

УДК 621.928

UDC 621.928

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)

### **ОЦЕНКА УЛАВЛИВАНИЯ ЧАСТИЦ В МУЛЬТИВИХРЕВОМ СЕПАРАТОРЕ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВЫХОДНЫХ ОТВЕРСТИЙ**

### **EVALUATION OF PARTICLE CAPTURE IN A MULTIVORTEX SEPARATOR DEPENDING ON OUTLET OPENINGS**

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

Rukavishnikov Viktor Alekseyevich  
Doctor in Pedagogy, Professor  
RSCI SPIN-code: 4897-9169  
*Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia*

Биккулов Рустем Ядкарлович  
Канд. техн. наук  
*Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия*

Bikkulov Rustem Yadkarovich  
Cand.Tech.Sci.  
*Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia*

Большаков Игорь Александрович  
Аспирант  
*Казанский государственный энергетический университет*

Bolshakov Igor Alexandrovich  
Postgraduate Student  
*Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia*

Современные требования к экологической и санитарной безопасности в агропромышленном комплексе диктуют необходимость разработки эффективных систем очистки воздуха от мелкодисперсных примесей. В данной работе представлено исследование эффективности мультивихревого сепаратора, предназначенного для улавливания частиц размером от 1 до 15 мкм. Для анализа использован программный комплекс ANSYS Fluent, позволяющий детально моделировать процессы взаимодействия воздушного потока и дисперсной фазы. Особое внимание уделено влиянию геометрии и расположения выходных отверстий на структуру закрученных течений, формирующихся в сепараторе. Результаты численного моделирования показали, что эффективность сепарации значительно зависит от симметрии и интенсивности вихревых структур под отверстиями. Наиболее низкие показатели эффективности наблюдаются в областях отверстий № 1 и № 5, что связано с нарушением симметрии потока и дополнительным притоком частиц из соседних зон. Наибольшую эффективность продемонстрировали отверстия № 3 и № 4, где равномерная циркуляция вихрей способствует повышению центробежных сил. Максимальные значения эффективности улавливания достигают 90 % и выше для крупных фракций

Modern requirements for environmental and sanitary safety in the agro-industrial complex dictate the need for the development of effective air purification systems for fine particulate matter. This study presents an investigation into the efficiency of a multivortex separator designed to capture particles ranging in size from 1 to 15  $\mu\text{m}$ . The analysis was conducted using the ANSYS Fluent software package, which enables detailed modeling of the interaction between the airflow and the dispersed phase. Particular attention was paid to the influence of the geometry and positioning of the outlet openings on the structure of the swirling flows formed within the separator. The results of numerical modeling revealed that the separation efficiency significantly depends on the symmetry and intensity of the vortex structures beneath the outlets. The lowest efficiency values were observed in the regions of outlets No. 1 and No. 5, which can be attributed to the disruption of flow symmetry and the additional inflow of particles from neighboring zones. The highest efficiency was demonstrated by outlets No. 3 and No. 4, where uniform vortex circulation contributed to enhanced centrifugal forces. The maximum particle capture efficiency reached 90% or higher for larger fractions

Ключевые слова: МУЛЬТИВИХРЕВОЙ СЕПАРАТОР, УЛАВЛИВАНИЕ ЧАСТИЦ,

Keywords: MULTIVORTEX SEPARATOR, PARTICLE CAPTURE, FINE PARTICULATE

МЕЛКОДИСПЕРСНЫЕ ПРИМЕСИ, ANSYS FLUENT, ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЦЕНТРОБЕЖНЫЕ СИЛЫ, АГРОПРОМЫШЛЕННОСТЬ

MATTER, ANSYS FLUENT, NUMERICAL MODELING, CENTRIFUGAL FORCES, AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-206-023>

**Введение.** Агропромышленное производство неизбежно сопряжено с обильным образованием пылевых и аэрозольных выбросов, которые возникают в процессе хранения и переработки сырья, а также при работе с различными видами сельскохозяйственных материалов. Тонкоизмельчённые частицы, особенно диаметром менее 20 микрометров, представляют повышенную опасность и могут негативно влиять на здоровье персонала, снижать качество готовой продукции и оказывать нежелательное воздействие на окружающую среду. В отрасли животноводства, например, высокие концентрации пыли приводят к ухудшению микроклимата и повышают риск распространения болезней. В растениеводческих хозяйствах подобная проблема также становится всё более очевидной, поскольку мельчайшие частицы удобрений, химических реагентов и остатков растительного сырья способны скапливаться в воздухе на критически высоком уровне.

С учётом этих факторов многие предприятия стремятся применять специальные системы очистки воздушного потока, которые бы эффективно улавливали дисперсные примеси, не снижая при этом общую производительность процессов. В условиях непрерывного роста требований к экологической и санитарной безопасности сложные способы сепарации, основанные на сочетании инерционных и гидродинамических принципов, приобретают особенно важную роль. Распространённые решения включают в себя различные фильтры, циклоны и электростатические осадители. Однако для высокодисперсных фракций иногда бывают необходимы более совершенные методы улавливания,

<http://ej.kubagro.ru/2025/02/pdf/23.pdf>

обеспечивающие достаточную глубину очистки при относительно невысоких энергозатратах.

С развитием численного моделирования и более точных инструментов вычислительной гидродинамики открылись дополнительные возможности по оптимизации конструкций. Благодаря виртуальной проверке можно заранее выявлять «проблемные» зоны, в которых турбулентные течения осложняют процесс осаждения. Это особенно актуально в случае технологий, ориентированных на сложную закрутку потока, поскольку интенсивная вихревая структура позволяет эффективно отделять частицы, но вместе с тем может порождать внезапные потери эффективности из-за неравномерности поля скоростей или нестабильных зон перетекания.

Существенное значение имеет и правильный подбор геометрических параметров, а также расположение рабочих элементов в конструкции. Дополнительно принимаются во внимание особенности материала, который подлежит сепарации, и требования к габаритам оборудования, поскольку в агропромышленном комплексе ценится компактность и простота обслуживания. Всё это стимулирует дальнейший поиск инновационных решений и углублённое исследование процессов, связанных с улавливанием мелкодисперсных примесей.

**Состояние исследований и актуальность проблемы.** На протяжении последних десятилетий в области агропромышленного комплекса реализовано немало технологий, направленных на повышение эффективности очистки воздуха от различных видов твёрдых примесей. Традиционные циклонные установки и аппараты комбинированного типа (сочетающие в себе инерционные и фильтрационные методы) широко внедрены в перерабатывающей промышленности, на зерновых элеваторах, в мукомольном и кормопроизводящем секторе. Тем не менее, сохраняется потребность в более совершенных способах улавливания тонкодисперсных

частиц, которые могут ускользать из традиционных систем из-за недостаточной центробежной силы или неравномерного распределения газового потока.

Развитие вычислительной гидродинамики позволило исследователям и инженерам сосредоточиться на глубоком анализе структуры турбулентных полей, формирующихся в пылеулавливающих аппаратах. Появилась возможность моделировать сложные режимы закрутки и оценивать влияние геометрии внутренних перегородок, распределения отверстий и конфигурации входных патрубков на общее качество отделения твёрдой фазы. Точные расчёты с использованием программных комплексов, основанных на методах конечно-объёмного анализа, помогают не только предсказать эффективность сепарации, но и выявить области, где поток становится неустойчивым или теряет свою вихревую структуру.

Сегодня всё чаще применяются установки, предусматривающие многократные или мультивихревые закрутки, в которых вращение воздушного потока усиливается за счёт использования нескольких соседних каналов, вырезов или специально расположенных щелевых окон. В таких системах создаётся повышенная градиентная зона центробежного ускорения, что теоретически даёт возможность «выдавливать» даже мельчайшие частицы к периферии и отводить их во внешнюю камеру или осадительную часть аппарата. Однако практика показывает, что в реализации подобных конфигураций возникают сложности, связанные с утечкой частиц через смежные каналы и появлением локальных турбулентных «разрывов», ослабляющих центробежные силы.

При этом одним из ключевых вопросов остаётся правильный выбор геометрии и расположения выходных отверстий, от которых существенно зависит общий КПД установки. Изменение формы или площади отверстий может приводить к формированию неоднородной вихревой структуры и

влиять на эффективность осаждения. В работе [1] был предложен мультивихревой сепаратор с квадратной геометрией каналов, где в углах возникают неустойчивые завихрения, требующие детального исследования (рис. 1).

**Цель исследований.** Провести оценку эффективности улавливания мелких твёрдых частиц в мультивихревом сепараторе.

#### **Материалы и методы исследований.**

Для достижения поставленной цели применялось компьютерное моделирование процессов турбулентного обтекания с использованием программного комплекса ANSYS Fluent. В качестве основы для расчётов была выбрана трёхмерная модель, отражающая геометрию сепарационной области с учётом внутренних перегородок и системы отверстий. Виртуальный эксперимент проводился при условии, что во входной тракт подаётся воздушный поток со скоростью порядка 5 м/с, а на выходных гранях поддерживается давление, соответствующее атмосферному.



Рисунок 1 – Распечатанная модель сепаратора на 3D-принтере

Дисперсная фаза моделировалась в виде сферических частиц с диаметром от 1 до 15 микрон, что охватывает диапазон наиболее сложных для улавливания твёрдых включений. Численное решение базировалось на уравнениях движения частиц в газовом потоке с учётом сил сопротивления и возможного влияния турбулентной пульсации. Плотность частиц принималась существенно выше плотности воздуха,

чтобы имитировать характерное для агропромышленной пыли соотношение масс.

Особое внимание в ходе расчётов уделялось десяти характерным отверстиям, через которые выводилась очищенная фракция газа. Эти отверстия отличались не только своим расположением, но и степенью взаимодействия со стенками сепарационных элементов. Для каждого отверстия анализировалась локальная структура вихрей и скорость вращения потока. Дополнительно изучалась конфигурация входных щелей и их влияние на формирование закрученных течений в каналах аппарата.

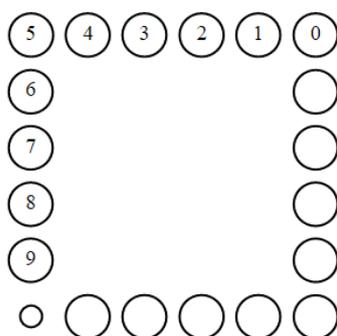


Рисунок 2 – Нумерация отверстий для отвода очищенного воздуха из сепаратора

В ходе вычислительного эксперимента фиксировалась доля частиц, удалённых через каждое из отверстий. На основании этих данных оценивалась суммарная эффективность сепарации как результат взаимодействия множества вихревых структур. Параллельно выявлялись «проблемные» области, где турбулентные эффекты приводили к снижению центробежных сил и повторному проникновению частиц в основной поток.

**Результаты исследований.** Обработка полученных данных позволила установить количественные характеристики эффективности сепарации по каждому из шести проанализированных отверстий (с индексами от 0 до 5), которые на графике представлены в виде отдельных кривых (рис. 2). По вертикальной оси отложена доля улавливаемых частиц  $E_i$ , а по горизонтали – размер дисперсной фракции или условный параметр, отражающий изменение инерционных свойств. Наблюдения показывают,

что при сравнительно мелких частицах, когда их диаметр не превышает нескольких микрометров, эффективность во всех отверстиях находится на низком или среднем уровне. С увеличением диаметра дисперсных включений кривые для большинства отверстий начинают возрастать и достигают максимума ближе к крупной фракции (рис. 3).

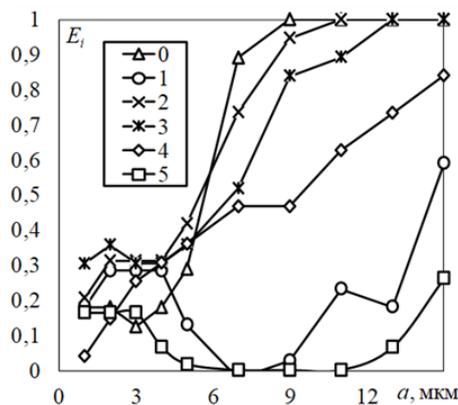


Рисунок 3 – Эффективность отверстий от размера частиц

Согласно графическим результатам, одно из минимальных значений эффективности сепарации обнаруживается в зоне отверстия № 1. Анализ потока указывает на то, что туда частично смещается газовый поток, в котором присутствуют частицы, перемещённые из области отверстия № 0. Ещё одной причиной низкой эффективности служит то, что вихрь под отверстием № 1 имеет нецилиндрическую форму и, следовательно, слабее воздействует на частицы центробежными силами.

Схожая тенденция выявлена в пространстве под отверстием № 5, где вихревые структуры оказываются ещё более неупорядоченными из-за приближённости к стенкам аппарата и сложной конфигурации каналов. Здесь неоднородность потока и сбой вихревой симметрии заметнее всего сказываются на способности установки удалять мелкодисперсные включения.

В то же время отверстия № 2, № 3 и № 4 наибольшую эффективность демонстрируют в диапазоне средних и крупных частиц. Их формы вихрей

отличаются более равномерной циркуляцией, а потоки газа, поступающие с нескольких сторон, дополнительно способствуют закрутке. В итоге суммарная эффективность сепарации при увеличении диаметра фракции возрастает и достигает порядка 90 % и выше, особенно для отверстий № 3 и № 4.

**Выводы.** 1. Сложности в виде неупорядоченных вихрей, особенно под отверстиями № 1 и № 5, вызывают локальное снижение эффективности улавливания. Причиной являются сбой симметрии и дополнительное поступление потока частиц из соседних областей. 2. При изменении диаметра частиц обнаружено, что сепарация улучшается для более крупных фракций, достигая пиковых значений выше 90 % в «благоприятных» точках выхода газа. Для самых мелких включений эффективность остаётся умеренной из-за недостаточно сильного центробежного эффекта.

#### 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.