

УДК 51-74

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

### **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УЛАВЛИВАНИЯ ЧАСТИЦ В ЦИКЛОННОМ СЕПАРАТОРЕ**

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

Шаймухаметова Альбина Шамилевна  
Ассистент  
SPIN – код автора: 9252-4387  
*Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия*

Кузнецов Максим Геннадьевич  
Канд. техн. наук  
SPIN – код автора: 1592-7630  
*Казанский государственный аграрный университет, Казань, Россия*  
*Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия*

Циклонные сепараторы широко применяются в аграрном секторе для очистки воздуха от частиц пыли, возникающих при переработке сельскохозяйственной продукции и других производственных процессах. В данной работе рассматривается численное моделирование улавливания частиц различного размера в стандартном циклонном сепараторе марки ЦН-15, используемом в агропромышленном комплексе. Для исследования использовался программный продукт ANSYS Fluent, основанный на методах вычислительной гидродинамики (CFD), что позволило точно смоделировать поведение газовых потоков и движения частиц внутри устройства. Для достижения высокой точности расчетов применялась  $k-\omega$  SST модель турбулентности. Целью исследования было определить влияние скорости газового потока на эффективность улавливания частиц различного диаметра (от 5 до 80 мкм). На основе проведенных расчетов установлено, что увеличение скорости потока до 25 м/с способствует достижению максимальной эффективности улавливания мелкодисперсных частиц, что особенно актуально для аграрных процессов, требующих очистки газов с высоким содержанием пыли. Для частиц размером более 20 мкм эффективность составила 100% при всех исследованных скоростях, тогда как для частиц размером менее 20 мкм наилучшие результаты достигались при скорости 25 м/с. Кроме того, в

UDC 51-74

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

### **NUMERICAL MODELING OF PARTICLE CAPTURE IN A CYCLONE SEPARATOR**

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

Shaimukhametova Albina Shamilevna  
Assistant lecturer  
RSCI SPIN-code: 9252-4387  
*Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia*

Kuznetsov Maxim Gennadievich  
Cand.Tech.Sci.  
RSCI SPIN-code: 1592-7630  
*Kazan State Agrarian University, Kazan, Russia*  
*Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia*

In modern agro-industrial production, the task of efficiently cleaning gas flows from fine particles is becoming increasingly relevant. The impact of fine dust on the environment and human health requires the development and improvement of existing separation technologies. Cyclone separators are widely used in the agricultural sector for air purification from dust particles that arise during the processing of agricultural products and other industrial processes. This paper examines the numerical modeling of particle capture of various sizes in a standard CN-15 cyclone separator used in the agro-industrial complex. The study employed the ANSYS Fluent software, based on Computational Fluid Dynamics (CFD) methods, which allowed for accurate simulation of gas flow behavior and particle movement within the device. The  $k-\omega$  SST turbulence model was used to achieve high calculation accuracy. The aim of the study was to determine the effect of gas flow velocity on the capture efficiency of particles of different diameters (ranging from 5 to 80 microns). Based on the calculations, it was found that increasing the flow velocity to 25 m/s contributes to achieving maximum efficiency in capturing fine particles, which is especially important for agricultural processes that require gas cleaning with a high dust content. For particles larger than 20 microns, the capture efficiency was 100% at all tested speeds, while the best results for particles smaller than 20 microns were achieved at a flow velocity of 25 m/s. In

ходе моделирования были проанализированы потери давления в системе, которые возрастали пропорционально увеличению скорости потока и достигали максимального значения 980 Па при скорости 25 м/с. Этот параметр является важным критерием при выборе оптимального режима работы циклонного сепаратора для минимизации энергозатрат и обеспечения стабильной работы устройства в агропромышленном секторе

Ключевые слова: ЦИКЛОННЫЙ СЕПАРАТОР, АГРОПРОМЫШЛЕННЫЙ КОМПЛЕКС, ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, МЕЛКОДИСПЕРСНЫЕ ЧАСТИЦЫ, CFD, ПОТЕРИ ДАВЛЕНИЯ, ЭФФЕКТИВНОСТЬ УЛАВЛИВАНИЯ, ANSYS FLUENT

In addition, the pressure losses in the system were analyzed during the modeling, showing that pressure losses increased proportionally with flow velocity, reaching a maximum value of 980 Pa at a flow velocity of 25 m/s. This parameter is a crucial criterion when selecting the optimal operating mode of a cyclone separator to minimize energy costs and ensure stable operation in the agro-industrial sector

Keywords: CYCLONE SEPARATOR, AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX, NUMERICAL MODELING, FINE PARTICLES, CFD, PRESSURE LOSSES, CAPTURE EFFICIENCY, ANSYS FLUENT

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-203-038>

**Введение.** Природа процессов, связанных с улавливанием мелкодисперсных частиц из газовых потоков, представляет собой важную задачу в различных отраслях промышленности, включая агропромышленный комплекс. В последние десятилетия технологии сепарации и очистки воздуха и газов от твердых частиц становятся все более востребованными, поскольку загрязнение окружающей среды требует эффективных решений для защиты экосистем и здоровья человека. Для сельскохозяйственного производства это особенно актуально в контексте переработки продуктов и отходов, где накопление мелких частиц может привести к ухудшению условий труда и повышению риска загрязнения воздуха.

Методы сепарации, основанные на механических процессах, таких как циклоны, продолжают оставаться в центре внимания исследователей, так как их конструкция и рабочие принципы позволяют достигать высоких результатов при минимальных затратах. Тем не менее, совершенствование существующих методов требует тщательного изучения каждого элемента конструкции и влияния параметров потока на эффективность улавливания частиц. Это, в свою очередь, определяет необходимость глубокого

численного анализа для оптимизации процессов и увеличения эффективности работы таких устройств.

На сегодняшний день численные методы расчета, такие как вычислительная гидродинамика (CFD), дают возможность предсказать поведение потока и эффективность сепарации в различных конструкциях, учитывая разнообразные факторы. Такие подходы позволяют не только детализировать картину происходящих в устройстве процессов, но и прогнозировать его производительность в условиях эксплуатации. Использование современных технологий моделирования становится ключевым моментом при разработке эффективных и экономически оправданных решений для улавливания частиц в газовых потоках.

Кроме того, применение циклонных сепараторов имеет долгую историю, которая продолжает развиваться в современных условиях. Сочетание традиционных принципов работы с новыми цифровыми технологиями предоставляет возможность достижения нового уровня производительности и надежности этих устройств.

**Состояние исследований и актуальность проблемы.** За последние десятилетия исследования в области сепарации твердых частиц из газовых потоков получили значительное развитие, что объясняется необходимостью снижения выбросов в атмосферу и повышения эффективности промышленного оборудования. Различные исследования показали, что циклонные сепараторы являются одним из наиболее эффективных средств улавливания пыли и мелкодисперсных частиц, особенно в условиях агропромышленных производств. Конструкция циклонов позволяет использовать центробежные силы для разделения частиц по их размеру и массе, что делает их востребованными для очистки газа и воздуха от загрязняющих веществ.

Несмотря на обширные исследования, проведенные в данной области, остается актуальным вопрос повышения эффективности

сепараторов. Это связано с необходимостью адаптации существующих технологий к изменяющимся требованиям современных производств. Одним из ключевых направлений является разработка методов численного моделирования, которые позволяют учитывать сложные физические процессы, происходящие в сепараторах, и их взаимодействие с рабочим потоком. В частности, такие подходы могут быть полезны для оптимизации параметров конструкции и условий эксплуатации устройств, что позволяет улучшить их производительность и снизить эксплуатационные затраты.

Современные исследования сосредоточены на интеграции вычислительных методов, таких как CFD, в процесс проектирования и анализа циклонных сепараторов. Моделирование потока газа и поведения частиц в циклонных устройствах предоставляет более полную картину процессов, происходящих внутри аппарата, и позволяет выявить возможности для их совершенствования. Данный подход особенно важен для агропромышленного комплекса, где технологии улавливания пыли играют значительную роль в обеспечении безопасности и улучшении экологических показателей производства.

Также стоит отметить, что большинство современных исследований направлены на увеличение производительности сепараторов при одновременном снижении их энергозатрат. Разработка новых конструкций и методов улавливания частиц, а также использование современных программных продуктов для численного моделирования, способствуют созданию более экономичных и эффективных систем.

**Цель исследований.** Целью работы является численное моделирование улавливания частиц в циклонном сепараторе.

**Материалы и методы исследований.** Для численного моделирования улавливания твердых частиц в циклонном сепараторе использовались современные программные продукты, которые

обеспечивают возможность точного анализа сложных физических процессов, происходящих в устройстве. Основное внимание было уделено моделированию поведения газового потока и движения твердых частиц, проходящих через циклонный сепаратор. При моделировании использовался Ansys Fluent, позволяющий исследовать динамику потоков в сложных геометриях и оптимизировать конструкции сепараторов для повышения их эффективности.

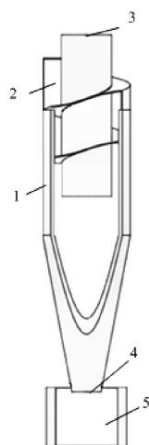


Рисунок 1 – Циклонный сепаратор: 1 – цилиндрические стенки; 2 – вход; 3 – выход; 4 – отверстие круглого сечения; 5 – сборник частиц

Моделирование проводилось для стандартного циклона марки ЦН-15 (рис. 1), который используется в различных промышленных процессах, включая агропромышленный комплекс. Геометрическая модель циклона была построена на основе реальных параметров устройства, что позволило точно воспроизвести физические процессы, происходящие внутри аппарата. Для достижения высокой точности расчетов использовалась  $k-\omega$  SST модель турбулентности, которая предоставляет возможность анализа течения потока при различных режимах работы устройства [1].

Основной задачей исследования было определение эффективности улавливания частиц различных размеров в зависимости от скорости газового потока. В качестве исходных данных задавались скорость потока на входе, давление на выходе и параметры частиц, такие как их плотность

и диаметр. Концентрация твердых частиц была мала, поэтому их взаимодействие между собой не учитывалось, что соответствует условиям работы большинства промышленных сепараторов.

Расчеты проводились для частиц диаметром от 5 до 80 мкм, что позволяет оценить работу сепаратора в различных условиях. В процессе моделирования учитывались потери давления и турбулентность потока, что позволило определить ключевые зоны устройства, где происходят наиболее значимые процессы улавливания частиц. Важным аспектом исследования стало распределение скорости и давления по сечению сепаратора, что напрямую влияет на эффективность улавливания частиц.

**Результаты исследований.** В ходе численного моделирования были проведены расчеты работы циклонного сепаратора при различных скоростях газового потока.

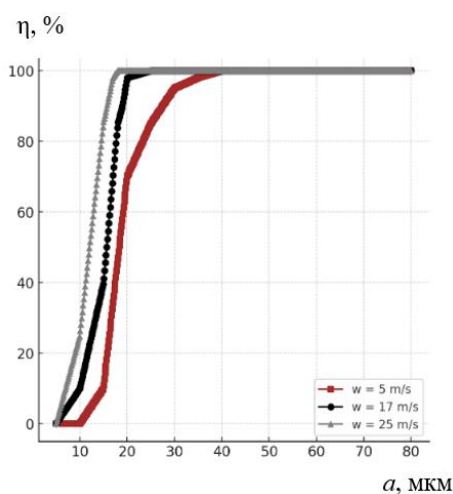


Рисунок 2 – Эффективность  $\eta$  циклонного сепаратора от размера частиц

На основе полученных данных установлено, что при скорости газового потока 5 м/с эффективность улавливания крупных частиц (размером более 40 мкм) составляет почти 100%. Однако для мелкодисперсных частиц (5-15 мкм) эффективность существенно снижается, достигая 70-80% для частиц размером 20 мкм и менее 50% для частиц размером 5 мкм. Это связано с особенностями турбулентных

потоков внутри циклона, которые препятствуют эффективной сепарации мелких частиц при низких скоростях (рис. 2).

Для частиц размером более 20 мкм эффективность достигает 100%, в то время как частицы меньшего диаметра улавливаются с эффективностью порядка 85-90% при  $W = 17$  м/с. Это улучшение объясняется усилением центробежных сил внутри сепаратора, которые способствуют более эффективному отделению частиц от газового потока.

Наибольшая эффективность была достигнута при скорости 25 м/с. При таких условиях частицы размером более 15 мкм улавливаются практически с 100% эффективностью. Это подтверждает важность увеличения скорости потока для эффективной работы циклонного сепаратора, особенно в условиях обработки газов с высоким содержанием мелкодисперсной пыли.

Помимо анализа эффективности улавливания, важным параметром исследования были потери давления в системе. Увеличение гидравлического сопротивления от увеличения скорости связано с повышенным сопротивлением газового потока при прохождении через вихревые зоны внутри циклона. Потери давления в циклонном сепараторе составили до 980 Па.

Численное моделирование показало, что увеличение скорости газового потока положительно влияет на эффективность улавливания частиц, особенно мелкодисперсных, однако сопровождается увеличением потерь давления. Для оптимизации работы циклона необходимо учитывать этот компромисс между эффективностью сепарации и гидравлическим сопротивлением системы.

Таким образом, численное моделирование в ANSYS Fluent показало, что циклонные сепараторы могут эффективно работать при различных режимах, но требуют оптимизации для улавливания мелкодисперсных частиц.



**Выводы.** 1. Эффективность улавливания частиц напрямую зависит от скорости газового потока. При скорости 25 м/с циклонный сепаратор показал наибольшую эффективность, особенно для частиц размером менее 20 мкм, которые улавливались с эффективностью до 90-100%. Для более крупных частиц (более 20 мкм) эффективность составляла 100% на всех режимах работы. 2. Оптимальный режим работы циклонного сепаратора предполагает баланс между эффективностью улавливания и потерями давления. Наиболее целесообразно использовать скорость потока порядка 17 м/с, так как при этом достигается высокая эффективность улавливания частиц (до 98% для частиц размером более 20 мкм) при умеренных потерях давления.

#### **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.

#### **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.