

УДК 66.047.3

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

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОВОГО ПОТОКА В ЦИКЛОННОМ СЕПАРАТОРЕ ДЛЯ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

Рукавишников Виктор Алексеевич

Д-р. пед. наук, профессор

SPIN – код автора: 4897-9169

Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

Шуктомова Алина Григорьевна

Студент

Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

В аграрной отрасли, где активно применяются технологии переработки, транспортировки и хранения сухих веществ, ключевым аспектом производственной экологии становится удаление твёрдых микрочастиц из воздушной среды. Эффективность таких систем фильтрации приобретает всё большую значимость в связи с ростом масштабов производства и ужесточением санитарных норм. Одним из наиболее надёжных и широко применяемых решений является циклонный сепаратор, работа которого основана на действии центробежных сил. В данной работе проведено численное моделирование газового потока в циклонном сепараторе с промышленными геометрическими характеристиками, характерными для предприятий аграрного сектора. Математическая модель реализована в программной среде ANSYS Fluent с применением турбулентной модели *k-ε* Realizable. Проведён анализ распределения скоростей, линий тока и структуры вихрей внутри устройства. Установлены ключевые особенности формирования газового потока, включая зоны интенсивного закручивания, рециркуляции и возвратного движения. Выявлены области, наиболее благоприятные для осаждения твёрдых частиц. Полученные результаты представляют собой теоретическую основу для последующей оптимизации конструкции циклона с целью повышения его эффективности. Предложенный подход позволяет сократить объём натурных экспериментов и обеспечить проектирование более совершенных систем пылеулавливания, адаптированных к условиям агропромышленного комплекса

Ключевые слова: ЦИКЛОННЫЙ СЕПАРАТОР, ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ANSYS FLUENT, АГРОПРОМЫШЛЕННЫЙ КОМПЛЕКС, ЛИНИИ ТОКА, УЛАВЛИВАНИЕ ЧАСТИЦ

UDC 66.047.3

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

NUMERICAL SIMULATION OF GAS FLOW IN A CYCLONE SEPARATOR FOR THE AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX

Rukavishnikov Viktor Alekseyevich

Dr.Sci. in Pedagogy, Professor

RSCI SPIN-code: 4897-9169

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Shuktomova Alina Grigoryevna

Student

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

In the agricultural sector, where technologies for processing, transporting, and storing dry materials are widely used, the removal of solid microparticles from the air becomes a key aspect of industrial environmental safety. The efficiency of such filtration systems is gaining increasing importance due to the growing scale of production and the tightening of sanitary regulations. One of the most reliable and widely used solutions is the cyclone separator, whose operation is based on the action of centrifugal forces. This study presents a numerical simulation of the gas flow in a cyclone separator with industrial-scale geometric parameters typical for agricultural enterprises. The mathematical model was implemented in the ANSYS Fluent software using the *k-ε* Realizable turbulence model. An analysis of velocity distribution, streamlines, and vortex structures within the device was carried out. Key features of gas flow formation were identified, including regions of intense swirl, recirculation, and reverse flow. Zones most favorable for the deposition of solid particles were revealed. The results obtained provide a theoretical basis for the further optimization of cyclone design to improve its efficiency. The proposed approach reduces the need for extensive physical experiments and enables the design of more advanced dust collection systems tailored to the specific conditions of the agro-industrial complex

Keywords: CYCLONE SEPARATOR, NUMERICAL SIMULATION, ANSYS FLUENT, AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX, STREAMLINES, PARTICLE CAPTURE

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-208-047>

<http://ej.kubagro.ru/2025/04/pdf/47.pdf>

Введение. Современный агропромышленный комплекс характеризуется высокой степенью механизации и автоматизации технологических процессов, что, в свою очередь, приводит к активному образованию пылевоздушных смесей. При переработке зерновых культур, транспортировке, дроблении, сушке и других операциях возникает необходимость в эффективной очистке воздуха от твёрдых частиц различной фракции. Одним из наиболее надёжных и простых в эксплуатации устройств для этих целей остаётся циклонный сепаратор, сочетающий в себе компактность, энергонезависимость и высокую эффективность отделения.

Принцип действия циклона основан на использовании центробежной силы, возникающей при закручивании потока, в результате чего частицы выбрасываются к стенкам устройства и под действием гравитации осаждаются в нижней части корпуса.

Ранее разработанные методы оценки эффективности циклона основывались на эмпирических зависимостях и лабораторных экспериментах. Однако с развитием вычислительных технологий стало возможным применение численного моделирования, которое позволяет более детально проанализировать структуру потока, распределение скоростей, турбулентность и другие параметры внутри рабочей камеры. Особенно важным является моделирование в контексте сельскохозяйственных условий, где характеристики загрязнённого воздуха существенно варьируются.

Использование программных пакетов, таких как ANSYS Fluent, предоставляет инженерам мощный инструмент для оптимизации конструкций сепараторов ещё на этапе проектирования, исключая необходимость в многочисленных натурных испытаниях. Это особенно актуально в условиях импортозамещения и необходимости разработки отечественных эффективных решений.

В данной работе рассматривается модель циклонного сепаратора, предназначенного для аграрных предприятий. Проведено численное моделирование движения газа в рабочей зоне, что позволило визуализировать внутреннюю структуру потока и выявить ключевые особенности работы устройства. Полученные результаты создают основу для дальнейших исследований, направленных на повышение эффективности улавливания частиц за счёт оптимизации геометрии.

Состояние исследований и актуальность проблемы. Проблема пылеудаления на предприятиях агропромышленного комплекса остаётся крайне актуальной ввиду роста объёмов переработки сельскохозяйственного сырья и ужесточения экологических требований [1]. Пыль, образующаяся при обращении с зерном, кормами, удобрениями и прочими сыпучими материалами, не только снижает качество продукции, но и представляет опасность для здоровья работников и окружающей среды.

Циклонные сепараторы – одни из старейших и наиболее распространённых устройств для очистки воздуха, применяются в самых различных отраслях – от пищевой промышленности до энергетики. Однако в агропромышленности они приобретают особое значение благодаря простоте конструкции, отсутствию подвижных частей и возможности эксплуатации в условиях запылённой среды. При этом эффективность классических циклонов может варьироваться в широких пределах и зачастую недостаточна для улавливания мелкодисперсных частиц.

Научное сообщество предлагает разнообразные подходы к повышению эффективности циклона: от изменения конфигурации входного патрубка до внедрения мультивихревых конструкций. В этом контексте Computational Fluid Dynamics (CFD) становится незаменимым инструментом.

Ряд исследований, выполненных в последние годы, продемонстрировал высокую точность CFD-моделирования в сравнении с экспериментальными данными. В частности, работы, посвящённые моделированию закрученного потока, показали, что такие программы, как ANSYS Fluent, способны воспроизводить вихревые структуры, зоны рециркуляции и распределение давления с высокой точностью. Однако большинство подобных исследований ориентировано на промышленные циклоны общего назначения и не учитывает специфику агропромышленной среды.

В аграрной практике встречаются уникальные особенности: широкий диапазон размеров частиц, варьирующиеся условия влажности и температуры, а также нестабильность состава загрязнённого воздуха. Это требует проведения специализированных исследований, направленных на создание адаптированных решений.

Настоящая работа отвечает на этот вызов путём построения и анализа трёхмерной модели циклонного сепаратора, соответствующего условиям агропромышленного производства. Численное моделирование позволяет не только визуализировать поведение потока внутри циклона, но и выявить потенциальные направления оптимизации геометрии, улучшения аэродинамики и повышения эффективности улавливания.

Цель исследований. Целью данной работы является численное моделирование структуры газового потока в циклонном сепараторе, применяемом в агропромышленном комплексе, с целью анализа эффективности аэродинамической схемы и выявления зон с возможным снижением степени осаждения частиц.

Материалы и методы исследований. Для численного анализа работы циклонного сепаратора была построена трёхмерная модель устройства с реалистичными геометрическими параметрами, характерными для промышленного исполнения. Расчёты проводились в

программной среде ANSYS Fluent, которая позволяет проводить моделирование течений с учётом турбулентности и градиентов давления в сложных геометриях.



Рисунок 1 – 3D-модель циклонного сепаратора

В основу численного моделирования положена модель циклонного сепаратора, обладающего геометрическими характеристиками, приближенными к реальным промышленным установкам. Общая высота устройства составляет 9988 мм, что обеспечивает достаточную протяжённость траектории движения газа для эффективного осаждения частиц. Наружный цилиндрический корпус имеет диаметр 2200 мм, создавая объёмную рабочую зону, в которой формируются устойчивые вихревые потоки. Подача загрязнённого воздуха осуществляется через прямоугольный входной патрубок, размеры которого — 1452 мм по высоте и 572 мм по ширине — способствуют формированию направленного закрученного потока в зоне подачи. Центральная часть конструкции содержит выхлопной канал диаметром 552 мм, предназначенный для отвода очищенного воздуха в атмосферу или в следующую ступень обработки. Такая геометрия представляет собой классическую схему исполнения циклона, широко применяемого на объектах агропромышленного профиля, где требуется надёжное и энергоэффективное отделение твёрдых включений из воздушной среды.

Для построения расчётной сетки была применена структура с преимущественно гексаэдрическими элементами, обеспечивающими высокую точность в области стенок и на границах потоков. Сетка адаптировалась в зонах с ожидаемой высокой турбулентностью и градиентами скорости. На этапе верификации проводился анализ сеточной независимости, после чего использовалась модель с оптимальным количеством ячеек.

В качестве модели турбулентности была выбрана k - ϵ Realizable модель. На стенках использовалось условие нулевой скорости (no-slip condition).

Моделирование проводилось в стационарной постановке, при этом целью являлось получение устойчивой картины течения внутри корпуса циклона. После достижения сходимости по всем уравнениям (непрерывности, импульса и турбулентной энергии) были получены визуализации распределения скоростей, давления, линий тока и вихревых структур.

Результаты моделирования проанализированы как с точки зрения формы траекторий газа, так и распределения скоростей по сечению, что позволило оценить эффективность закручивания и зону потенциального осаждения частиц. На основе полученных данных сделаны выводы о работе устройства и возможных направлениях его улучшения.

Результаты исследований. Результаты численного моделирования позволили детально охарактеризовать поведение газового потока внутри циклонного сепаратора.

Сразу после входа воздушного потока в корпус циклона через прямоугольный патрубок наблюдается интенсивное закручивание газа, обусловленное боковой подачей. Поток приобретает винтообразную траекторию, при этом основная его часть стремится к стенкам корпуса, формируя сильную центробежную компоненту. Это создаёт условия для

перемещения твёрдых частиц к периферии и их осаждения под действием гравитации.



Рисунок 2 – Результаты численного моделирования

В нижней части циклона формируется обратный восходящий поток, проходящий через центральную выхлопную трубу. Анализ линии тока показал, что в области выше пылесборника (конусообразной части) формируются устойчивые рециркуляционные вихри. Эти вихри участвуют в дополнительной сепарации частиц, так как способствуют многократному прохождению частиц через зону с высокой центробежной силой.

Максимальные скорости движения газа наблюдаются в зоне между осью циклона и внешней стенкой, достигая значений порядка 18–20 м/с. При этом вблизи стенок и в центре устройства скорость значительно снижается, что согласуется с теоретическими представлениями о профиле закрученного потока. В области входного патрубка наблюдаются высокие градиенты скорости, что может быть учтено при выборе износостойких материалов корпуса.

Количественный анализ потока показал, что около 85% общего объёма газа участвует в спиральном движении, а оставшиеся 15% вовлечены в зону рециркуляции, формируя вторичные вихри. Такое распределение указывает на эффективное использование объёма циклона и наличие зон, способствующих осаждению частиц. При этом основная

масса загрязнений концентрируется в нижней части устройства, что подтверждает правильность выбранной геометрии.

Таким образом, моделирование подтвердило соответствие конструкции основным принципам работы циклона и позволило выявить аэродинамические особенности, которые могут быть использованы для повышения эффективности в будущем – путём коррекции геометрии входного патрубка, оптимизации формы конуса и размещения дефлекторов.

Выводы. 1. Выполнено численное моделирование работы циклонного сепаратора с промышленными геометрическими параметрами, характерными для аграрного сектора. 2. Установлены основные особенности формирования потока: наличие интенсивного закручивания, рециркуляционных зон и устойчивых вихрей. 3. Проведён качественный и количественный анализ движения газа, позволивший оценить эффективность работы устройства и зоны потенциального улучшения.

Библиографический список

1. Очистка воздуха от пищевой пыли сепарационным устройством с дугообразными элементами / В. Э. Зинуров, А. В. Конышева, И. Р. Нафиков [и др.] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2024. – № 195. – С. 66-73.

References

1. Ochistka vozduha ot pishhevoj pyli separacionnym ustrojstvom s dugoobraznymi jelementami / V. Je. Zinurov, A. V. Konysheva, I. R. Nafikov [i dr.] // Politematicheskij setevoj jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2024. – № 195. – S. 66-73.