

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 СЕПАРАТОРА С V-ОБРАЗНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОЙ ОЧИСТКИ ГАЗОВЫХ ПОТОКОВ В АГРОПРОМЫШЛЕННОМ КОМПЛЕКСЕ

NUMERICAL MODELING OF A SEPARATOR WITH V-SHAPED ELEMENTS FOR EFFICIENT AIRFLOW PURIFICATION IN THE AGRO-INDUSTRIAL SECTOR

Абдуллина Азалия Айратовна

Студент

SPIN – код автора: 8779-4251

Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

Abdullina Azaliya Airatovna

Student

RSCI SPIN-code: 8779-4251

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

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

Мадышев Ильнур Наилевич

Канд. техн. наук, доцент

SPIN – код автора: 9697-9220

Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

Madyshev Inur Nailovich

Cand.Tech.Sci., associate professor

RSCI SPIN-code: 9697-9220

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

В данной статье рассматривается процесс очистки газового потока от мелкодисперсных частиц с использованием специального сепарационного устройства, сочетающего в себе принципы циклонного и инерционного отделения. Предлагаемая конструкция снабжена рядом пластин, загнутых под определённым углом, что способствует формированию турбулентной траектории движения газа и усилению инерционных воздействий на уносимые частицы. Благодаря совмещению нескольких механизмов отделения удаётся достигать высокой эффективности улавливания широкого диапазона фракций твёрдых примесей. С целью определения оптимальных параметров очистки и минимизации энергетических потерь была проведена серия численных экспериментов с использованием пакета ANSYS Fluent. В ходе моделирования исследовались условия движения частиц в турбулентном потоке при различных значениях плотности и размера дисперсных включений. Поток задавался со скоростью 0,5 м/с на входе в устройство, а на выходе поддерживалось атмосферное давление. Дополнительно анализировалась зависимость гидравлического сопротивления системы от свойств обрабатываемой среды. Для оценки эффективности применялся критерий, основанный на количестве частиц, суммарно задержанных в объёме

This article examines the process of purifying gas flows from fine particles using a specialized separation device that combines the principles of cyclonic and inertial separation. The proposed design includes a series of plates bent at a specific angle, promoting a turbulent gas flow trajectory and enhancing the inertial effects on the carried particles. By combining multiple separation mechanisms, the device achieves high efficiency in capturing a wide range of solid particle fractions. To determine the optimal purification parameters and minimize energy losses, a series of numerical experiments was conducted using the ANSYS Fluent software package. The modeling analyzed particle motion conditions in a turbulent flow under varying density and particle size. The airflow was set at an inlet velocity of 0.5 m/s, with atmospheric pressure maintained at the outlet. Additionally, the dependence of the system's hydraulic resistance on the properties of the processed medium was studied. Efficiency was evaluated based on the proportion of particles retained in the separator relative to their total input quantity. The results of computational experiments revealed that heavier particles are significantly more effectively separated due to the increased inertial component of their motion

сепаратора, по отношению к их исходному количеству. Результаты вычислительных экспериментов позволили выявить, что более тяжёлые частицы отделяются значительно активнее за счёт повышенной инерционной составляющей движения

Ключевые слова: СЕПАРАЦИЯ, V-ОБРАЗНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ, МОДЕЛИРОВАНИЕ, МЕЛКОДИСПЕРСНЫЕ ЧАСТИЦЫ, ANSYS FLUENT, ИНЕРЦИОННЫЕ СИЛЫ, ЦИКЛОННЫЙ ЭФФЕКТ

Keywords: SEPARATION, V-SHAPED ELEMENTS, MODELING, FINE PARTICLES, ANSYS FLUENT, INERTIAL FORCES, CYCLONIC EFFECT

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-206-001>

Введение. В современных отраслях, связанных с переработкой и хранением продукции агропромышленного комплекса, немаловажную роль играет поддержание чистоты воздушной среды. Распространённой проблемой остаётся наличие мелкодисперсной пыли, включающей частицы органического либо минерального происхождения. Попадание такого рода загрязнений в производственные зоны и складские помещения способно негативно сказаться на качестве сырья, долговечности оборудования и здоровье обслуживающего персонала. Более того, ужесточающиеся требования к охране окружающей среды стимулируют предприятия использовать эффективные способы отсева и удаления мельчайших твёрдых примесей из воздушных потоков.

С ростом масштабов производства возрастает объём обрабатываемого сырья и, соответственно, количество образуемой пыли. При этом возникает необходимость внедрения высокопроизводительных технологий, позволяющих одновременно достичь нескольких целей: повышать степень очистки, снижать выбросы в атмосферу и сохранять стабильность технологического процесса. Традиционные фильтрационные системы, основанные на механическом отсеивании, часто требуют регулярной замены или очистки фильтрующего материала, что приводит к дополнительным затратам и простоям. Альтернативой могут служить различные аэродинамические и инерционные устройства, в которых

<http://ej.kubagro.ru/2025/02/pdf/01.pdf>

частицы отделяются за счёт изменения направления потока, турбулентных завихрений или центробежных сил.

В последние десятилетия заметно вырос интерес к компьютерным методам моделирования, позволяющим достаточно точно предсказывать поведение газовых потоков и находящихся в них дисперсных компонентов. Численные эксперименты открывают новые возможности для оптимизации форм и размеров каналов, изменения параметров потока, а также совершенствования конструкций, отвечающих за улавливание твёрдых включений. В рамках научно-технических разработок, ориентированных на нужды агросектора, подобные решения способны внести значительный вклад в улучшение экологической безопасности и общего уровня технологических процессов. Подобная тенденция подчеркивает важность продолжения исследований в области совершенствования методов газоочистки, учитывая все более строгие санитарно-гигиенические нормы и возрастающее внимание к уменьшению техногенной нагрузки на окружающую среду.

Состояние исследований и актуальность проблемы. Различные методы отделения твёрдых включений от воздушного потока на протяжении длительного времени находят широкое применение в промышленности, включая агропромышленный комплекс. Наиболее распространёнными считаются циклонные аппараты, где под действием центробежных сил частицы отбрасываются к стенкам и оседают. Они отличаются сравнительно простой конструкцией и надёжностью, однако при снижении скорости потока и при наличии очень мелких фракций эффективность может заметно падать. В то же время мокрые скрубберы обеспечивают высокую степень очистки, но требуют существенных затрат воды и энергии, а также вызывают сложности при последующей утилизации жидкой фазы.

На практике распространено также применение инерционных устройств, работающих за счёт резкого изменения направления газового

потока. Такие системы зачастую выполняются в виде лабиринтов или пластинчатых пакетов, где частицы, имеющие определённый запас инерции, оседают на твёрдых поверхностях. Подобные конструкции проще в эксплуатации и не вызывают избыточного увлажнения воздуха, но при этом могут столкнуться с проблемой накопления осадка на пластинах, что снижает пропускную способность и требует регулярной очистки рабочих органов.

В последние годы внимание исследователей всё чаще обращено к комбинированным системам, совмещающим в себе несколько типов воздействий — например, сочетание циклонного эффекта с инерционным осаждением. Подобные гибридные решения позволяют расширить диапазон отделяемых фракций и повысить общую эффективность. Кроме того, внедрение современных вычислительных методов, таких как численное моделирование в специализированных программных продуктах, даёт возможность оперативно оценивать различные варианты конструкции, не прибегая к дорогостоящим и длительным натурным экспериментам.

В работе [1] описан сепаратор с V-образными элементами, в котором формируется волнообразная структура потока. В результате этого частицы отделяются от газовой среды и осыпаются в специальный бункер. Сочетание волнистого характера движения и инерционных сил способствует улучшенной сепарации широкого спектра размеров частиц, что делает подобную конфигурацию перспективной для задач агропромышленного профиля, где требуется эффективное улавливание различных мелкодисперсных включений.

Цель исследований. Выявить наиболее оптимальные значения плотности и размера частиц, улавливаемые устройством.

Материалы и методы исследований. В рамках численного эксперимента использовалось программное обеспечение ANSYS Fluent, позволяющее моделировать течение газа и поведение твёрдых включений

в сложных аэродинамических каналах. Для упрощения анализа были заданы сферические частицы, размеры которых лежали в диапазоне 5...250 мкм. Данный выбор обуславливается необходимостью оценки эффективности улавливания наиболее распространённых в агропромышленном производстве фракций пыли. Численные расчёты проводились в режиме стационарного течения, при котором входная скорость воздушного потока составляла 0,5 м/с, а на выходе поддерживалось атмосферное давление.

В ходе исследования было построено устройство, совмещающее в себе по принципу действия циклонные и инерционные сепарационные аппараты. Конструктивно собой оно представляет несколько рядов сепарационных, вогнутых на 45° пластин, расположенных в шахматном порядке и погруженных в улавливающую решетку на определенную глубину, данная конструкция облачена в корпус, имеет бункер для сбора пойманных частиц, а также входные и выходные патрубки (рис.1).

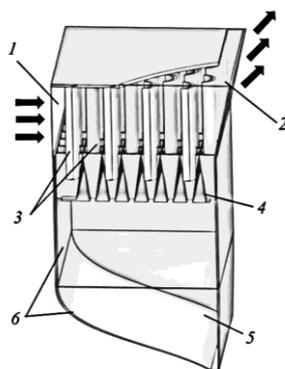


Рисунок 1 – Каркасное изображение сепарационного устройства с вогнутыми пластинами: 1 – входной патрубок; 2 – выходной патрубок; 3 – вогнутые пластины; 4 – улавливающая решетка; 5 – бункер для сбора уловленных частиц; 6 – корпус.

В рамках анализа эффективности процесса сепарации, направленного на оценку работы устройства, было проведено исследование, имеющее целью определить долю частиц, которые удалось успешно отделить от газового потока во время его прохождения через

сепаратор. Размер частиц варьировался в диапазоне от 10 до 320 мкм, а плотность 2000 и 4000 кг/м³. В начале работы была рассчитана эффективность каждой фракции с использованием формулы (1):

$$E_i = \frac{N_{отд}}{N}, \quad (1)$$

где E_i – эффективность каждой фракции частиц, запущенных в устройство; $N_{отд}$ и N – количество частиц определенной фракции, отделенных от общего потока и общее число частиц в потоке, попавшие в устройство.

Также было найдено значение гидравлического сопротивление согласно (2), как разность давлений на входе и выходе:

$$\Delta p = p_{вх} - p_{вых}, \quad (2)$$

где Δp – гидравлическое сопротивление устройства; $p_{вх}$, $p_{вых}$ – давление на входе в устройство и выходе из него, соответственно.

Результаты исследований. В ходе численного исследования были получены зависимости эффективности работы сепарационного устройства с вогнутыми пластинами при входной скорости газа равной 0,5 м/с и при различном значении плотности улавливаемых частиц (рис.2).

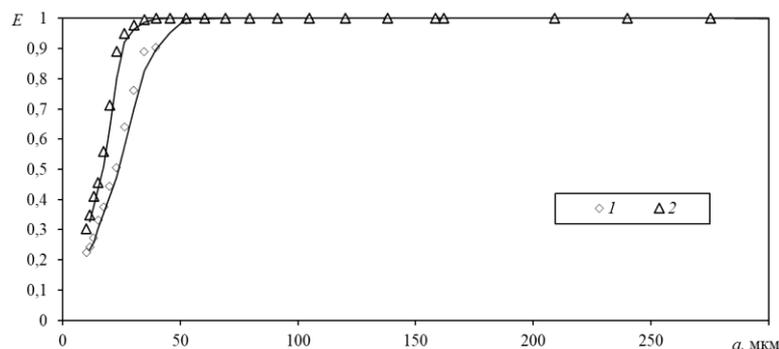


Рисунок 2 – График зависимости эффективности работы сепарационного устройства от фракции частиц с вогнутыми пластинами при различном значении плотности ρ , кг/м³: 1 – 2000; 2 – 4000.

Согласно полученным значениям, наиболее эффективно использовать данное устройство для улавливания более тяжелых частиц, в

нашем случае это частицы плотностью 4000 кг/м^3 . Максимальная эффективность устройства достигается при размере частиц 52 и 39 мкм при плотности частиц 2000 и 4000 кг/м^3 соответственно. Это связано с механизмом очистки данного устройства: на частицы, входящие в данное устройство, начинают действовать инерционные и центробежные силы, связанные с изменением потока, так как поток сразу же набегает на вогнутые элементы, в следствии чего частицы вылетают из цельной газовой структуры потока, а далее под действием сил тяжести опускаются вниз в бункер сепарационного устройства.

Выводы. 1. Разработанное устройство демонстрирует высокую эффективность очистки от мелкодисперсных частиц при низких скоростях. 2. Наиболее эффективно использовать данное устройство для улавливания более тяжелых частиц. 3. Максимальная эффективность устройства достигается при размере частиц 52 и 39 мкм при плотности частиц 2000 и 4000 кг/м^3 соответственно.

Библиографический список

1. Салахова, Э. И. Влияние сепарационной решетки на эффективность улавливания твердых частиц в устройстве с дугообразными элементами / Э. И. Салахова, В. Э. Зинуров, О. С. Дмитриева, А. В. Дмитриева, А. А. Абдуллина // Вестник Технологического университета. – 2023. – Т. 26. – № 8. – С. 41-46.

References

1. Salahova, Je. I. Vlijanie separacionnoj reshetki na jeffektivnost' ulavlivanija tverdyh chastic v ustrojstve s dugoobraznymi jelementami / Je. I. Salahova, V. Je. Zinurov, O. S. Dmitrieva, A. V. Dmitrieva, A. A. Abdullina // Vestnik Tehnologicheskogo universiteta. – 2023. – Т. 26. – № 8. – S. 41-46.