

УДК 621.928.6

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

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭРОЗИОННОГО ИЗНОСА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ СТЕНОК ЦИКЛОННОГО СЕПАРАТОРА**

Рукавишников Виктор Алексеевич  
Д-р. пед. Наук, профессор  
SPIN – код автора: 4897-9169  
*Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия*

Шуктомова Алина Григорьевна  
Студент  
*Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия*

Маясова Анна Олеговна  
Ассистент  
SPIN – код автора: 5226-0982  
*Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия*

Агропромышленный комплекс является одной из ключевых отраслей экономики, где высокие требования к эффективности и надежности оборудования играют важную роль. Циклонные сепараторы, применяемые для очистки газовых потоков от твердых частиц, являются критически важными компонентами технологических процессов в агропромышленности. Данное исследование посвящено моделированию и анализу абразивного износа стенок циклонного сепаратора с использованием численных методов. В работе применен подход CFD-DEM (Computational Fluid Dynamics – Discrete Element Method), который позволяет точно моделировать движение частиц в газовом потоке и их взаимодействие с поверхностями сепаратора. Моделирование выполнено в программной среде ANSYS Fluent, где особое внимание уделено влиянию таких параметров, как скорость потока газа, размер частиц и их концентрация, на характер и интенсивность износа. Результаты исследования показали, что наиболее интенсивный абразивный износ наблюдается в верхней части сепаратора, где происходит первичный контакт частиц с поверхностью стенок. Также выявлено, что с увеличением диаметра частиц скорость износа увеличивается в два и более раза, что подтверждает необходимость учета размеров частиц при проектировании и эксплуатации циклонов. В ходе моделирования была построена линейная зависимость скорости износа от диаметра частиц, которая помогает прогнозировать зоны

UDC 621.928.6

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

### **MODELING OF EROSIIVE WEAR OF CYLINDRICAL WALLS OF A CYCLONE SEPARATOR**

Rukavishnikov Viktor Alekseyevich  
Dr.Ped.Sci., Professor  
RSCI SPIN-code: 4897-9169  
*Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia*

Shuktomova Alina Grigoryevna  
Student  
*Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia*

Mayasova Anna Olegovna  
Assistant  
RSCI SPIN-code: 5226-0982  
*Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia*

The agro-industrial sector is a vital part of the economy, where the need for efficient and reliable equipment is paramount. Cyclone separators, which are utilized to remove solid particles from gas streams, are essential components in ensuring the smooth operation of many technological processes within this industry. This study is dedicated to the modeling and analysis of abrasive wear of cyclone separator walls using numerical methods. The CFD-DEM (Computational Fluid Dynamics – Discrete Element Method) approach was applied in this work, allowing for precise simulation of particle movement in the gas flow and their interaction with the separator's surfaces. The modeling was performed using the ANSYS Fluent software, with particular attention given to the influence of parameters such as gas flow velocity, particle size, and concentration on the nature and intensity of the wear. The results showed that the most intense abrasive wear occurs in the upper part of the separator, where particles first come into contact with the surface. It was also found that as particle diameter increases, the wear rate more than doubles, confirming the necessity of considering particle size in the design and operation of cyclones. A linear dependence of the wear rate on particle diameter was established during the modeling, which helps predict areas of increased erosion

повышенной эрозии

Ключевые слова: АГРОПРОМЫШЛЕННЫЙ КОМПЛЕКС, ЦИКЛОННЫЙ СЕПАРАТОР, АБРАЗИВНЫЙ ИЗНОС, МОДЕЛИРОВАНИЕ, CFD-DEM, ЭРОЗИЯ, ПРОЧНОСТЬ ОБОРУДОВАНИЯ

Keywords: AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX, CYCLONE SEPARATOR, ABRASIVE WEAR, MODELING, CFD-DEM, EROSION, EQUIPMENT DURABILITY.

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-202-036>

**Введение.** Агропромышленный комплекс как одна из ключевых отраслей экономики предъявляет высокие требования к эффективности и надежности оборудования, используемого в различных технологических процессах. Оборудование, подвергающееся значительным механическим нагрузкам, в особенности циклонные сепараторы, играет критическую роль в поддержании стабильности производственных процессов. В таких условиях оборудование должно обеспечивать длительный срок службы при минимальных затратах на обслуживание и ремонты.

Однако при эксплуатации циклонных сепараторов возникают проблемы, связанные с износом их стенок. Абразивный износ является одной из основных причин снижения срока службы оборудования, что приводит к росту эксплуатационных расходов и потере производительности. Процесс абразивного износа сложен и зависит от множества факторов, включая скорость частиц, их размер, твердость и концентрацию в потоке. Эффективное управление этим процессом требует не только улучшения материалов, но и точного понимания механизма износа.

Моделирование абразивного износа предоставляет ценные данные для разработки технических решений, направленных на снижение негативных последствий этого процесса. Использование современных методов моделирования и компьютерных технологий позволяет создать точные математические модели, которые помогают предсказать степень износа и оценить влияние различных параметров на этот процесс. Такой

<http://ej.kubagro.ru/2024/08/pdf/36.pdf>

подход может стать основой для оптимизации конструкции циклонных сепараторов и снижения затрат на их эксплуатацию.

**Состояние исследований и актуальность проблемы.** Износ оборудования, работающего с абразивными частицами, давно является предметом научных исследований. В частности, циклонные сепараторы, используемые в агропромышленности, подвергаются значительному абразивному воздействию. В литературе описаны многочисленные исследования, направленные на изучение износостойкости материалов, применяемых для изготовления рабочих поверхностей сепараторов. Основное внимание уделяется экспериментальным и теоретическим методам, изучающим процесс абразивного износа при взаимодействии частиц с поверхностью стенок.

Современные исследования показывают, что на износ сепараторов влияют такие параметры, как форма и размер частиц, угол их столкновения со стенкой, скорость потока, а также свойства материала стенок. Использование новых износостойких материалов, таких как композиты и специальные покрытия, позволило улучшить характеристики сепараторов. Однако до сих пор проблема абразивного износа остается актуальной из-за высокой стоимости материалов и сложностей их применения в агропромышленном секторе.

В последние годы моделирование процесса износа получило значительное развитие благодаря внедрению численных методов и вычислительных технологий. Это позволяет не только исследовать различные аспекты процесса абразивного износа, но и предсказывать поведение системы при изменении эксплуатационных условий. В частности, ведется активное изучение механизмов износа с использованием методов численного моделирования и экспериментов. Численные модели, такие как метод конечных элементов (FEM) и метод дискретных элементов (DEM). Это помогает оптимизировать конструкцию

циклонных сепараторов и разрабатывать более стойкие материалы для их производства.

Несмотря на значительный прогресс в исследовании абразивного износа, многие вопросы остаются открытыми. Например, требуется больше данных о поведении различных материалов в условиях многокомпонентных потоков с различными размерами частиц и изменяющимися условиями эксплуатации. Это указывает на необходимость проведения дополнительных исследований, направленных на уточнение моделей износа и разработку более эффективных конструктивных решений для минимизации разрушительных воздействий.

**Цель исследований.** Целью данного исследования является моделирование и анализ абразивного износа стенок циклонного сепаратора в условиях эксплуатации, характерных для агропромышленного комплекса.

**Материалы и методы исследований.** Для проведения исследования использовались методы численного моделирования, реализованные в программном обеспечении ANSYS Fluent. В основе моделирования лежит использование подхода CFD-DEM (Computational Fluid Dynamics – Discrete Element Method), который позволяет моделировать динамику частиц в потоке газа и их взаимодействие с поверхностью стенок сепаратора. В качестве модели турбулентности применена  $k-\omega$  SST модель, которая наиболее точно описывает турбулентные потоки в условиях высокой скорости движения частиц и их взаимодействия с поверхностями [1].

Геометрия циклонного сепаратора была построена на основе типичных параметров промышленных устройств: диаметр корпуса сепаратора составляет 800 мм, высота – 4000 мм. Для моделирования абразивного износа использовались частицы с размерами от 20 до 160 мкм и плотностью 1400 кг/м<sup>3</sup>, что соответствует реальным условиям эксплуатации циклонов на предприятиях агропромышленного комплекса.

Моделирование проводилось при установленных начальных условиях: скорость потока газа на входе составляла  $1,7 \text{ м}^3/\text{с}$ , температура газа –  $550^\circ\text{C}$ , давление –  $58\,839,9 \text{ Па}$ .

Абразивный износ стенок сепаратора рассчитывался с использованием эмпирической модели, в основе которой лежит функция зависимости износа от диаметра частиц, скорости их движения и угла столкновения с поверхностью стенки. Расчеты проводились для различных участков сепаратора с целью выявления зон, наиболее подверженных износу. Кроме того, было выполнено моделирование для различных режимов работы сепаратора с целью оценки влияния эксплуатационных параметров на интенсивность износа.

Также особое внимание уделялось расчету зависимости эрозионного износа от углового распределения скорости частиц при их столкновении со стенками. Это позволило более точно оценить влияние различных эксплуатационных параметров на характер износа и выделить наиболее критические зоны, подверженные абразивным нагрузкам.



Рисунок 1 – 3D модель объекта исследования: 1 – входной патрубок; 2 – бункер; 3 – выходной патрубок

Циклонный сепаратор, изображенный на рисунке 1, функционирует за счет действия центробежной силы, которая используется для разделения твердых частиц от газовой смеси. Загрязненный газ поступает через

входной патрубком в цилиндрическую часть устройства, где формируется вихревой поток, направленный вниз по спирали. Под воздействием центробежной силы частицы отклоняются к стенкам сепаратора, где их скорость снижается, и они постепенно оседают в нижней части устройства – в специальный бункер для сбора твердых частиц.

Очищенный от твердых частиц газ продолжает движение по спирали вверх через внутреннюю зону сепаратора и выходит через выходной патрубок. Такая конструкция позволяет эффективно разделять частицы по плотности и размеру за счет разницы в траекториях движения твердых и газообразных фаз. Важной особенностью работы устройства является то, что процесс разделения происходит непрерывно, без необходимости вмешательства в эксплуатацию, что обеспечивает высокую производительность при минимальном обслуживании.

**Результаты исследований.** Анализ распределения износа по высоте циклонного сепаратора, показанный на четырех изображениях (рис. 2), демонстрирует, что наиболее интенсивный износ наблюдается в верхней части устройства, где происходит первичный контакт частиц с поверхностью стенок.

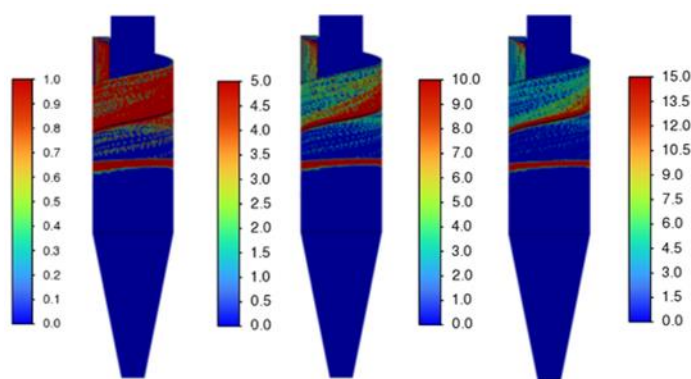


Рисунок 2 – Эрозионный износ стенок циклонного сепаратора (легенда иллюстрирует скорость износа стенок циклона мм/год)

Также в ходе исследований получено, что по мере уменьшения размеров частиц, зона максимального износа смещается вниз, что

объясняется изменением характера движения частиц в вихревом потоке. При больших размерах частиц эрозия становится более интенсивной, что подтверждается графиком на рисунке 3, где виден рост скорости износа с увеличением диаметра частиц.

Численные эксперименты показали значительное влияние размера абразивных частиц на интенсивность эрозионного износа стенок циклонного сепаратора. На основе полученных данных была построена зависимость скорости износа  $W_e$  от диаметра частиц  $a$ , которая описывается линейной функцией:

$$W_e = 0,23a + 13,46. \quad (1)$$

Высокий коэффициент детерминации  $R^2=0,98$  указывает на то, что модель достаточно точно отражает влияние диаметра частиц на скорость износа. При увеличении диаметра частиц с 20 до 160 мкм скорость износа увеличивается более чем в два раза, что свидетельствует о значительном росте эрозионных нагрузок при работе с крупными частицами.

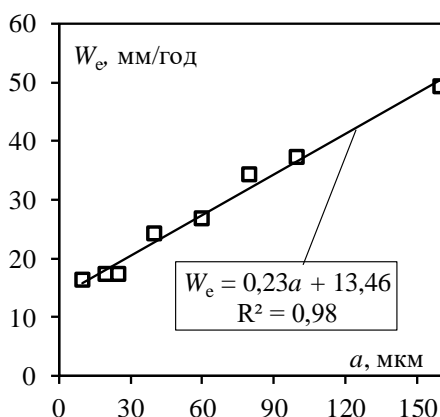


Рисунок 3 – Скорость эрозионного износа стенок циклонного сепаратора

Моделирование показало, что наибольший износ происходит при работе с частицами крупного диаметра (100-160 мкм). Эти частицы, обладая большей массой, обладают высокой кинетической энергией, что увеличивает силу их удара о стенки сепаратора. Мелкие частицы (20-40 мкм), напротив, вызывают менее интенсивный износ, что подтверждается

более равномерным распределением скорости эрозии по высоте устройства. Однако, даже для мелких частиц критическими зонами остаются верхние участки сепаратора, где происходит максимальная турбулентность.

Таким образом, результаты моделирования и анализа эрозионного износа стенок циклонного сепаратора позволяют не только точно предсказать участки с наибольшей интенсивностью износа, но и разработать рекомендации по снижению этого износа, включая применение более стойких материалов и оптимизацию параметров потока.

**Выводы.** 1. Наиболее уязвимая зона сепаратора находится в верхней части, вблизи входного патрубка, где происходит первичный контакт частиц с поверхностью стенок. В нижней части устройства интенсивность износа снижается по мере осаждения частиц в бункере. 2. Для снижения эрозионного износа возможно применять специальные износостойкие покрытия на наиболее уязвимых участках, а также рассмотреть возможность изменения конструкции сепаратора для оптимизации траектории движения частиц. 3. Численное моделирование с использованием методов CFD-DEM продемонстрировало высокую эффективность для прогнозирования зон с наибольшим износом и позволило провести количественную оценку эрозионных процессов. 4. По результатам исследования было получено уравнение, описывающее зависимость скорости износа от диаметра частиц.

#### **Библиографический список**

1. Salakhova, E. I. Modeling of Erosion in a Cyclone and a Novel Separator with Arc-Shaped Elements / E. I. Salakhova, V. E. Zinurov, A. V. Dmitriev, I. I. Salakhov // Processes. – 2023. – V. 11. - № 1. – P. 156. – DOI: 10.3390/pr11010156

#### **References**

1. Salakhova, E. I. Modeling of Erosion in a Cyclone and a Novel Separator with Arc-Shaped Elements / E. I. Salakhova, V. E. Zinurov, A. V. Dmitriev, I. I. Salakhov // Processes. – 2023. – V. 11. - № 1. – P. 156. – DOI: 10.3390/pr11010156