

Численное моделирование проведено в среде ANSYS Fluent. Геометрические модели созданы в CAD-пакете и импортированы в модуль сеткогенерации. Объемная сетка формировалась неструктурированными тетраэдральными элементами с локальным сгущением вблизи входных и выходных сечений, а также в зоне закрутки потока.

Результаты исследований. Численное моделирование показало, что форма нижней части корпуса оказывает существенное влияние на структуру потока и траектории частиц. В конструкции 1 со скругленными стенками формируется устойчивый осесимметричный вихревой поток с относительно небольшой областью рециркуляции вблизи оси аппарата (рис. 1, *a*). Скоростное поле характеризуется плавным увеличением тангенциальной составляющей при движении вниз и последующим выносом воздуха к центральной трубе.

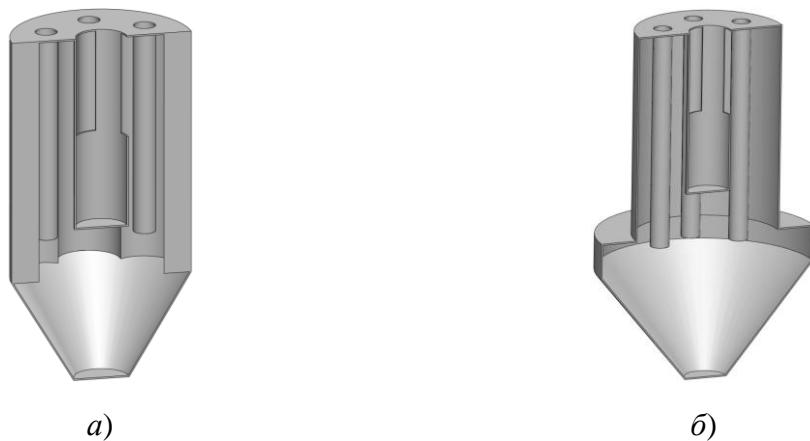


Рисунок 1 – Конструкции вихревого сепарационного устройства:

a – вариант со скругленными стенками и плавным переходом без выраженного бункера; *б* – вариант с развитой конической нижней частью (бункером)

Для конструкции 1 зависимости эффективности разделения от размера частиц имеют характерную S-образную форму с резким

переходом. Для частиц плотностью $3000 \text{ кг}/\text{м}^3$ критический размер d_{50} (значение, соответствующее $E = 0,5$) составил около 20-22 мкм, причем эффективность $E \geq 0,95$ достигается уже при диаметре 25 мкм. Для частиц плотностью $1000 \text{ кг}/\text{м}^3$ d_{50} увеличивается до 28-30 мкм, а область перехода (от $E=0,1$ до $E=0,9$) ограничивается диапазоном 23-35 мкм. На графике (рис. 2, *a*) это выражается в почти вертикальном подъеме обеих кривых и раннем выходе на плато $E = 1$, что свидетельствует о четко выраженном пороге разделения и минимальной зоне смешения фракций.

Во втором варианте, имеющем развитую коническую нижнюю часть, структура потока существенно меняется (рис. 1, *б*). В расчетах выявлены расширенные зоны рециркуляции в области сопряжения цилиндрической части корпуса с конусом и вблизи стенок бункера. Наличие этих зон приводит к увеличению времени пребывания частицы в аппарате и неоднократному пересечению траекторий тяжелых и легких частиц. Для плотности $3000 \text{ кг}/\text{м}^3$ критический размер d_{50} возрастает до 30-32 мкм, а выход на $E \geq 0,95$ смещается в область 40-45 мкм. Для частиц плотностью $1000 \text{ кг}/\text{м}^3$ переходная область еще более растянута: d_{50} составляет порядка 45-47 мкм, при этом значимые значения эффективности ($E \geq 0,9$) достигаются лишь при диаметрах свыше 60 мкм (рис. 2, *б*).

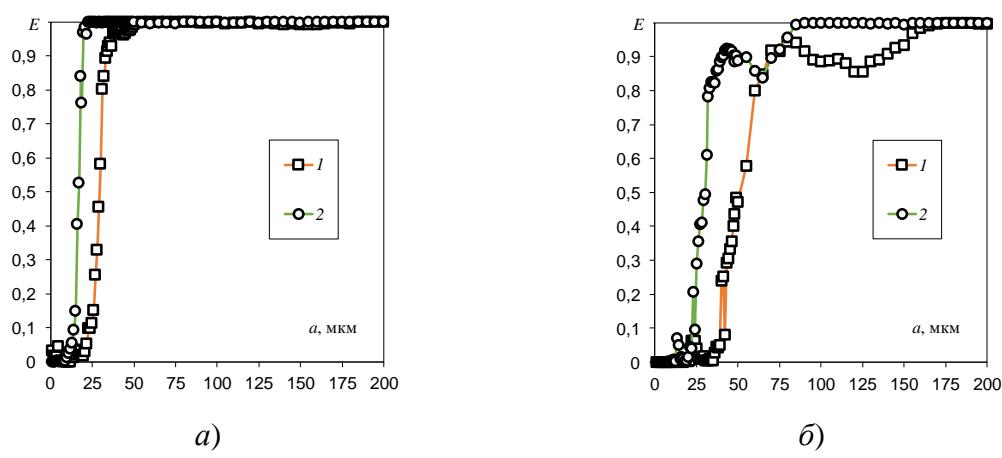


Рисунок 2 – Эффективность от размера частиц при различной плотности, $\text{кг}/\text{м}^3$: *1* – 1000; *2* – 3000. *а* – вариант со скругленными стенками; *б* – вариант с развитой конической нижней частью

Особенностью кривых для конструкции 2 является наличие вторичных минимумов эффективности в диапазоне размеров 80-130 мкм для легкой фракции и 60-120 мкм для тяжелой. Это проявляется в волнообразной форме кривых: после первоначального подъема эффективность временно снижается до 0,85-0,9, а затем вновь увеличивается и приближается к единице только при размерах частиц порядка 150-170 мкм.

Полученные результаты свидетельствуют, что формирование ярко выраженного бункера в нижней части вихревого сепаратора, удобного с технологической точки зрения для разгрузки тяжелой фракции, может сопровождаться ухудшением качества разделения и увеличением диапазона размеров, в котором наблюдается смешение фракций.

Выводы. 1. Конструкция со скругленными стенками и плавным переходом к нижней части формирует стабилизированный вихревой поток с ограниченной зоной рециркуляции, что обеспечивает резкий порог разделения частиц: для плотности 3000 кг/м³ критический размер составляет порядка 20-22 мкм, для 1000 кг/м³ – 28-30 мкм. 2. Наличие развитого бункера в нижней части корпуса приводит к появлению протяженных рециркуляционных зон и волнообразному характеру кривых эффективности.

Библиографический список

1. Численное исследование влияния геометрических параметров мультивихревого классификатора на эффективность фракционирования частиц / М. А. Прец, В. Э. Зинуров, А. В. Дмитриев, А. М. Мугинов // Вестник Технологического университета. – 2025. – Т. 28. – № 4. – С. 63-68.

References

1. Chislennoe issledovanie vlijanija geometricheskikh parametrov mul'tivihrevogo klassifikatora na effektivnost' frakcionirovaniya chastic / M. A. Prec, V. Je. Zinurov, A. V.

Dmitriev, A. M. Muginov // Vestnik Tehnologicheskogo universiteta. – 2025. – T. 28. – № 4. – S. 63-68.