

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 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗДЕЛЕНИЯ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ В ЦЕНТРОБЕЖНОМ КЛАССИФИКАТОРЕ ПРИ ВАРЬИРОВАНИИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

NUMERICAL STUDY OF FINE PARTICLE SEPARATION IN A CENTRIFUGAL CLASSIFIER WITH VARYING GEOMETRIC PARAMETERS

Прец Мария Арнольдовна
Старший преподаватель
SPIN – код автора: 8457-2157
Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

Prets Maria Arnoldovna
Senior Lecturer
RSCI SPIN-code: 8457-2157
Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Зиангиров Айдар Фаилевич
Студент
SPIN – код автора: 3338-8985
Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

Ziangirov Aydar Failevich
Student
RSCI SPIN-code: 3338-8985
Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Разделение мелкодисперсных частиц представляет собой сложную задачу из-за турбулентных потоков, адгезии и недостаточной эффективности оборудования. В статье рассматривались три варианта конструкции классификатора, отличающиеся ключевыми размерами входных и выходных элементов. Анализ результатов показал, что изменение геометрии входного отверстия и входного канала значительно влияет на процесс разделения частиц. Увеличение площади входного сечения приводит к снижению эффективности улавливания мелкодисперсных частиц из-за уменьшения скорости воздушного потока. В то же время уменьшение размеров входного канала способствует росту эффективности разделения мелких и средних частиц благодаря стабилизации воздушного потока и увеличению перепада давления. Снижение ширины выходного отверстия позволило добиться высокой эффективности для крупных частиц при минимальных энергетических затратах, однако для мелкодисперсных частиц этот вариант показал наименее удовлетворительные результаты. Сравнительный анализ трёх моделей показал, что оптимизация конструкции классификатора требует учёта размеров и характеристик обрабатываемых частиц для достижения наилучших результатов. Полученные данные позволяют сделать вывод о необходимости индивидуального подхода при проектировании центробежных классификаторов для повышения их эффективности. Результаты исследования могут быть использованы для оптимизации процессов

The separation of fine particles presents a challenging task due to turbulent flows, adhesion effects, and insufficient equipment efficiency. This study examined three classifier design variations differing in the key dimensions of inlet and outlet elements. The analysis of the results demonstrated that changes in the geometry of the inlet opening and inlet channel significantly influence the particle separation process. Increasing the inlet area leads to a reduction in fine particle capture efficiency due to a decrease in airflow velocity. Conversely, reducing the size of the inlet channel enhances the efficiency of separating fine and medium particles by stabilizing the airflow and increasing the pressure drop. Reducing the width of the outlet opening achieved high efficiency for larger particles with minimal energy consumption; however, this configuration showed less satisfactory results for fine particles. A comparative analysis of the three models revealed that optimizing the classifier design requires considering the size and characteristics of the processed particles to achieve the best outcomes. The findings suggest the necessity of an individualized approach to the design of centrifugal classifiers to enhance their efficiency. The results of this study can be applied to optimize material separation processes in agro-industrial production and improve the resource efficiency of equipment

разделения материалов в агропромышленном производстве и повышения ресурсной эффективности оборудования

Ключевые слова: ЦЕНТРОБЕЖНЫЙ КЛАССИФИКАТОР, ФРАКЦИОНИРОВАНИЕ ЧАСТИЦ, ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЭФФЕКТИВНОСТЬ УЛАВЛИВАНИЯ, ПЕРЕПАД ДАВЛЕНИЯ, ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ, МЕЛКОДИСПЕРСНЫЕ ЧАСТИЦЫ, АГРОПРОМЫШЛЕННЫЙ КОМПЛЕКС

Keywords: CENTRIFUGAL CLASSIFIER, PARTICLE FRACTIONATION, NUMERICAL MODELING, CAPTURE EFFICIENCY, PRESSURE DROP, GEOMETRIC PARAMETERS, FINE PARTICLES, AGRO-INDUSTRIAL SECTOR

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-205-023>

Введение. Применение центробежных классификаторов особенно актуально для агропромышленного комплекса, где важным этапом является фракционирование порошкообразных материалов, таких как измельчённое зерно, минеральные удобрения или другие агрохимические продукты. Точная сортировка частиц обеспечивает более эффективное использование ресурсов и повышает качество конечного продукта, что напрямую влияет на экономическую эффективность производственных процессов.

Современные требования к качеству агропромышленных материалов ставят задачу оптимизации процессов разделения частиц по размерам. Для этого необходимы исследования, направленные на повышение точности работы классификаторов, уменьшение потерь и улучшение производительности оборудования. Особый интерес вызывает фракционирование мелкодисперсных частиц, поскольку в этом случае часто наблюдаются сложности, связанные с адгезией, турбулентными потоками и эффективностью отделения мелких частиц.

На фоне растущей потребности в энергоэффективных решениях для переработки сельскохозяйственного сырья, инновационные подходы к классификации материалов приобретают особую значимость.

Разработка и внедрение таких решений способствует росту производительности агропромышленных предприятий, а также решению

<http://ej.kubagro.ru/2025/01/pdf/23.pdf>

экологических проблем, связанных с переработкой мелкодисперсных материалов.

Состояние исследований и актуальность проблемы. Несмотря на значительный прогресс, существует ряд нерешённых вопросов, особенно в части разделения мелкодисперсных фракций. Основные трудности связаны с влиянием аэродинамических факторов, таких как вихревые потоки, неравномерность распределения частиц и прилипание мелких фракций к стенкам оборудования.

В современных исследованиях особое внимание уделяется совершенствованию конструкции классификаторов и оптимизации рабочих параметров. Исследования показывают, что эффективность фракционирования мелкодисперсных частиц во многом зависит от скорости вращения ротора, геометрии камеры и характеристик подачи материала.

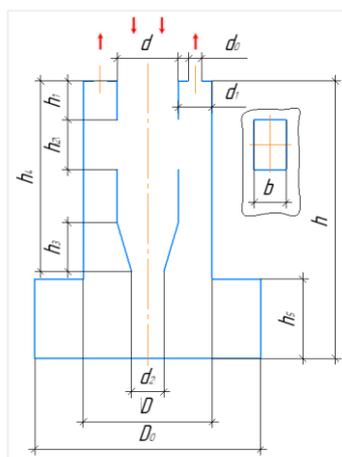


Рисунок 1 – Схема геометрических параметров центробежного классификатора

В последние годы наблюдается активное внедрение методов численного моделирования для анализа процессов в центробежных классификаторах. Применение программных решений позволяет получать более точные данные о поведении частиц в воздушном потоке и разрабатывать оптимальные конструктивные решения. Однако в

практической реализации остаются нерешённые вопросы, связанные с влиянием турбулентности и неконтролируемыми внешними факторами, что требует дальнейших исследований.

Актуальность проблемы также обусловлена потребностями агропромышленного комплекса в увеличении эффективности переработки и подготовки материалов. Точное фракционирование позволяет оптимизировать процессы производства кормов, удобрений и других агрохимикатов. С учётом растущего спроса на экологически чистую продукцию и ресурсоэффективные технологии возникает необходимость в создании инновационных решений, обеспечивающих высокую точность разделения при минимальных энергетических затратах.

В работе [1] предложена конструкция центробежного классификатора, позволяющего фракционировать мелкие частицы в воздушном потоке (рис. 1).

Цель исследований. Целью данной работы является численное моделирование процессов теплопередачи в тепловом накопителе с высокотемпературным рабочим телом.

Материалы и методы исследований. Численное моделирование процесса разделения частиц в центробежном классификаторе было выполнено с использованием программного комплекса Ansys Fluent, позволяющего решать задачи, связанные с газодинамикой и многофазными течениями.

Исходная геометрическая модель классификатора представляет собой осесимметричную конструкцию с характерной структурой потоков и областями для разделения частиц. Базовыми параметрами модели были приняты (рис. 1): диаметр входного отверстия d , который равнялся 0,054 м, d_0 равный 0,012 м, d_1 составлял 0,001715 м. Ширина выходного канала b определялась как 0,0054 м, h_1 была равна 0 м, высота которой обозначалась как h_2 , имела значение 0,06 м, высота h_3 достигала 0,022 м, высота h_4 была

установлена на уровне 0,1 м. Диаметр отверстия d_2 принимался равным 0,016 м, диаметр основной зоны D составлял 0,101 м.

Для оценки влияния изменений отдельных конструктивных элементов на процесс разделения были созданы три вариации исходной модели. В первой модели диаметр d был увеличен до 0,066 м, что позволило проанализировать, как увеличение площади входного сечения влияет на распределение скорости воздушного потока и характер движения частиц. Во второй модели диаметр d_0 был уменьшен до 0,01 м, что отразилось на формировании потока и распределении давления в рабочей камере. В третьей модели ширина выходного отверстия b была снижена до 0,0028 м, что позволило оценить её влияние на условия вывода частиц и эффективность их разделения.

Для построения модели была создана сеточная структура с адаптацией и локальным уточнением ячеек в областях высокой градиентности параметров, таких как входное сечение, стенки классификатора и выходные зоны. Решение уравнений движения среды основывалось на уравнениях Навье-Стокса. В качестве рабочей среды использовался воздух, который моделировался как непрерывная фаза, а частицы представляли собой дискретную фазу с инертным поведением, движущуюся в потоке под действием аэродинамических и центробежных сил.

На входе в классификатор задавались равномерный профиль скорости воздушного потока (скорость 12 м/с) и начальная концентрация частиц, равномерно распределённых по входному сечению. Граничные условия на выходе предполагали нулевое избыточное давление, что моделировало свободный выход воздушного потока из классификатора. Параметры моделирования задавались в стационарном режиме до достижения устойчивого распределения потока и частиц внутри конструкции.

Результаты численного моделирования позволили проследить траектории движения мелкодисперсных частиц и определить влияние изменённых геометрических параметров на процесс их разделения.

Результаты исследований. На основе численного моделирования были проанализированы зависимости эффективности улавливания от размера частиц для трёх моделей центробежного классификатора. Дополнительно оценивался перепад давления, что позволило детально изучить влияние геометрических изменений на рабочий процесс устройства.

Для первой модели, в которой был увеличен диаметр входного отверстия до 0,066 м перепад давления составил 612,07 Па на всех этапах исследования. Результаты показали, что для мелкодисперсных частиц размером до 30 мкм эффективность улавливания оставалась низкой и не превышала 17 %. Максимальное значение E , равное 64,6%, было достигнуто для частиц размером 150 мкм. Увеличение входного диаметра способствует улучшению условий для улавливания средних и крупных частиц, однако для мелкодисперсных фракций эффективность остаётся низкой из-за уменьшения скорости воздушного потока на входе.

Во второй модели, где наружный диаметр входного канала был уменьшен до 0,010 м, перепад давления значительно увеличился и составил 1682,65 Па. Это позволило добиться высокой эффективности улавливания даже для мелких частиц. Уже при размере 20 мкм эффективность достигла 64 %, что значительно превосходит показатели первой модели. В диапазоне от 40 до 80 мкм эффективность стабилизировалась на уровне 60-76 %, а для частиц размером 100 мкм и выше наблюдался резкий рост показателей. Для крупных частиц эффективность улавливания превысила 94%, а при размере 150 мкм достигла максимального значения 94,7%. Высокий перепад давления в данной модели обеспечил стабильный аэродинамический поток, что

позволило существенно повысить эффективность разделения мелкой и средней фракций.

Для третьей модели, в которой ширина выходного отверстия была уменьшена до 0,0028 м, перепад давления оказался минимальным и составил 373,48-373,78 Па. В диапазоне мелкодисперсных частиц размером до 25 мкм эффективность улавливания была крайне низкой, не превышая 7 %. Однако начиная с размера 60 мкм наблюдался резкий рост эффективности: для частиц данного размера E составила 72,9%, для частиц более крупных размеров эффективность продолжала стабильно увеличиваться. Для фракций размером 100 мкм и выше эффективность достигала 97%. Полученные результаты показывают, что уменьшение ширины выходного отверстия позволяет эффективно улавливать крупные частицы при минимальных энергетических затратах, но снижает эффективность для мелкодисперсного материала.

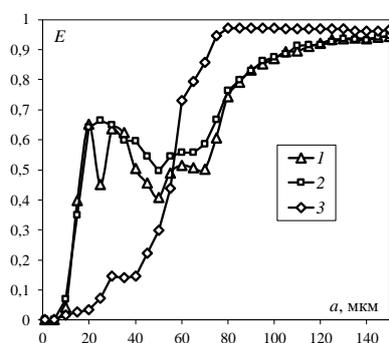


Рисунок 2 – Эффективность улавливания от размера частиц

Таким образом, сравнение трёх моделей классификатора позволило выявить закономерности в распределении эффективности улавливания в зависимости от изменения геометрических параметров. Первая модель показала наименьшую эффективность для мелких частиц из-за большого входного сечения, что приводит к снижению скорости потока. Вторая модель продемонстрировала лучшие результаты для мелких и средних частиц благодаря высокому перепаду давления, обеспечивающему

стабильный и интенсивный поток. Третья модель оказалась наиболее эффективной для крупных частиц, но её эффективность для мелких фракций была минимальной. Результаты численного моделирования показывают, что уменьшение наружного диаметра входного канала является наиболее эффективным решением для оптимального улавливания мелкодисперсных частиц, тогда как уменьшение ширины выходного отверстия предпочтительно для работы с крупной фракцией при минимальных энергетических затратах.

Полученные результаты создают основу для дальнейшей оптимизации конструкции и рабочих режимов центробежных классификаторов, что особенно важно для обработки мелкодисперсных материалов в агропромышленном комплексе.

Выводы. 1. Увеличение диаметра входного отверстия 0,066 м приводит к снижению эффективности улавливания мелкодисперсных частиц из-за уменьшения скорости воздушного потока на входе. 2. Уменьшение диаметра входного канала до 0,010 м приводит к значительному росту перепада давления $\Delta p = 1682,65$ Па и позволяет существенно повысить эффективность улавливания мелких и средних частиц. 3. Уменьшение ширины выходного отверстия до $b=0,0028$ м приводит к минимальному перепаду давления $\Delta p = 373,48-373,78$ Па и обеспечивает высокую эффективность улавливания крупных частиц.

Библиографический список

1. Прец, М. А. Улавливание частиц в пылеуловителе с соосно расположенными трубами / М. А. Прец, А. Ф. Зиангиров, М. Г. Кузнецов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2024. – № 202. – С. 284-291.

References

1. Prec, M. A. Ulavlivanie chastic v pyleulovitele s soosno raspolozhennymi trubami / M. A. Prec, A. F. Ziangirov, M. G. Kuznecov // Politematicheskij setevoy jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2024. – № 202. – S. 284-291.