

УДК 621.928.6

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

СЕПАРАЦИЯ МЕЛКИХ ЧАСТИЦ ИЗ ЗАПЫЛЕННОГО ГАЗА В СЕПАРАТОРЕ С V-ОБРАЗНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Абдуллина Азалия Айратовна

Студент

SPIN – код автора: 8779-4251

Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

Шинкевич Татьяна Олеговна

Канд. техн. Наук, доцент

SPIN – код автора: 9724-1390

Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

Кошкина Лариса Юрьевна

Канд. техн. Наук, доцент

SPIN – код автора: 5880-9970

Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия

Воронин Андрей Петрович

Студент

Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия

В современных условиях агропромышленного производства очистка запыленных газов, содержащих мелкодисперсные частицы, представляет собой одну из ключевых задач для обеспечения экологической безопасности и повышения эффективности работы оборудования. Существующие методы очистки не всегда позволяют эффективно улавливать мелкие частицы, что требует разработки новых технологий сепарации. В данной работе проведено численное моделирование процесса сепарации мелкодисперсных частиц в сепараторе с V-образными элементами при различных скоростях входного потока воздуха. Моделирование выполнено с помощью программного обеспечения ANSYS Fluent, применяя метод Эйлера-Лагранжа и модель дискретной фазы (DPM), что позволило детально проанализировать взаимодействие газового потока с частицами. Результаты показали, что наибольшая фракционная эффективность сепарации (до 100%) достигается при небольших скоростях потока (0,5–1 м/с) для частиц размером от 39,6 мкм. При увеличении скорости потока до 4 м/с эффективность сепарации существенно снижается, особенно для частиц среднего и крупного размера. Это связано с воздействием

UDC 621.928.6

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

SEPARATION OF FINE PARTICLES FROM DUST-LADEN GAS IN A SEPARATOR WITH V-SHAPED ELEMENTS

Abdullina Azaliya Airatovna

Student

RSCI SPIN-code: 8779-4251

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Shinkevich Tatyana Olegovna

Cand.Tech.Sci., associate professor

RSCI SPIN-code: 9724-1390

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Koshkina Larisa Yurievna

Cand.Tech.Sci., associate Professor

RSCI SPIN-code: 5880-9970

Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

Voronin Andrey Petrovich

Student

Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

In modern agro-industrial production, the purification of dust-laden gases containing fine particles is one of the key tasks to ensure environmental safety and improve the efficiency of equipment. Existing purification methods do not always effectively capture small particles, necessitating the development of new separation technologies. This study presents a numerical simulation of the separation process of fine particles in a separator with V-shaped elements at various inlet air flow velocities. The modeling was carried out using ANSYS Fluent software, applying the Euler-Lagrange method and the discrete phase model (DPM), which allowed for a detailed analysis of the interaction between the gas flow and the particles. The results showed that the highest fractional separation efficiency (up to 100%) was achieved at low flow velocities (0.5–1 m/s) for particles with sizes starting from 39.6 μm . As the flow velocity increased to 4 m/s, the separation efficiency significantly decreased, especially for medium and large particles. This is due to the momentum impact, which hinders particle deposition, and confirms the need to use separators at moderate speeds for optimal air purification. Additionally, reducing the flow velocity helps extend the separator's service life by reducing component wear. Thus, the study emphasizes the importance of

импульса, препятствующего осаждению частиц, и подтверждает необходимость использования сепараторов при умеренных скоростях для оптимальной очистки воздуха. Кроме того, снижение скорости потока способствует увеличению срока службы сепаратора за счет уменьшения износа его компонентов. Таким образом, проведенное исследование подчеркивает важность выбора правильных рабочих параметров сепаратора для достижения высокой эффективности сепарации и минимизации эксплуатационных затрат

Ключевые слова: СЕПАРАЦИЯ, МЕЛКОДИСПЕРСНЫЕ ЧАСТИЦЫ, V-ОБРАЗНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ, ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ANSYS FLUENT, ФРАКЦИОННАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ, ИМПУЛЬС, ИЗНОС ОБОРУДОВАНИЯ

selecting the appropriate operating parameters for the separator to achieve high separation efficiency and minimize operational costs

Keywords: SEPARATION, FINE PARTICLES, V-SHAPED ELEMENTS, NUMERICAL SIMULATION, ANSYS FLUENT, FRACTIONAL EFFICIENCY, MOMENTUM, EQUIPMENT WEAR

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-202-002>

Введение. В современном агропромышленном комплексе вопросы экологической безопасности и эффективного управления ресурсами становятся все более актуальными. Одной из значимых проблем является очистка запыленных газовых выбросов, образующихся при переработке сельскохозяйственной продукции и работе различного оборудования. Мелкодисперсные частицы пыли не только негативно влияют на окружающую среду, но и представляют серьезную угрозу для здоровья работников, вызывая респираторные заболевания и аллергические реакции.

Традиционные методы пылеулавливания, применяемые в отрасли, зачастую не справляются с эффективным удалением мелких частиц из газовых потоков. Это обусловлено как техническими ограничениями используемых устройств, так и экономическими факторами, связанными с их эксплуатацией и обслуживанием. В результате предприятия сталкиваются с необходимостью поиска новых решений, позволяющих обеспечить высокую степень очистки при оптимальных затратах.

Разработка инновационных технологий сепарации пыли является приоритетным направлением для повышения экологической устойчивости

<http://ej.kubagro.ru/2024/08/pdf/02.pdf>

агропромышленного комплекса. Особый интерес представляют конструкции сепараторов, обеспечивающие эффективное улавливание мелкодисперсных фракций без существенного увеличения энергопотребления и сложности оборудования. Изучение таких систем открывает возможности для улучшения производственных процессов и соблюдения экологических норм.

В современных условиях глобализации и роста объемов сельскохозяйственного производства повышается нагрузка на окружающую среду, что делает вопросы экологической безопасности еще более острыми. Технологические процессы в агропромышленном комплексе часто сопровождаются образованием значительных объемов пыли, содержащей различные органические и неорганические компоненты. Эти мелкодисперсные частицы могут распространяться на большие расстояния, оказывая негативное воздействие на экосистемы и здоровье населения прилегающих территорий.

Состояние исследований и актуальность проблемы. В последние годы исследователи активно изучают различные подходы к повышению эффективности пылеулавливающих устройств. Традиционные циклонные сепараторы и фильтры имеют ограничения по размеру улавливаемых частиц и требуют регулярного технического обслуживания. Это стимулирует поиск альтернативных методов, способных обеспечить более высокую степень очистки газовых выбросов от мелкодисперсной пыли.

Одним из перспективных направлений является использование сепараторов с модифицированной геометрией внутренних элементов. В частности, внедрение V-образных элементов в конструкцию сепаратора позволяет создавать сложные аэродинамические потоки, способствующие более эффективному отделению частиц от газового потока [1]. Исследования показывают, что такие конструкции могут значительно

повысить эффективность улавливания мелких фракций по сравнению с традиционными устройствами (рис. 1).

Актуальность данной проблемы обусловлена не только экологическими требованиями, но и экономическими соображениями. Улучшение процессов пылеулавливания позволяет снизить износ оборудования, сократить расходы на обслуживание и обеспечить более стабильную работу производственных линий. Кроме того, соответствие современным экологическим стандартам является важным фактором для конкурентоспособности предприятий на рынке.

Дополнительным фактором, усиливающим необходимость разработки эффективных пылеулавливающих систем, является ужесточение международных и национальных экологических стандартов. Внедрение инновационных сепарационных технологий не только способствует выполнению нормативных требований, но и открывает возможности для повышения энергоэффективности производств. Современные исследования фокусируются на интеграции новых материалов и конструктивных решений, позволяющих оптимизировать процессы отделения мелких частиц от газовых потоков с минимальными затратами ресурсов.

Цель исследований. Оценить эффективность сепарации мелких частиц из газа в устройстве пылегазоочистки.

Материалы и методы исследований. В ходе исследования была проведена численная симуляция процессов сепарации мелких частиц в сепараторе с V-образными элементами. Для моделирования использовалась программная среда ANSYS Fluent, представляющая собой мощный инструмент для решения задач вычислительной гидродинамики и анализа многофазных потоков. Данная программа позволяет детально изучить поведение газовых потоков и взаимодействие с твердыми частицами в сложных геометрических конфигурациях.

Сетка конечных элементов была оптимизирована для достижения баланса между точностью расчетов и вычислительными ресурсами.

Для симуляции использовалась модель турбулентности $k-\epsilon$, которая хорошо зарекомендовала себя при моделировании турбулентных газовых потоков в промышленном оборудовании. Частицы пыли рассматривались как дискретная фаза с заданным распределением по размерам и плотности. Взаимодействие между газовой и твердой фазами учитывалось с помощью подхода Эйлера-Лагранжа, что позволило проследить траектории движения частиц в потоке.

Дополнительно была применена модель дискретной фазы DPM в ANSYS Fluent, которая позволяет более точно описать поведение частиц в газовом потоке. DPM-модель учитывает индивидуальные траектории частиц, взаимодействие с турбулентными вихрями и влияние сил, таких как гравитация, сопротивление и термофорез. Это обеспечивает высокую точность при прогнозировании процессов осаждения и улавливания мелкодисперсных частиц в сложных аэродинамических условиях сепаратора.

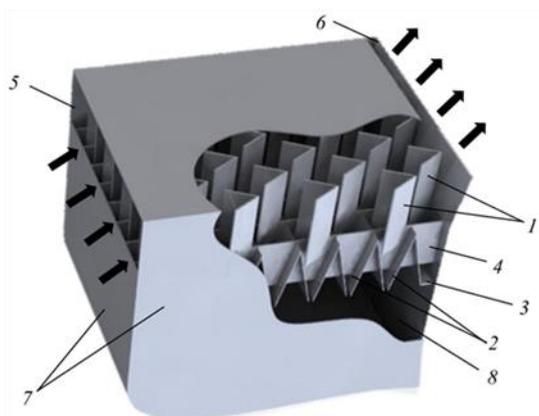


Рисунок 1 – Устройство для очистки запыленных газов: элементы для сепарации частиц (1, 2, 3 и 4), днище (8), корпус (7), вход и выход (5 и 6 соответственно)

Эффективность сепарации оценивалась путем определения доли частиц, успешно отделенных от газового потока при прохождении через

сепаратор. Для этого на выходных границах модели устанавливались соответствующие условия отслеживания частиц. Потери давления вычислялись на основе разницы статического давления на входе и выходе устройства, что является важным параметром при оценке энергоэффективности оборудования.

Параметрический анализ проводился путем варьирования ключевых факторов, таких как скорость входящего потока, размер частиц и изменение конструктивного параметра. Полученные данные позволили выявить оптимальные условия работы сепаратора для максимизации эффективности улавливания мелкодисперсных фракций при минимальных потерях давления.

Результаты исследований. Численное моделирование показало результаты фракционной эффективности при различных скоростях входного потока, изменяющихся в пределах 0,5–4 м/с (табл. 1). Согласно данным таблицы, наибольшая эффективность достигается при относительно небольших скоростях: 0,5–1 м/с, где фракционная эффективность достигает 100%. Для достижения этого значения при скорости 0,5 м/с, размер частиц должен составлять 39,6 мкм или больше, а при 1 м/с – 120 мкм. Следует отметить, что при более высоких скоростях эффективность заметно снижается. Это может быть связано с тем, что при таких скоростях частицы, попадая в сепарационное устройство вместе с потоком воздуха, получают значительный импульс ρv , равный произведению массы частицы на скорость потока. Этот импульс может возвращать частицы обратно в газовый поток, препятствуя их осаждению в бункере сепаратора.

Например, при скорости 4 м/с максимальная фракционная эффективность составляет 56,26% для частиц размером 26,3 мкм. При увеличении размера частиц эффективность уменьшается почти в два раза, что подтверждает гипотезу о влиянии импульса на процесс сепарации.

Однако для более крупных частиц (свыше 150 мкм) доминирующее влияние начинает оказывать сила тяжести, что позволяет этим частицам лучше осаждаться. Кроме того, низкие скорости потока увеличивают срок службы устройства, так как снижают механическую нагрузку на его компоненты, что уменьшает износ деталей и продлевает срок их эксплуатации. Это позволяет значительно сократить затраты на ремонт и обслуживание оборудования.

Таблица 1 – Фракционная эффективность E при различной скорости входного потока w .

Скорость входного потока w , м/с	0,5	1	2	3	4
Фракция (размер) частиц a , мкм	Эффективность E , %				
10	30,30	21,87	0	0	0,23
11	34,85	24,60	0	0	0
13	41	27,11	25,51	0	0
15	45,56	50,11	24,37	12,07	0
17	56,04	68,34	24,83	16,86	24,83
19	71,30	80,87	37,81	33,94	37,13
22	89,07	82,69	79,73	67,88	48,52
26	94,99	90,43	65,60	68,79	56,26
30	97,72	97,27	70,84	61,05	55,81
34	99,54	94,76	71,53	63,78	51,94
39	100	98,63	78,36	66,06	51,71
45	100	99,32	84,51	62,87	48,52
52	100	92,26	81,32	58,09	47,61
60	100	93,17	66,97	48,06	41,69
69	100	95,90	56,72	43,51	35,76
79	100	93,85	44,19	38,04	36,45
91	100	96,13	46,01	42,37	36,45
104	100	98,18	53,76	39,86	32,12
120	100	100	46,24	36,45	29,16
138	100	100	51,94	35,08	33,03
158	100	100	57,40	38,50	26,88
161	100	100	58,77	38,95	31,89
208	100	100	80,41	47,38	36,90
239	100	100	91,80	51,94	41,91
275	100	100	93,62	61,96	46,24
316	100	100	96,58	74,49	49,20

Снижение скорости потока также положительно влияет на общее состояние оборудования. При низких скоростях уменьшается механическое воздействие на внутренние элементы сепаратора, что снижает вибрации и предотвращает износ. Это особенно важно для долгосрочной эксплуатации оборудования в агропромышленном комплексе, где запыленные газовые потоки могут ускорять износ материалов. Частая замена или ремонт сепараторов может значительно увеличить эксплуатационные расходы, поэтому использование более низких скоростей потока становится экономически выгодным решением.

Выводы. 1. Разработанное устройство обладает высокой эффективностью при скоростях меньше 1 м/с (оптимальное значение скоростей). 2. При более высоких скоростях возможен возврат частиц в поток и последующий их унос из устройства. 3. Низкие скорости потока не только повышают эффективность сепарации, но и уменьшают механическую нагрузку на компоненты сепаратора, что снижает их износ и продлевает срок службы устройства. Это позволяет сократить затраты на техническое обслуживание и ремонт, что делает эксплуатацию сепаратора более экономически выгодной в долгосрочной перспективе.

Библиографический список

1. Салахова, Э. И. Пылеулавливающее устройство для блоков дегидрирования парафиновых углеводородов с кипящим слоем катализатора / Э. И. Салахова, А. В. Дмитриев, В. Э. Зинуров, И. Р. Набиуллин, И. И. Салахов // Катализ в промышленности. – 2022. – Т. 22. – № 2. – С. 57-64.

References

1. Salahova, Je. I. Pyleulavlivajushhee ustrojstvo dlja blokov degidrirovaniya parafinovyh uglevodorodov s kipjashhim sloem katalizatora / Je. I. Salahova, A. V. Dmitriev, V. Je. Zinurov, I. R. Nabiullin, I. I. Salahov // Kataliz v promyshlennosti. – 2022. – T. 22. – № 2. – S. 57-64.