

УДК 631.362

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

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЕПАРАЦИОННОГО УСТРОЙСТВА С ДУГООБРАЗНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ И РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ СЕПАРАЦИОННЫХ РЕШЁТОК ДЛЯ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

Зинуров Вадим Эдуардович
Канд. техн. наук
SPIN – код автора: 1564-3438
Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

Мадышев Ильнур Наилович
Канд. техн. наук, доцент
SPIN – код автора: 9697-9220
Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

Чернова Олеся Станиславовна
Студент
Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

Рост технологической активности в агропромышленной отрасли обусловил увеличение внимания к совершенствованию процессов газоочистки от твёрдых включений. Одной из приоритетных задач остаётся эффективное удаление мелкодисперсной пыли пищевого происхождения, которая формируется при дроблении, сушке и перемещении сельскохозяйственного материала. В данной работе представлено численное моделирование работы сепарационного устройства с дугообразными направляющими элементами и тремя различными конструкциями сепарационных решёток: сотовой, с V-образными поперечными пластинами и с перфорированным дном. Численные эксперименты проводились с использованием программного комплекса ANSYS Fluent, что позволило проследить особенности движения твёрдой фазы в воздушной среде. Полученные данные подтвердили заметное влияние геометрии нижней решётки на степень отделения частиц из потока. Наиболее высокие значения эффективности были зафиксированы при варианте конструкции с перфорированным основанием: при размере частиц свыше 30 мкм эффективность превышала 95%, а для фракций около 20 мкм – превышала 80%. Сотовая решётка обеспечила высокую эффективность только для крупных частиц, а V-образная конструкция показала наименьшие

UDC 631.362

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

NUMERICAL MODELING OF THE EFFICIENCY OF A SEPARATION DEVICE WITH CURVED ELEMENTS AND VARIOUS TYPES OF SEPARATION GRIDS FOR THE AGRO-INDUSTRIAL SECTOR

Zinurov Vadim Eduardovich
Cand.Tech.Sci.
RSCI SPIN-code: 1564-3438
Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Madyshev Ilnur Nailovich
Cand.Tech.Sci., associate professor
RSCI SPIN-code: 9697-9220
Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Chernova Olesia Stanislavovna
Student
Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

The growing technological activity in the agro-industrial sector has led to increased attention to improving gas purification processes from solid contaminants. One of the key challenges remains the efficient removal of fine food dust generated during crushing, drying, and handling of agricultural materials. This study presents a numerical simulation of a separation device equipped with curved guiding elements and three different types of separation grids: a cellular grid, a grid with transverse V-shaped plates, and a perforated bottom. The numerical experiments were carried out using the ANSYS Fluent software package, which made it possible to track the behavior of the solid phase within the gas medium. The results confirmed a strong influence of the grid geometry in the lower section of the device on the degree of particle separation. The highest performance was observed for the perforated bottom configuration: for particles larger than 30 μm , the capture efficiency exceeded 95%, while for particles around 20 μm , it was over 80%. The cellular grid demonstrated high efficiency only for coarse particles, whereas the V-shaped plate design resulted in the lowest capture performance across all particle sizes

значения по всем размерам

Ключевые слова: СЕПАРАЦИОННОЕ УСТРОЙСТВО, ДУГООБРАЗНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ, V-ОБРАЗНЫЕ ПЛАСТИНЫ, ANSYS FLUENT, ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, УЛАВЛИВАНИЕ ЧАСТИЦ, ПЫЛЕУЛАВЛИВАНИЕ, АГРОПРОМЫШЛЕННЫЙ КОМПЛЕКС

Keywords: SEPARATION DEVICE, CURVED ELEMENTS, V-SHAPED PLATES, ANSYS FLUENT, NUMERICAL MODELING, PARTICLE CAPTURE, DUST REMOVAL, AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-208-054>

Введение. Очистка воздуха от твёрдых частиц в различных производственных процессах агропромышленного комплекса остаётся важнейшей задачей при обеспечении надёжности и экологической безопасности оборудования. В условиях интенсивной переработки сельскохозяйственного сырья образуется значительное количество пыли, которая может не только снижать эффективность работы оборудования, но и представлять угрозу здоровью персонала и окружающей среде. При этом улавливание мелкодисперсных частиц, находящихся в диапазоне от 10 до 100 мкм, вызывает особые трудности, связанные с их малой инерционностью и способностью к уносу с воздушным потоком.

Наиболее распространённые типы пылеулавливающих устройств, такие как циклоны, обладают ограничениями при работе с такими частицами, особенно при высоких скоростях газопылевого потока. В результате часть частиц может покидать систему, ухудшая общий баланс материала и снижая рентабельность процессов. Кроме того, неизбежный износ конструктивных элементов при высокой турбулентности потока требует поиска решений, обеспечивающих не только высокую эффективность сепарации, но и долговечность оборудования.

Актуальной становится задача разработки и численного анализа конструкций, способствующих усилению действия инерционных и гравитационных сил, обеспечивающих выведение частиц из газового потока. Перспективным направлением является использование

<http://ej.kubagro.ru/2025/04/pdf/54.pdf>

дугообразных и V-образных элементов в сочетании с сетчатыми структурами в нижней части устройства.

Состояние исследований и актуальность проблемы. Развитие технологий переработки сельскохозяйственного сырья сопряжено с необходимостью удаления твёрдых частиц из газовых потоков, возникающих в результате измельчения, сушки, транспортировки и других технологических операций. Существующие промышленные сепараторы, в том числе циклонного типа, продемонстрировали ограниченные возможности при работе с пылевыми потоками, содержащими значительное количество частиц с размером менее 40 мкм. Особенно критично это становится при обработке зерновых культур, где высокая степень фракционирования материала требует точной и эффективной фильтрации.

Современные исследования в области инерционных сепараторов показывают, что эффективность улавливания частиц напрямую зависит от формы и геометрии внутренних элементов аппарата. Например, установка направляющих, искривляющих траекторию газового потока, позволяет усилить центробежные и гравитационные силы, действующие на частицы, тем самым повышая вероятность их выпадения в бункер. Одним из таких подходов является использование дугообразных или V-образных элементов, равномерно распределённых в корпусе сепарационного устройства. Подобные конструкции создают волнообразное движение потока и формируют застойные зоны, где снижается скорость газа и обеспечивается накопление осевших частиц.

Однако наличие восходящих паразитных потоков, возникающих в нижней части аппарата, способно существенно снижать эффективность улавливания. Эти потоки могут подхватывать ранее осевшие частицы и возвращать их в основной поток, что приводит к повторному уносу через выходной патрубок. Для предотвращения этого явления исследователи

предлагают использовать различные типы решёток или экранирующих структур в нижней части устройства.

Среди возможных решений выделяются три типа конструкций: сотовая решётка, сетка с V-образными поперечными элементами и решётка с перфорированным дном [1]. Наиболее перспективными считаются V-образные элементы, формирующие каналы для направленного ссыпания частиц и препятствующие формированию паразитных потоков (рис. 1).

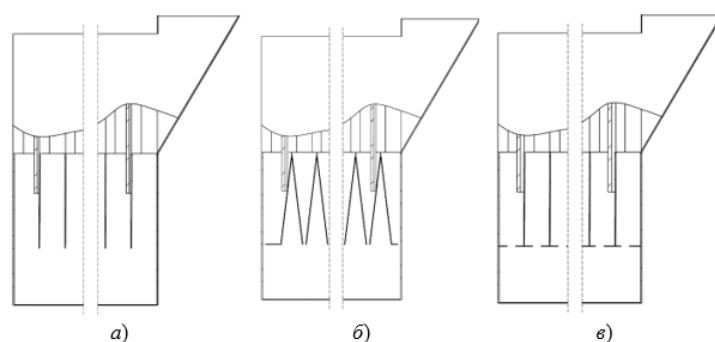


Рисунок 1 – Конструктивные варианты сепарационной решётки в нижней части сепарационного устройства: *а* – сотовая; *б* – с V-образными поперечными пластинами; *в* – с перфорированным дном

Несмотря на наличие экспериментальных данных и инженерных решений, численные исследования, основанные на CFD-моделировании, позволяют детально проанализировать распределение потоков, поведение частиц различного размера и выявить оптимальные конструктивные параметры. Такой подход актуален не только с точки зрения повышения эффективности, но и с целью минимизации износа, снижения энергозатрат и продления срока службы оборудования.

Цель исследований. Целью настоящего исследования является численная оценка влияния различных конструкций сепарационной решётки в устройстве с дугообразными направляющими на эффективность улавливания твёрдых частиц, с учётом особенностей формирования

паразитных потоков и поведения частиц различного размера в области решётки.

Материалы и методы исследований. Численное моделирование выполнено с использованием программного комплекса ANSYS Fluent. Для анализа был построен трёхмерный геометрический прототип сепарационного устройства, включающего дугообразные направляющие, размещённые в шахматном порядке, и одну из трёх рассматриваемых сепарационных решёток в нижней части: сотовую, с V-образными элементами и с перфорированным дном.

В качестве метода расчёта использовалась модель многофазного потока с применением подхода Эйлера-Лагранжа, что позволило рассматривать поведение твёрдых частиц как дискретной фазы, движущейся в непрерывной газовой среде. Предусматривалось условие симметрии по ширине аппарата. Размер сетки варьировался в зависимости от зоны модели, с наибольшей плотностью в области решётки.

Расчёты проводились при условии подачи газопылевой смеси в аппарат со скоростью 1 м/с. Частицы, участвующие в моделировании, имели размеры в пределах 10—50 микрон при плотности материала 3400 кг/м³. Массовая нагрузка твёрдой фазы варьировалась от 3,3 до 39,3 граммов в секунду. На выходной границе модели было установлено граничное условие с давлением, соответствующим атмосферному уровню.

Частицы, соприкасающиеся с твёрдой поверхностью, рассматривались как прилипшие при отсутствии отскока.

Расчётная эффективность определялась как отношение разности массовых потоков частиц на входе и выходе к начальному потоку. Также проводился анализ распределения скоростей и зон накопления частиц.

Результаты исследований. Проведённое численное моделирование в ANSYS Fluent позволило установить влияние конструкции сепарационной решётки на эффективность улавливания частиц различного

размера в сепарационном устройстве с дугообразными элементами. Были проанализированы три варианта конструкций: сотовая решётка, решётка с V-образными поперечными пластинами и решётка с перфорированным дном. Результаты представлены на рисунке 2.

Для конструкции с сотовой решёткой (кривая 1) наблюдается резкий рост эффективности при увеличении диаметра частиц от 10 до 30 мкм, с последующим достижением значения выше 0,9 при частицах свыше 30 мкм. Это свидетельствует о том, что частицы крупной фракции эффективно осаждаются, однако при наличии мелкодисперсных фракций (10–20 мкм) эффективность сепарации значительно снижается. Это обусловлено тем, что паразитные восходящие потоки, возникающие в ячейках решётки, могут поднимать уже осевшие мелкие частицы обратно в основной поток.

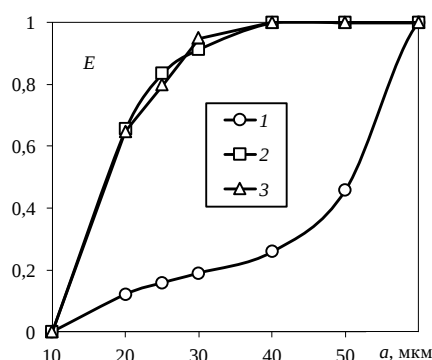


Рисунок 2 – Зависимость эффективности улавливания частиц E от их диаметра a для различных конструкций сепарационных решёток: 1 – сотовой; 2 – из продольных и поперечных V-образных пластин; 3 – из продольных и поперечных пластин с перфорированным дном

В конструкции с V-образными пластинами (кривая 2) зафиксирован наиболее низкий уровень эффективности во всём диапазоне размеров частиц. Особенно это проявляется для фракций до 50 мкм, где эффективность едва превышает 50% и растёт лишь к 60 мкм. Это может быть связано с тем, что, несмотря на наличие направляющих каналов

между пластинами, образуются застойные зоны и локальные вихревые образования, препятствующие ссыпанию частиц и способствующие их удержанию во взвешенном состоянии.

Наиболее высокая эффективность зафиксирована для решётки с перфорированным дном (кривая 3). Уже при размере частиц 20 мкм эффективность превышает 80%, достигая значений около 100% при 30 мкм и выше. Такая стабильность обусловлена равномерным распределением отверстий в днище решётки, через которые частицы легко проваливаются в бункер, не сталкиваясь с паразитными потоками. Перфорированная конструкция эффективно разрушает как восходящие, так и нисходящие паразитные потоки, препятствуя повторному уносу частиц.

Таким образом, при сохранении общей структуры сепарационного устройства наиболее перспективным вариантом решётки по совокупности параметров – эффективности, устойчивости к переполнению и сопротивлению паразитным потокам — является перфорированное дно. Его конструкция способствует равномерному распределению газового потока и эффективному осаждению частиц, минимизируя вероятность образования застойных зон и восходящих паразитных течений, которые могут повторно уносить уже осаждённые частицы.

Однако применение перфорированного дна требует тщательной проработки формы, размеров и расположения отверстий для предотвращения их забивания, особенно в условиях высоких пылевых нагрузок, характерных для переработки сельскохозяйственного сырья. Неправильно спроектированные отверстия могут привести к накоплению частиц на поверхности решётки, снижая общую эффективность сепарации и увеличивая необходимость в частом обслуживании и очистке оборудования.

Оптимизация параметров перфорации должна учитывать характеристики обрабатываемого материала, такие как

гранулометрический состав, влажность и липкость частиц. Например, для материалов с преобладанием мелкодисперсных и склонных к слипанию частиц рекомендуется использовать отверстия меньшего диаметра с увеличенной плотностью размещения, чтобы обеспечить баланс между пропускной способностью и предотвращением забивания.

Выводы. 1. Наивысшую эффективность улавливания твёрдых частиц среди рассмотренных конструкций продемонстрировала решётка с перфорированным дном – до 100% при частицах более 30 мкм и свыше 80% для фракций от 20 мкм. 2. Сотовая решётка показала приемлемые результаты при частицах более 30 мкм, но демонстрирует резкое снижение эффективности при уменьшении размера частиц до 10-20 мкм. 3. Решётка с V-образными поперечными пластинами оказалась наименее эффективной – менее 50% для частиц до 50 мкм, что указывает на необходимость пересмотра конструкции или режима работы. 4. Численное моделирование подтвердило, что конструкция решётки оказывает решающее влияние на сепарационные характеристики устройства и позволяет определить оптимальные геометрические параметры без проведения дорогостоящих натурных экспериментов.

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.