

УДК 66.074.2

UDC 66.074.2

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 РАБОТЫ КВАДРАТНОГО СЕПАРАТОРА ДЛЯ УЛАВЛИВАНИЯ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ ИЗ ГАЗОВОГО ПОТОКА**NUMERICAL MODELING OF THE OPERATION OF A SQUARE SEPARATOR FOR CAPTURING FINE PARTICLES FROM A GAS FLOW**Шаймарданов Ансель Ренатович
СтудентShaimardanov Ansel Renatovich
StudentБиккулов Рустем Ядкарлович
Канд. техн. наукBikkulov Rustem Yadkarovich
Cand.Tech.Sci.Мадышев Ильнур Наилович
Канд. техн. наук, доцент
SPIN – код автора: 9697-9220
*Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия*Madyshev Ilnur Nailovich
Cand.Tech.Sci., associate professor
RSCI SPIN-code: 9697-9220
Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

В статье приведено исследование, которое направлено на определение зависимости эффективности устройства и потерь давления от его масштаба, скорости потока и диаметра частиц. Создана модель сепаратора квадратной формы с размерами труб квадратного сечения. Проведено моделирование в программном комплексе ANSYS Fluent для масштабов конструкции 1:1, 1:2, 2:1, 3:1 и 4:1, с диапазоном входных скоростей от 1 до 7 м/с. Для масштаба 2:1 эффективность для частиц диаметром 4 мкм составляет 0,42, а при масштабах 3:1 и 4:1 ожидается её снижение до диапазона 0,38–0,35. Это обусловлено перераспределением потоков и снижением интенсивности взаимодействия частиц с поверхностью стенок устройства. Анализ потерь давления показал их квадратичную зависимость от скорости потока. При скорости 1 м/с потери давления составляют 2 Па, а при увеличении скорости до 6 м/с – 60 Па. Высокая точность аппроксимации зависимости (коэффициент детерминации 0,9959) подтверждает надёжность полученных данных. Полученные результаты демонстрируют, что оптимальным вариантом для эффективного улавливания частиц при минимальных потерях давления является использование устройства масштаба 1:1

The article presents a study aimed at determining the dependence of the device's efficiency and pressure losses on its scale, flow velocity, and particle diameter. A model of a square-shaped separator with square-section tubes was created. Modeling was conducted using the ANSYS Fluent software for structure scales of 1:1, 1:2, 2:1, 3:1, and 4:1, with inlet flow velocities ranging from 1 to 7 m/s. For the 2:1 scale, the efficiency for particles with a diameter of 4 μm is 0.42, while for the 3:1 and 4:1 scales, it is expected to decrease to a range of 0.38–0.35. This is due to flow redistribution and a reduction in the intensity of particle interaction with the surface of the device walls. The analysis of pressure losses revealed a quadratic dependence on flow velocity. At a velocity of 1 m/s, the pressure losses are 2 Pa, increasing to 60 Pa at a velocity of 6 m/s. The high accuracy of the approximation (determination coefficient 0.9959) confirms the reliability of the obtained data. The results demonstrate that the optimal configuration for efficient particle capture with minimal pressure losses is the use of a 1:1 scale device

Ключевые слова: СЕПАРАТОР, МЕЛКОДИСПЕРСНЫЕ ЧАСТИЦЫ, ГАЗОВЫЙ ПОТОК, ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЭФФЕКТИВНОСТЬ УЛАВЛИВАНИЯ, ПОТЕРИ ДАВЛЕНИЯ, ANSYS FLUENT, АГРОПРОМЫШЛЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Keywords: SEPARATOR, FINE PARTICLES, GAS FLOW, NUMERICAL MODELING, CAPTURE EFFICIENCY, PRESSURE LOSSES, ANSYS FLUENT, AGRO-INDUSTRIAL PRODUCTION

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-205-027>

<http://ej.kubagro.ru/2025/01/pdf/27.pdf>

Введение. Процессы разделения мелкодисперсных частиц находят применение в различных отраслях, включая сельское хозяйство, где требуется высокая точность отделения мелких фракций от потока. В современных условиях интенсивного развития технологий возрастают требования к аппаратам, обеспечивающим высокую степень очистки при сохранении компактности и экономичности.

С развитием технологий цифрового моделирования появилась возможность более глубоко анализировать процессы, происходящие в сепарационных устройствах. Это открывает новые горизонты в проектировании устройств, так как позволяет создавать конструкции, максимально соответствующие условиям эксплуатации и требуемым характеристикам.

Традиционные конструкции, хотя и демонстрируют стабильные результаты, часто оказываются недостаточно эффективными при работе с частицами малого размера. Это связано с особенностями их динамики в газовых потоках, что затрудняет их осаждение и приводит к необходимости поиска инновационных подходов к решению проблемы. В таких условиях особое внимание уделяется созданию конструкций с улучшенными аэродинамическими характеристиками, способствующими повышению вероятности осаждения мелких частиц на стенках устройства.

Эффективность работы сепараторов оказывает влияние не только на производительность технологического процесса, но и на экономические показатели предприятий. Таким образом, разработка новых решений в области сепарации мелких частиц представляет собой комплексную задачу, объединяющую технические, экологические и экономические аспекты.

Состояние исследований и актуальность проблемы. Научное изучение процессов сепарации мелкодисперсных частиц получило

значительное развитие благодаря достижениям в области механики потоков и технологий моделирования. Исследования показывают, что наибольший эффект очистки достигается за счет использования методов, которые обеспечивают максимальный контакт частиц с поверхностью, способной задерживать их. Особую роль в таких разработках играет сочетание физических методов осаждения, таких как инерционное отделение, и поверхностных методов с использованием адгезивных материалов.

Современные работы в области сепарации демонстрируют значительный прогресс в использовании численных методов для оценки характеристик потоков. Численное моделирование, например, в ANSYS Fluent, предоставляет возможность детального анализа поведения частиц в сложных потоках. Это позволяет оптимизировать конструкцию устройства еще на этапе проектирования, минимизируя количество экспериментальных проверок и затрат на их проведение.

Особый интерес вызывает квадратная форма устройств, которая обладает преимуществами с точки зрения равномерности распределения потока внутри камеры. Однако экспериментальные данные по таким конструкциям остаются ограниченными, что тормозит их внедрение в промышленность. Помимо этого, недостаток информации о влиянии характеристик материалов стенок на адгезию частиц затрудняет создание универсальных решений.

Практическая значимость проблемы связана с потребностью сельскохозяйственной отрасли в надежных системах очистки воздуха, образующегося при переработке продукции. Высокая запыленность производственных помещений негативно сказывается на здоровье работников и качестве конечного продукта. Следовательно, разработка эффективных сепарационных устройств для улавливания мелких частиц представляет собой не только техническую, но и социально значимую

задачу. Кроме того, внедрение таких устройств способствует созданию безопасных и комфортных условий труда, что отвечает современным стандартам охраны труда и экологической безопасности.

Учитывая указанные проблемы, можно заключить, что исследования в области сепарации частиц требуют дальнейшего развития. Они охватывают не только улучшение существующих конструкций, но и разработку новых подходов, основанных на современных технологических достижениях. Это открывает перспективы для создания более эффективных и устойчивых к эксплуатационным нагрузкам систем, которые могут быть успешно адаптированы к различным условиям агропромышленного производства.

В работе [1] была предложена конструкция сепарационного устройства квадратной формы для улавливания мелких частиц. При сепарации частиц из газа они отлетают к стенкам, к которым прилипают.

Цель исследований. Целью данной работы является численное моделирование улавливания частиц в сепараторе квадратной формы.

Материалы и методы исследований. Для проведения численного анализа была создана трёхмерная модель сепарационного устройства квадратной формы с установленными геометрическими параметрами. Диаметры отверстий составляли 0,008 м и 0,02 м, размеры труб квадратного сечения (длина, ширина и высота) были равны 0,08 м, а расстояние между элементами сепарации установлено на уровне 0,02 м.

Моделирование осуществлялось с использованием программного комплекса Ansys Fluent. В качестве граничных условий на входе устройства задавался диапазон скоростей потока газа от 1 до 7 м/с. Конструкция сепаратора исследовалась в масштабах 1:1, 1:2, 2:1, 3:1 и 4:1, что позволяло изучить влияние размеров устройства на его эффективность.

Оценка эффективности устройства проводилась по выражению:

$$E = 1 - \frac{n}{N}, \quad (1)$$

Подход, основанный на пренебрежении обратным воздействием дисперсной фазы на несущую среду (при моделировании влиянием частиц на поток пренебрегалось), получил широкое применение благодаря исследованиям Р.И. Нигматуллина. Используемая модель описывала взаимодействие фаз с общим давлением и отсутствием фазовых переходов, что позволяет эффективно моделировать процессы в многокомпонентных средах.

Движение частиц в газовом потоке описывалось уравнениями, включающими основные силы, действующие на частицы: гравитационную, аэродинамическую и центробежную. Расчёт этих сил производился на основе следующих выражений:

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \nabla(\rho_i \vec{u}_i) = 0; \quad (2)$$

$$\rho_i \frac{d_i \vec{u}_i}{dt} = -s_i \nabla p + \nabla(\mu_i s_i \nabla \vec{u}_i) + K \vec{\varphi}; \quad (3)$$

$$s_1 + s_2 = 1, \quad \rho_i = s_i \rho_i^0, \quad i = 1, 2, \quad \vec{\varphi}_1 = \vec{u}_2 - \vec{u}_1, \quad \vec{\varphi}_2 = \vec{u}_1 - \vec{u}_2, \quad (4)$$

Потери давления в сепарационном устройстве рассчитывались по отдельной формуле, учитывающей конструктивные параметры и скорости потока.

При моделировании движения твёрдых частиц, рассчитываемых по выражениям (5, 6), их влияние на поток газа не учитывалось, так как объёмная концентрация частиц составляла менее 10%. Подход, основанный на пренебрежении обратным воздействием дисперсной фазы на несущую среду, получил широкое применение благодаря исследованиям Р.И. Нигматуллина. Используемая модель описывала взаимодействие фаз с общим давлением и отсутствием фазовых переходов,

что позволяет эффективно моделировать процессы в многокомпонентных средах.

$$\frac{d\bar{u}_p}{dt} = \frac{\bar{u} - \bar{u}_p}{\tau_r} + \frac{\bar{g}(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \sum_{i=1}^n \bar{F}_i; \quad (5)$$

$$\frac{d\bar{x}}{dt} = \bar{u}_p, \quad (6)$$

Движение частиц в газовом потоке описывалось уравнениями, включающими основные силы, действующие на частицы: гравитационную, аэродинамическую и центробежную. Расчёт этих сил производился на основе следующих выражений:

$$\bar{F}_a = C_D \frac{\pi a^2}{8} \rho (\bar{u} - \bar{u}_p) |\bar{u} - \bar{u}_p|; \quad (7)$$

$$\bar{F}_g = -m_p \bar{g} \bar{i}_z; \quad (8)$$

$$\bar{F}_c = m_p \frac{u_\varphi^2}{r} \bar{i}_r, \quad (9)$$

где F_p – площадь поперечного сечения частицы, м²; a – диаметр частицы, м; m_p – масса частицы, кг; C_D – коэффициент аэродинамического сопротивления.

Подобный подход к численному моделированию позволяет эффективно анализировать динамику мелкодисперсных частиц в сложных потоках, обеспечивая глубокое понимание процессов, происходящих внутри квадратного сепаратора. Это даёт возможность оценить конструктивные и эксплуатационные характеристики аппарата ещё на этапе проектирования.

Результаты исследований. На основе численного моделирования были построены зависимости эффективности улавливания частиц от их размера и потери давления от скорости потока через устройство.

Как видно из графика (рис. 1), эффективность устройства возрастает с увеличением диаметра частиц, что объясняется особенностями их

инерционных свойств. При увеличении масштаба конструкции (от 1:1 до 2:1) эффективность возрастает для всех исследуемых размеров частиц. Это связано с увеличением площади взаимодействия частиц с поверхностью стенок и снижением турбулентности потока в крупных устройствах.

При масштабе конструкции 1:1 эффективность осаждения частиц диаметром 4 мкм достигает 0,48, что является наивысшим значением среди исследуемых случаев. Устройства с масштабами 1:2 и 2:1 демонстрируют соответственно меньшую эффективность, которая для частиц того же размера составляет около 0,46 и 0,42. Эти результаты показывают, что масштабирование устройства влияет на его способность улавливать частицы, и для достижения максимальной эффективности рекомендуется использовать устройство масштаба 1:1.

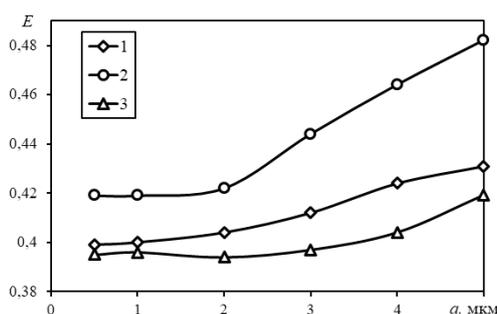


Рисунок 1 – Эффективность устройства при различном его масштабе: 1 – 1:1, 2 – 1:2, 3 – 2:1

Установлено, что потери давления увеличиваются по мере роста скорости потока (рис. 2), что подтверждает квадратичную зависимость давления от скорости в турбулентных режимах. В данном случае, аппроксимация зависимости показывает высокую точность с коэффициентом детерминации 0,9959. Минимальные потери давления, около 2 Па, наблюдаются при скорости потока 1 м/с, что подтверждает возможность эффективной работы устройства при низких скоростях потока.

Также было получено, что при увеличении масштаба устройства до 3:1 и 4:1 происходит снижение эффективности улавливания мелкодисперсных частиц. Для масштаба 3:1 эффективность для частиц диаметром 4 мкм составит около 0,38–0,40, а при масштабе 4:1 она снизится до диапазона 0,35–0,37. Это связано с уменьшением интенсивности взаимодействия частиц с поверхностью стенок из-за перераспределения потока и снижения концентрации турбулентных эффектов.

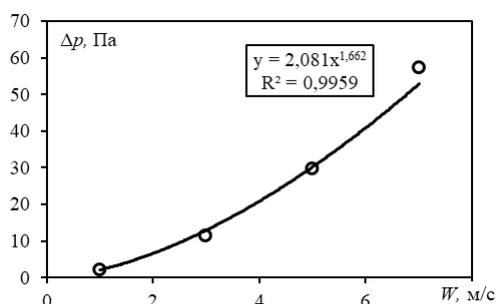


Рисунок 2 – Потери давления в квадратном сепараторе

Выводы. 1. Максимальная эффективность для частиц диаметром 4 мкм достигается при масштабе 1:1 (0,48), однако с увеличением масштаба до 2:1, 3:1 и 4:1 наблюдается постепенное снижение эффективности, что обусловлено перераспределением потока и уменьшением взаимодействия частиц с поверхностью стенок. 2. Потери давления в квадратном сепараторе увеличиваются с ростом скорости потока, демонстрируя квадратичную зависимость, что подтверждено коэффициентом детерминации 0,9959. Минимальные потери давления составляют около 2 Па при скорости 1 м/с.

Библиографический список

1. Попкова, О. С. Численное моделирование сепарации мелкодисперсных частиц из запыленного газа в сепараторе / О. С. Попкова, Н. Д. Якимов, А. М. Шайхутдинова // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2024. – № 202. – С. 355-362.

References

<http://ej.kubagro.ru/2025/01/pdf/27.pdf>

1. Popkova, O. S. Chislennoe modelirovanie separacii melkodispersnyh chastic iz zapylennogo gaza v separatore / O. S. Popkova, N. D. Jakimov, A. M. Shajhutdinova // Politematicheskij setevoj jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2024. – № 202. – S. 355-362.