

УДК 621.928.6

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

### **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕПАРАЦИИ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ ИЗ ЗАПЫЛЕННОГО ГАЗА В СЕПАРАТОРЕ**

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

Якимов Николай Дмитриевич  
Д-р физ.-мат. наук, профессор  
SPIN – код автора: 2960-4372  
*Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия*

Шайхутдинова Альбина Маратовна  
Студент  
*Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия*

Мультивихревые сепараторы особенно актуальны для агропромышленного сектора, где загрязнение воздуха и технологических сред мелкодисперсными частицами может существенно снизить качество продукции и повлиять на производственные процессы. Использование таких устройств позволяет не только повысить эффективность очистки воздуха, но и снизить риски для здоровья персонала и окружающей среды, что особенно важно для предприятий переработки и хранения сельскохозяйственной продукции. Целью работы является численное моделирование улавливания частиц пыли в устройстве для пылегазоочистки. В статье предложена конструкция устройства для пылегазоочистки. Проведено численное моделирование процесса очистки с использованием программного комплекса ANSYS Fluent. В ходе расчетов использовалась модель турбулентности  $k-\omega$  SST. Результаты работы показали, что эффективность захвата частиц определяется как их размером, так и скоростью потока газа. С увеличением скорости поступающего газа наблюдается существенное улучшение способности устройства улавливать мелкодисперсные частицы. Оптимальная эффективность, близкая к 100%, достигается при размерах частиц более 4 мкм и скоростях потока от 3 м/с. Предложенная конструкция сепаратора отличается высокой эффективностью очистки воздуха

UDC 621.928.6

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

### **NUMERICAL MODELING OF FINE PARTICLE SEPARATION FROM DUST-LADEN GAS IN A SEPARATOR**

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

Yakimov Nikolay Dmitrievich  
Dr.Sci.Phys.-Math., Professor  
RSCI SPIN-code: 2960-4372  
*Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia*

Shaikhutdinova Albina Maratovna  
Student  
*Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia*

Multivortex separators are particularly relevant to the agro-industrial sector, where contamination of air and technological environments with fine particles can significantly reduce product quality and impact production processes. The deployment of these systems significantly boosts air purification effectiveness, while also helping to reduce health hazards for employees and minimizing environmental impact. This is especially vital for agricultural processing and storage facilities, where air quality directly influences product safety and operational efficiency. The primary goal of this research is to conduct a numerical simulation to evaluate dust particle capture within a gas cleaning system. In the paper, a specific dust-gas separation device is introduced. Numerical simulations using the ANSYS Fluent software were conducted to assess how variations in gas flow velocity and particle size affect overall filtration efficiency. Findings revealed that the efficiency of particle capture is influenced by both particle size and gas speed. As gas flow increases, the system's ability to trap smaller particles improves. Maximum efficiency, approaching 100%, was achieved for particles larger than 4 microns at flow rates of 3 m/s or more. The proposed separator model showcases high air cleaning efficiency, paired with minimal pressure loss in the system

Ключевые слова: МУЛЬТИВИХРЕВОЙ СЕПАРАТОР, ОЧИСТКА ГАЗА, МЕЛКОДИСПЕРСНЫЕ ЧАСТИЦЫ, ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ANSYS FLUENT, АГРОПРОМЫШЛЕННЫЙ КОМПЛЕКС, ПОТЕРИ ДАВЛЕНИЯ, ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФИЛЬТРАЦИИ

Keywords: SEPARATOR, FINE PARTICLES, AGRO-INDUSTRIAL SECTOR, DOUBLE T-SHAPED SECTIONS, DUST CAPTURE, CYCLONE SEPARATORS, NUMERICAL MODELING

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-202-033>

**Введение.** Мультивихревые сепараторы – это инновационные устройства, способные эффективно очищать воздух и жидкости от мелкодисперсных частиц. Их особенность заключается в использовании многократных вихревых потоков, создаваемых в рабочей зоне, что позволяет улавливать даже самые мелкие частицы с высокой степенью эффективности [1]. В агропромышленном комплексе такие технологии играют ключевую роль в улучшении условий хранения и переработки сельскохозяйственных продуктов, а также в защите окружающей среды от загрязнений.

В традиционных системах очистки часто возникают проблемы с фильтрацией мелких частиц, которые могут проходить через стандартные фильтры. Мультивихревые сепараторы решают эту проблему благодаря своим конструктивным особенностям. Возникающие в устройстве вихри создают центробежные силы, которые способствуют отделению частиц от основного потока. Однако, несмотря на высокую эффективность, одной из главных проблем эксплуатации подобных систем является накопление частиц на поверхностях рабочих элементов. Этот аспект особенно важен при работе с мелкодисперсными веществами, которые обладают склонностью к налипанию на поверхности сепараторов.

Мелкие частицы могут представлять серьезную угрозу для здоровья сотрудников. При вдыхании таких частиц они оседают в дыхательных путях и легких, что может привести к ряду острых и хронических заболеваний. Длительное воздействие пыли и других мелких частиц способно вызвать аллергические реакции, респираторные заболевания,

<http://ej.kubagro.ru/2024/08/pdf/33.pdf>

такие как бронхит и пневмокониоз, а также усугубить уже имеющиеся хронические заболевания дыхательной системы. Помимо этого, частицы могут переносить на себе вредные вещества, такие как микроорганизмы или химические соединения, что повышает риск инфекционных и токсических заболеваний.

Возможность эффективного удаления мелких частиц становится залогом повышения уровня санитарной безопасности и поддержания качества продукции в агропромышленном секторе.

**Состояние исследований и актуальность проблемы.** Технологии сепарации и очистки воздуха и жидкостей от мелкодисперсных частиц давно привлекают внимание исследователей в различных отраслях, включая агропромышленный комплекс. Современные сепарационные системы для агропромышленного сектора сталкиваются с рядом вызовов, связанных с необходимостью эффективного удаления мелких частиц, которые могут негативно сказаться на качестве продукции и процессе производства. К числу таких частиц относятся пыль, микроорганизмы, споры грибков и другие микрочастицы, которые способны нарушить санитарные нормы и стандарты хранения продукции.

На сегодняшний день в научных публикациях отмечается ряд перспективных направлений в области сепарации, таких как электростатические, мембранные и вихревые сепараторы. Мультивихревые системы выделяются среди них благодаря своей способности эффективно удалять частицы малого размера.

Важным аспектом развития данной области является поиск решений, которые позволят обеспечить стабильную работу сепараторов на длительный период без потери эффективности. Например, электростатические фильтры необходимо периодически очищать. Одним из таких решений является использование технологий периодического действия, которые позволяют удалять накопившиеся частицы без

необходимости полного демонтажа или остановки производственного процесса. Это делает разработку мультивихревых сепараторов с возможностью периодической очистки актуальной и востребованной задачей для агропромышленного комплекса, где высокие требования к чистоте воздуха и жидкостей играют важную роль в обеспечении качества продукции.

С другой стороны, с развитием технологий сепарации возрастает потребность в повышении энергетической эффективности этих систем. Одним из ключевых вызовов для современных сепараторов является необходимость снижения энергетических затрат при высоких показателях фильтрации. В этом контексте особый интерес представляют решения, использующие вихревые потоки и улучшенную аэродинамику для снижения сопротивления потоку воздуха. Такие технологии позволяют сократить энергопотребление, одновременно поддерживая высокую производительность.

В связи с этим, авторами работы предложено устройство для пылегазоочистки (рис. 1). Основными элементами устройства являются сепарационные блоки (поз. 5), в которые направляется поток газа, с диспергированными мелкодисперсными частицами пыли (рис. 1, а). Между этими блоками имеются каналы (поз. 6, рис. 1, б), в которых происходит образование множества вихрей. Поток газа проходит через сквозные отверстия (поз. 3 и 4) в сепарационных блоках, после чего направляется в каналы для дальнейшего завихрения и разделения частиц. Множество завихрений имеют относительно небольшой диаметр. Ввиду этого на частицы пыли, содержащиеся в потоке, действуют инерционные силы, способные их выбить из него. Частицы отлетают к внутренним стенкам и прилипают на них. По мере образования большого количества частиц они агломерируются и комками падают вниз.

**Цель исследований.** Численное моделирование улавливания частиц пыли в устройстве для пылегазоочистки.

**Материалы и методы исследований.** Для проведения исследования процесса улавливания мелкодисперсных частиц пыли в предложенном устройстве для пылегазоочистки использовался программный пакет ANSYS Fluent, который является мощным инструментом для численного моделирования динамики газов и частиц в сложных конструкциях. В процессе численного моделирования динамики газа и пылевых частиц в сепараторе использовалось уравнение Навье-Стокса для описания движения вязкой жидкости. Это уравнение было дополнено уравнением неразрывности, которое обеспечивает соблюдение закона сохранения массы в рамках модели. В ходе исследования рассматривалось изменение ряда параметров, влияющих на процесс улавливания пылевых частиц, таких как скорость газа на входе и размеры частиц пыли. Для более точного моделирования поведения газа и частиц в сепараторе использовалась турбулентная модель  $k-\omega$  SST, позволяющая учитывать сложные вихревые движения внутри устройства.

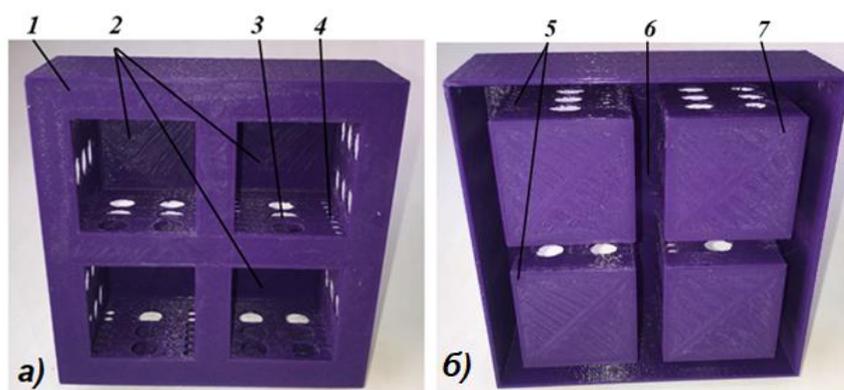


Рисунок 1 – Физическая модель: 1 – корпус; 2 – подача запыленного газа; 3, 4 – прорези; 5 – сепарационные блоки; 6 – каналы, формирующиеся между сепарационными блоками, где создаются вихревые потоки для захвата частиц. а) вид устройства с передней стороны; б) вид устройства с задней стороны.

Скорость потока газа варьировалась в диапазоне от 1 до 4 м/с с шагом в 1 м/с, что дало возможность исследовать различные рабочие режимы устройства. Такой диапазон скоростей был выбран для изучения условий как при медленных потоках, оптимальных для более точной фильтрации, так и при высоких скоростях, которые эффективнее справляются с удалением большого количества загрязняющих частиц из воздушного потока.

Частицы пыли, участвующие в моделировании, принимались размером от  $1 \cdot 10^{-6}$  до  $15 \cdot 10^{-6}$  м, что соответствует реальным условиям эксплуатации устройства для пылегазоочистки в агропромышленном комплексе. Плотность частиц принималась постоянной и равной  $1000 \text{ кг/м}^3$ , что обеспечивало более точную оценку инерционных сил, действующих на частицы в вихревой зоне сепаратора.

Одним из ключевых аспектов моделирования было задание условий на стенках устройства. В рамках численного эксперимента использовалось условие «прилипания» частиц к стенкам. Это условие моделировало процесс накопления частиц на внутренних поверхностях сепаратора, что в реальной эксплуатации приводит к необходимости периодической очистки устройства. Для оценивания степени очистки пылевого газа применялось нижеприведенное выражение:

$$E = 1 - \frac{n_{\text{нал}}}{m}, \quad (1)$$

где  $n_{\text{нал}}$  – налипшие частицы на стенки устройства, шт.;  $m$  – общее количество введенных частиц совместно с газом, шт.

**Результаты исследований.** В процессе исследований были получены данные, характеризующие эффективность улавливания мелкодисперсных частиц пыли и потери давления в устройстве для пылегазоочистки при различных режимах работы.

На основе данных, представленных на рисунке 2, была проанализирована степень очистки  $E$  запыленного газа в зависимости от диаметра частиц  $a$ , при различных скоростях входящего потока газа. Ее увеличение способствует повышению эффективности улавливания мелких частиц. Для частиц размером более 5 мкм все исследованные режимы показывают высокую степень очистки, близкую к 100%.

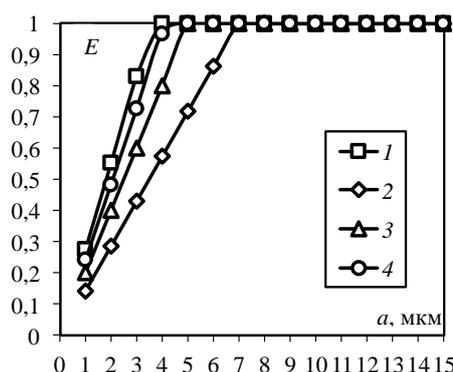


Рисунок 2 – Степень очистки запыленного газа от диаметра частиц, содержащихся в нем. Скорость входа текучей среды в устройство, м/с: 1 – 1; 2 – 2; 3 – 3; 4 – 4

При скорости  $W$  равной 2, 3 и 4 м/с степень очистки газа от частиц составляет не менее 20 %.  $E = 20$  % и  $E = 80,2$  % для  $a = 1$  мкм и  $a = 4$  мкм соответственно при  $W = 2$  м/с.  $E = 24,2$  % и  $E = 96,8$  % для  $a = 1$  мкм и  $a = 4$  мкм соответственно при  $W = 3$  м/с. Максимальная эффективность достигается при  $W = 4$  м/с. В среднем эффективность составляет 93,2 % для частиц диаметром 1-15 мкм.

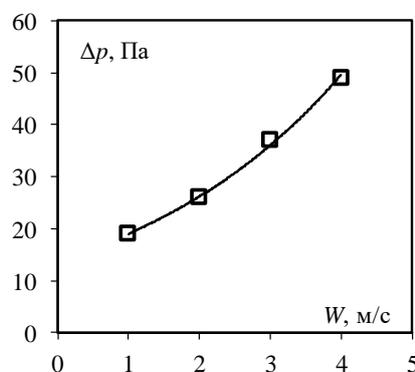


Рисунок 3 – Потери давления в устройстве от скорости газа

При осуществлении численного моделирования было получено, что потери давления в предлагаемом устройстве составляют 19-49 Па (для исследуемого диапазона скорости 1-4 м/с) (рис. 3).

Таким образом, использование ANSYS Fluent и варьирование основных параметров позволили получить качественную картину поведения частиц пыли внутри устройства и выявить наиболее эффективные режимы работы мультивихревого сепаратора для достижения максимальной эффективности очистки воздуха в агропромышленном комплексе.

**Выводы.** 1. Способность устройства улавливать частицы зависит как от их размеров, так и от скорости газового потока. Наивысшая эффективность, близкая к 100%, достигается при размере частиц свыше 4 мкм и скорости потока газа начиная с 3 м/с. 2. Наибольшие зафиксированные потери давления составили 49 Па при скорости газа 4 м/с, что остается в допустимых пределах для промышленных систем очистки воздуха. 3. Устройство, которое было представлено, позволяет обеспечить высокую эффективность очистки: частицы, оседают на стенках устройства, образуя агломераты, которые затем падают на дно устройства, что облегчает их последующее удаление.

#### Библиографический список

1. Биккулов, Р. Я. Оценка эффективности мультивихревого сепаратора при улавливании мелкодисперсных частиц из газовых потоков в системе подготовки воздуха в окрасочных камерах / Р. Я. Биккулов, В. Э. Зинуров, А. В. Дмитриев, О. С. Дмитриева, Т. М. Тахавиев // Вестник Технологического университета. – 2023. – Т. 26. – № 1. – С. 38-43.

#### References

1. Bikkulov, R. Ja. Ocenka jeffektivnosti mul'tivihrevogo separatora pri ulavlivanii melkodispersnyh chastic iz gazovyh potokov v sisteme podgotovki vozduha v okrasochnyh kamerah / R. Ja. Bikkulov, V. Je. Zinurov, A. V. Dmitriev, O. S. Dmitrieva, T. M. Tahaviev // Vestnik Tehnologicheskogo universiteta. – 2023. – Т. 26. – № 1. – S. 38-43.