

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 ИССЛЕДОВАНИЕ СЕПАРАТОРА С ДВУТАВРОВЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ДЛЯ УЛАВЛИВАНИЯ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ В АГРОПРОМЫШЛЕННОМ КОМПЛЕКСЕ

NUMERICAL STUDY OF A SEPARATOR WITH I-BEAM ELEMENTS FOR CAPTURING FINE PARTICLES IN THE AGRICULTURAL SECTOR

Попкова Оксана Сергеевна
Канд. техн. Наук, доцент
SPIN – код автора: 4884-0466
Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

Popkova Oksana Sergeevna
Cand.Tech.Sci., Associate Professor
RSCI SPIN-code: 4884-0466
Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Хакимова Сабина Бахтиёровна
Студент
Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

Khakimova Sabina Bakhtiyorovna
Student
Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

В представленной статье рассмотрены вопросы повышения экологической безопасности в агропромышленном комплексе за счёт применения инновационных сепарационных устройств. Актуальность темы обусловлена необходимостью снижения концентрации пылевых и микродисперсных частиц в технологических процессах сушки, измельчения и переработки сельскохозяйственного сырья. Появление новых требований к качеству продукции и ужесточение экологических нормативов создают спрос на решения, способные эффективно устранять твёрдые включения из газовых потоков. Центральным аспектом исследования выступает численное моделирование, позволяющее воспроизводить распределение потоков и траектории движения частиц в трёхмерном пространстве. Применение программного комплекса ANSYS Fluent и модели турбулентности SST обеспечивает детальный анализ влияния скорости воздуха, размеров твёрдых включений и конструктивных особенностей отдельных элементов сепаратора на итоговую эффективность улавливания. Полученные данные подтверждают, что формирование оптимальных аэродинамических условий может значительно повысить селективность захвата мелкодисперсных фракций. Особое внимание уделено сравнению вариантов длины элементов и различным значениям числа Рейнольдса, что позволяет выделить наиболее перспективные режимы для широкого внедрения в аграрном секторе

This article addresses the issues of improving environmental safety in the agricultural sector through the implementation of innovative separation devices. The relevance of the topic is driven by the necessity to reduce the concentration of dust and micro-dispersed particles in technological processes such as drying, grinding, and processing of agricultural raw materials. The emergence of new product quality requirements and stricter environmental regulations creates a demand for solutions capable of efficiently removing solid inclusions from gas flows. The core aspect of the study is numerical modeling, which allows for the reproduction of flow distribution and particle trajectories in a three-dimensional space. The application of the ANSYS Fluent software package and the SST turbulence model provides a detailed analysis of the influence of air velocity, solid particle sizes, and the structural characteristics of individual separator elements on the overall capture efficiency. The obtained data confirm that the formation of optimal aerodynamic conditions can significantly enhance the selectivity of fine particle capture. Special attention is given to the comparison of element length variations and different Reynolds number values, allowing the identification of the most promising operating modes for widespread adoption in the agricultural sector

Ключевые слова: СЕПАРАЦИЯ, МЕЛКОДИСПЕРСНЫЕ ЧАСТИЦЫ,

Keywords: SEPARATION, FINE PARTICLES, AGRICULTURAL SECTOR, I-BEAM ELEMENTS,

АГРОПРОМЫШЛЕННЫЙ КОМПЛЕКС,
ДВУТАВРОВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ, ЧИСЛЕННОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ, ТУРБУЛЕНТНОСТЬ,
ANSYS FLUENT, ЧИСЛО РЕЙНОЛЬДСА,
ЭФФЕКТИВНОСТЬ УЛАВЛИВАНИЯ, SST-
МОДЕЛЬ

NUMERICAL MODELING, TURBULENCE,
ANSYS FLUENT, REYNOLDS NUMBER,
CAPTURE EFFICIENCY, SST MODEL

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-206-032>

Введение. В современных условиях развития агропромышленного комплекса (АПК) все более остро стоит задача повышения экологической безопасности и эффективности производственных процессов. В различных отраслях сельского хозяйства широко применяются технологии, связанные с сушкой зерна, измельчением кормов и переработкой органических материалов, при которых в рабочей зоне образуются мелкие частицы и пыль. Их чрезмерное содержание в воздухе может приводить к негативным последствиям как для здоровья персонала, так и для окружающей среды. Кроме того, взвешенные в газовых потоках микрочастицы способны оседать на элементах технологического оборудования, затрудняя его нормальное функционирование. В связи с этим особое внимание уделяется поиску конструктивных решений, позволяющих эффективно улавливать и удалять подобные включения, чтобы гарантировать стабильную работу производственных линий.

В сельскохозяйственном производстве высокое содержание твёрдых фракций в газовых выбросах может отрицательно сказываться на качестве конечного продукта и негативно влиять на экономические показатели предприятий. Предупреждение накопления микродисперсных примесей требует внедрения специализированных устройств, обеспечивающих селективное осаждение и отвод данных загрязнителей. Подобные системы имеют высокую актуальность для агропредприятий, стремящихся к оптимизации затрат и одновременному соблюдению природоохранных норм.

<http://ej.kubagro.ru/2025/02/pdf/32.pdf>

Дополнительно следует учитывать, что внедрение инновационных решений в сфере обеспыливания позволяет не только снизить выбросы в атмосферу, но и повышает общий уровень безопасности в помещениях, где происходят технологические операции с легко воспламеняющимися материалами. Использование прогрессивных способов и механизмов извлечения мелкодисперсных частиц способно минимизировать вероятность воспламенения пылевой смеси, что является одним из ключевых факторов промышленной безопасности.

Таким образом, развитие АПК напрямую связано с необходимостью совершенствования и распространения пылеулавливающих систем. Тенденция к расширению масштабов производства и рост требований к качеству сырья стимулируют появление всё более эффективных и надёжных устройств, адаптированных к специфике аграрного сектора. Расширение технических возможностей подобных решений даёт производителям возможность обеспечить устойчивую экономическую выгоду, повысить стабильность технологических процессов и выполнить всё более жёсткие экологические нормативы.

Состояние исследований и актуальность проблемы. В области пылеулавливания и газоочистки в агропромышленном комплексе накоплен существенный опыт по разработке и внедрению различных типов сепарационных устройств. Многие авторы указывают на важность правильного сочетания аэродинамических и конструктивных параметров, позволяющих добиваться оптимальной эффективности при минимальных потерях давления. Традиционными решениями считаются циклоны, инерционные и фильтрационные сепараторы, однако динамика развития новых технологий стимулирует эксперименты с более сложными геометрическими элементами, обеспечивающими интенсивные процессы осаждения микрочастиц.

В настоящее время в научной литературе широко обсуждаются вопросы, связанные с повышением селективности улавливания мелкодисперсных фракций размером от нескольких микрометров до субмикронного диапазона. Отмечается, что простой рост размеров или усложнение формы сепаратора не всегда даёт пропорциональный рост эффективности. Поэтому исследования всё чаще концентрируются на комбинировании геометрических особенностей и использовании современных методов математического моделирования, в том числе численных симуляций, с помощью которых можно детально проанализировать поведение потока и траектории движения твёрдых включений.

Актуальность проблемы также определяется тем, что в АПК, помимо традиционной обеспыливающей функции, сепарационные устройства должны обеспечивать безопасность производственных процессов. В частности, при работе с мукой, зерном и кормами существует риск взрывов пылевоздушных смесей, что значительно усложняет требования к оборудованию для сепарации. Среди потенциальных решений рассматриваются специальные конструкции, которые за счёт более сложного рельефа поверхности формируют дополнительные вихревые зоны, усиливающие эффект осаждения.

Исследования показывают, что важным направлением является поиск нового типа сепараторов, способных без существенных энергетических затрат улавливать мельчайшие частицы в больших объёмах газового потока. При этом определяется ряд критериев, таких как компактность, удобство обслуживания и универсальность, поскольку в аграрном секторе характерны разнообразные условия эксплуатации. В работе [1] описывается устройство с двутавровыми элементами, размещёнными в шахматном порядке, что открывает возможности для

улучшения эффективности осаждения за счёт особых аэродинамических эффектов (рис. 1).

Цель исследований. Смоделировать эффективность осаждения мелких частиц в зависимости от числа Рейнольдса для выявления оптимальных условий функционирования сепарационного устройства в агропромышленном производстве.

Материалы и методы исследований. Для анализа рабочих характеристик системы были заданы несколько постоянных параметров и ряд переменных, позволяющих оценить влияние режимов течения на процесс улавливания частиц. Давление на выходе из исследуемого устройства поддерживалось равным атмосферному значению, равному 10^5 Па. В исходном газовом потоке начальная скорость поступающих твёрдых включений принималась равной 0 м/с, а общее число частиц в моделируемом объёме устанавливали 1000. Массовый расход газовой среды, содержащей продукты сгорания, задавали равным 10 г/с (0,01 кг/с).

Далее варьировались ключевые переменные, позволяющие детально изучить динамику осаждения. Скорость на входе изменялась в диапазоне от 5 до 15 м/с, чтобы отразить различные рабочие режимы, типичные для агропромышленных установок. Размер частиц охватывал интервал 1–10 мкм, поскольку данный диапазон особенно важен для оценки улавливания пыли и микрочастиц в сельскохозяйственном производстве. Длина двутавровых принималась 10 или 14 мм, при этом количество таких элементов в одном ряду выбиралось равным 7.

Численное моделирование проводилось с применением метода конечных элементов в среде ANSYS Fluent, широко признанной в научном сообществе за её возможности точного описания сложных гидродинамических процессов. Для учёта турбулентности использовалась модель SST (Shear Stress Transport), дающая надёжные результаты в задаче, где существенную роль играют приповерхностные эффекты и

турбулентные структуры. Выбранный подход позволил исследовать влияние геометрических факторов и режимов потока на долю улавливаемых микрочастиц. В ходе расчётов оценивался вклад различных условий в формирование аэродинамического поля, а также в определение траекторий движения дисперсной фазы.

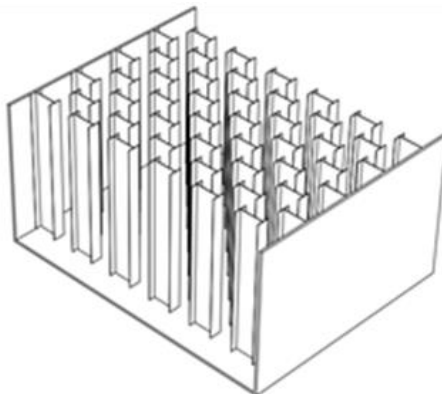


Рисунок 1 – Упрощенная модель сепаратора с двуставровыми элементами

Результаты исследований. На приведённом графике (рис. 2) по оси абсцисс отложено число Рейнольдса (Re), а по оси ординат – эффективность улавливания. Число Рейнольдса изменяется приблизительно в диапазоне от 0 до 25, в то время как эффективность захвата мелкодисперсных частиц колеблется от 0,2 до 0,9. Каждая кривая соответствует различной входной скорости газового потока, при этом сплошные линии относятся к конструкции с двуставровыми элементами длиной 10 мм, а пунктирные – к варианту с элементами длиной 14 мм. Согласно легенде, скорости 5, 10 и 15 м/с обозначены цифрами в комбинации «1,4», «2,5» и «3,6» соответственно.

При низких числах Рейнольдса, то есть в диапазоне Re от 0 до 3–4, эффективность улавливания E у всех рассмотренных вариантов не превышает 0,3–0,4. По мере увеличения Re до 10 наблюдается значительный рост показателя E , который достигает около 0,7–0,8, а в некоторых случаях превышает 0,8. Максимальные значения

эффективности (близкие к 0,9) наблюдаются в области $Re \approx 12-15$. При дальнейшем росте Re (ближе к 20–25) для части кривых виден некоторый спад, когда E возвращается в диапазон 0,6–0,7.

Для газового потока со скоростью 15 м/с (линии 3 и 6) кривая имеет высокий подъём на промежуточных значениях Re и достигает порядка 0,85–0,9, однако после этого наблюдается заметный спад эффективности. Это может говорить о том, что слишком высокие скорости потока создают зоны, где часть частиц не успевает осесть и уносится вихревыми образованиями. Напротив, при скоростях 5 и 10 м/с (линии 1,2,4,5) максимумы эффективности в области Re до 15 выглядят плавнее, а снижение после пика менее резкое.

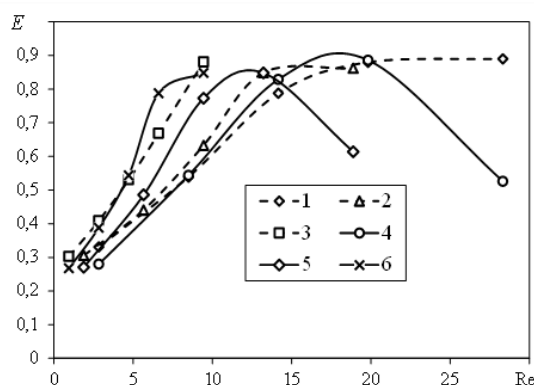


Рисунок 2 – Изменение эффективности улавливания мелкодисперсных частиц E от числа Рейнольдса Re при входной скорости газового потока W , м/с:

1,4 – 5; 2,5 – 10; 3,6 – 15.

Линии отображают проведенные исследования для прямоугольного сепаратора с длиной двутавровых элементов 10 мм.

Пунктирные линии для длины двутавровых элементов 14 мм

Сопоставляя сплошные и пунктирные кривые, видно, что при скоростях ниже 15 м/с удлинённые двутавровые элементы (14 мм) преимущественно обеспечивают более высокую эффективность на нескольких процентных пунктах, по сравнению с элементами длиной 10 мм. Однако при достижении больших скоростей (Re более 15)

наблюдается выравнивание результатов, и разница между сепараторами двух типов сокращается. Подобная динамика свидетельствует о том, что выбор оптимальной длины двутавровых элементов может зависеть как от диапазона скоростей газового потока, так и от требуемого уровня эффективности улавливания в реальных условиях эксплуатации.

Выводы. 1. Применение сепарационных устройств с элементами специальной формы актуально для агропромышленного сектора ввиду необходимости удаления мельчайших включений из газовых потоков. 2. При числе Рейнольдса порядка 15 (при входной скорости газового потока 15 м/с) сепаратор с двутавровыми элементами длиной 14 мм показывает эффективность улавливания около 0,9, что приблизительно на 4 % выше, чем у варианта с элементами длиной 10 мм.

Библиографический список

1. Зинуров, В. Э. Улавливание мелкодисперсных капель из газового потока в сепарационном устройстве с двутавровыми элементами / В. Э. Зинуров, А. В. Дмитриев, О. С. Дмитриева // Промышленная энергетика. – 2020. – № 12. – С. 47-53.

References

1. Zinurov, V. Je. Ulavlivanje melkodispersnyh kapel' iz gazovogo potoka v separacionnom ustrojstve s dvutavrovymi jelementami / V. Je. Zinurov, A. V. Dmitriev, O. S. Dmitrieva // Promyshlennaja jenergetika. – 2020. – № 12. – S. 47-53.