

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)

### **ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОСЕВЫХ СКОРОСТЕЙ В ПРОСТРАНСТВЕ МЕЖДУ ТРУБ КЛАССИФИКАТОРА**

### **INVESTIGATION OF AXIAL VELOCITY DISTRIBUTION IN THE INTER-TUBE SPACE OF A CLASSIFIER**

Калимуллина Ильза Ильнаровна  
Студент  
*Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия*

Kalimullina Ilza Ilnarovna  
Student  
*Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia*

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*

Гумерова Гузель Хайдаровна  
Канд. техн. Наук, доцент  
SPIN – код автора: 5237-5977  
*Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия*

Gumerova Guzel Khaydarovna  
Cand.Tech.Sci., Associate Professor  
RSCI SPIN-code: 5237-5977  
*Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia*

В статье представлено исследование газодинамических процессов, происходящих в межтрубном пространстве мультивихревого классификатора. Основное внимание уделено анализу распределения осевых скоростей в области диаметральной линии вихря при различных высотах устройства и скоростях входного газового потока. Для изучения характеристик потоков разработана трехмерная модель классификатора с учетом его геометрических особенностей и выполнено численное моделирование в программном комплексе Ansys Fluent. Результаты моделирования показали, что распределение осевых скоростей зависит как от высоты классификатора, так и от скорости входного потока. При низкой скорости газа (1 метр в секунду) в нижней части устройства (до 70 миллиметров от основания) наблюдаются зоны с отрицательными значениями осевых скоростей, которые создают транспортные каналы для частиц. Однако при увеличении скорости газа до 8 метров в секунду структура вихрей становится более упорядоченной, а зоны обратных потоков исчезают. На высотах более 100 миллиметров для всех исследованных режимов осевые скорости приобретают исключительно положительные значения, что свидетельствует о стабилизации потоков. Анализ показал, что максимальные осевые скорости в центре вихрей превышают

The article presents a study of gas-dynamic processes occurring in the inter-tube space of a multivortex classifier. The focus is on analyzing the distribution of axial velocities along the diametrical line of the vortex at various heights of the device and different inlet gas flow velocities. To examine the flow characteristics, a three-dimensional model of the classifier was developed, considering its geometric features, and numerical modeling was performed using the Ansys Fluent software package. The modeling results demonstrated that the axial velocity distribution depends on both the classifier height and the inlet flow velocity. At a low gas velocity (1 meter per second), zones with negative axial velocity values were observed in the lower part of the device (up to 70 millimeters from the base), forming transport channels for particles. However, as the gas velocity increased to 8 meters per second, the vortex structure became more orderly, and the zones of reverse flow disappeared. At heights exceeding 100 millimeters, the axial velocities were entirely positive across all studied regimes, indicating flow stabilization. The analysis revealed that maximum axial velocities at the vortex center exceeded those in the inter-vortex space by a factor of 1.5–1.9. The stability and structure of the vortices strongly depend on the inlet flow velocity, which must be considered when designing classifiers. The obtained data enable the optimization of the device's design, improving its efficiency in classifying fine particles.

скорости в межвихревом пространстве в 1,5–1,9 раза. Устойчивость вихрей и их структура существенно зависят от скорости входного потока, что необходимо учитывать при проектировании классификаторов. Полученные данные позволяют оптимизировать конструкцию устройства, повышая его эффективность при классификации мелкодисперсных частиц. Проведенное исследование предоставляет ценные сведения для дальнейшего совершенствования газодинамических классификаторов, используемых в агропромышленном комплексе, и может быть основой для улучшения конструктивных решений

This study provides valuable insights for further development of gas-dynamic classifiers used in the agro-industrial sector and serves as a basis for enhancing design solutions

Ключевые слова: МУЛЬТИВИХРЕВОЙ КЛАССИФИКАТОР, ОСЕВЫЕ СКОРОСТИ, МЕЖТРУБНОЕ ПРОСТРАНСТВО, ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ANSYS FLUENT

Keywords: MULTIVORTEX CLASSIFIER, AXIAL VELOCITIES, INTER-TUBE SPACE, GAS-DYNAMIC PROCESSES, NUMERICAL MODELING, ANSYS FLUENT

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-205-011>

**Введение.** Современные технологии разделения и обработки материалов имеют важное значение для агропромышленного комплекса, который стремится к повышению эффективности и улучшению качества конечной продукции. В последние годы наблюдается растущий интерес к созданию оборудования, способного обеспечивать высокую степень селективности и производительности при разделении мелкодисперсных материалов. Это особенно актуально в контексте обработки зерновых культур, где использование инновационных методов классификации позволяет минимизировать потери сырья и улучшить его дальнейшую переработку.

Основное преимущество классификаторов заключается в способности создавать устойчивые потоки, которые эффективно разделяют частицы по размеру, плотности и другим физическим характеристикам. В особенности, устройства с осесимметричной конструкцией обеспечивают равномерное распределение потоков и минимизируют турбулентные искажения, что делает их идеальными для задач, требующих высокой точности.

<http://ej.kubagro.ru/2025/01/pdf/11.pdf>

Газодинамические процессы в межтрубном пространстве таких аппаратов играют ключевую роль в обеспечении эффективности классификации. Особое внимание уделяется исследованию полей скоростей, так как распределение осевых и окружных скоростей непосредственно влияет на формирование критического размера частиц, которые подлежат сепарации.

Несмотря на значительный прогресс в разработке и внедрении вихревых классификаторов, ряд фундаментальных вопросов, таких как динамика взаимодействия потоков, устойчивость вихревых структур и их влияние на селективность, остается недостаточно изученным.

#### **Состояние исследований и актуальность проблемы.**

Исследования в области газодинамических процессов в классификаторах с вихревыми структурами ведутся на протяжении последних десятилетий и охватывают широкий спектр задач, включая теоретическое моделирование, экспериментальное изучение и численные методы анализа. Существующие работы подчеркивают важность формирования устойчивых вихрей в межтрубном пространстве, которые выступают ключевым механизмом для разделения частиц по их критическим размерам. Такие вихри создают условия для селективной сепарации за счет возникновения зон с различными скоростями и давлениями.

Особое внимание в исследованиях уделяется влиянию геометрических параметров классификаторов, таких как диаметр и высота труб, расположение прямоугольных щелей и других элементов конструкции. Эти параметры определяют характер потоков, их стабильность и интенсивность, что в конечном итоге влияет на эффективность устройства. Ряд авторов отмечает, что устойчивость вихревых структур значительно зависит от входной скорости газа, а также от условий взаимодействия между вихрями, что создает дополнительные сложности при проектировании и оптимизации классификаторов.

Одной из ключевых проблем остается недостаточная изученность процессов, происходящих между вихрями, где формируются так называемые транспортные каналы. Эти каналы играют двойственную роль: с одной стороны, они способствуют выносу мелкодисперсных частиц, а с другой – могут создавать нежелательные обратные потоки, снижающие общую эффективность аппарата. Исследование полей скоростей в этих областях позволяет лучше понять механизмы формирования зон с отрицательными осевыми скоростями, которые оказывают значительное влияние на транспортировку частиц.

Важным направлением современной науки является разработка методов численного моделирования, которые позволяют проводить детальный анализ газодинамических характеристик классификаторов. Программные комплексы, такие как Ansys Fluent, предоставляют возможность создавать трехмерные модели с учетом реальных условий работы устройства. Это обусловлено сложностью взаимодействия потоков и необходимостью учета большого количества параметров, влияющих на поведение вихревых структур.

Актуальность данной проблемы обусловлена необходимостью повышения энергоэффективности и производительности оборудования для агропромышленного комплекса. Таким образом, проведение исследований, направленных на изучение полей скоростей и оптимизацию конструктивных решений, является важным шагом к развитию технологий для агропромышленного сектора.

**Цель исследований.** Целью данной работы является исследование газодинамических характеристик в межтрубном пространстве мультивихревого классификатора для определения закономерностей распределения осевых и окружных скоростей вихрей, а также их влияния на процесс классификации мелкодисперсных частиц.

**Материалы и методы исследований.** Для исследования газодинамических процессов в межтрубном пространстве мультивихревого классификатора была разработана трехмерная математическая модель устройства, учитывающая его геометрические и эксплуатационные параметры. Основной акцент сделан на анализе распределения осевых и окружных скоростей потоков газа, а также их влияния на процесс классификации частиц.

Мультивихревой классификатор представлен на рисунке 1. Основные геометрические параметры аппарата включают наружный диаметр внутренней трубы  $d=0,065$  м, внутренний диаметр внешней трубы  $D=0,095$  м, высоту внутренней трубы  $h=0,19$  м.

Для численного моделирования использовался программный комплекс Ansys Fluent, который позволяет проводить детальный анализ газодинамических процессов. Расчеты выполнялись на основе нестационарного подхода с использованием турбулентной модели  $k-\epsilon$ , оптимально подходящей для описания вихревых структур в замкнутых объемах.



Рисунок 1 – Модель с сектором проточной области

Создание расчетной области основывалось на трехмерной CAD-модели классификатора. Учитывая осесимметричность конструкции, для снижения вычислительных затрат применялось секторное моделирование 1/10 объема проточной области. Объемная сеточная модель включала около 1 млн ячеек, причем в зонах интенсивного взаимодействия потоков,

таких как области вихрей и прямоугольные щели, сетка была локально уплотнена.

Давление на выходе фиксировалось на уровне атмосферного, физические свойства газа принимались постоянными. Для анализа полей скоростей внутри межтрубного пространства были созданы 14 расчетных плоскостей с шагом 10 мм. На каждой плоскости проводились диаметральные линии, вдоль которых задавались контрольные точки для определения осевых и окружных скоростей.

**Результаты исследований.** В результате численного моделирования были получены данные, характеризующие изменение осевых скоростей в области диаметральной линии вихря при различных высотах классификатора. Анализ результатов на основе графиков (рис. 2) позволил выявить как качественные, так и количественные закономерности поведения газовых потоков при разных скоростях входного потока.

При низкой скорости газа в 1 метр в секунду структура вихрей демонстрирует значительную неустойчивость, особенно на низких уровнях классификатора (от 10 до 70 миллиметров от основания). В этой зоне наблюдаются отрицательные значения осевых скоростей, которые формируют транспортные каналы.

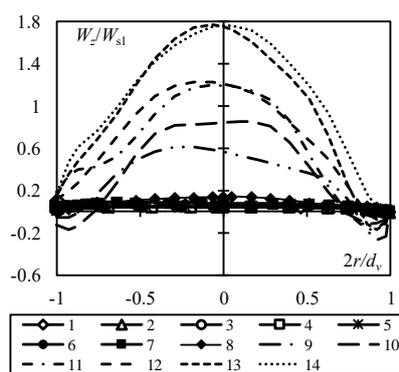


Рисунок 2 – Изменение безразмерной осевой скорости в области диаметральной линии вихря при скорости  $W = 1$  м/с

На высотах более 90 миллиметров зоны с отрицательными осевыми скоростями уменьшаются. Максимальная безразмерная осевая скорость в центре вихря составляет около 1,8, а в пространстве между вихрями – около 0,8. Это указывает на высокую концентрацию энергии в центре вихря и ослабление потоков между вихрями (рис. 2).

При увеличении скорости газа до 8 метров (рис. 3) в секунду структура вихрей становится более упорядоченной. На низких уровнях классификатора (до 70 миллиметров) зоны с отрицательными скоростями практически отсутствуют, что свидетельствует о более стабильной структуре вихрей. Максимальные безразмерные осевые скорости в центре вихря достигают значения 1,3, а в пространстве между вихрями – около 0,6.

Сравнительный анализ показывает, что увеличение скорости входного потока приводит к уменьшению зоны с отрицательными осевыми скоростями и повышению устойчивости вихрей на всех уровнях высоты. Это способствует снижению турбулентных взаимодействий между вихрями и увеличению эффективности классификатора.

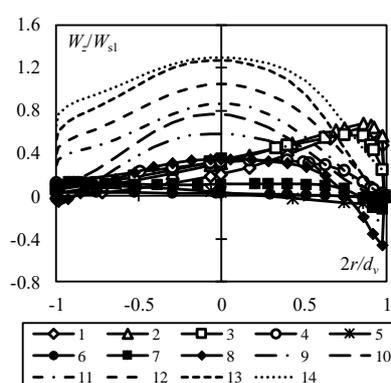


Рисунок 3 – Изменение безразмерной осевой скорости в области диаметральной линии вихря при скорости  $W = 8$  м/с

Результаты моделирования подтвердили, что в центре вихря осевые скорости в среднем в 1,5–1,9 раза превышают скорости в пространствах между вихрями, что сохраняется при всех исследованных скоростях газа.

На низких уровнях классификатора (от 10 до 50 миллиметров) для скорости 1 метр в секунду фиксируются зоны с отрицательными значениями осевых скоростей, которые исчезают при скорости 8 метров в секунду. Это указывает на важную роль входной скорости в формировании устойчивых вихрей и исключении обратных потоков.

На высотах более 100 миллиметров для всех исследованных скоростей наблюдаются исключительно положительные значения осевых скоростей, что свидетельствует о полном отсутствии обратных потоков в этой зоне. Это также указывает на то, что потоки стабилизируются и приобретают направленный характер по мере приближения к выходным отверстиям классификатора.

На низких уровнях классификатора (до 50 миллиметров) распределение осевых скоростей демонстрирует значительные колебания, обусловленные взаимодействием потоков вблизи границ труб и прямоугольных щелей. С увеличением высоты до 140 миллиметров осевые скорости становятся более стабильными, а их максимальные значения достигаются в центре вихря.

**Выводы.** Максимальные осевые скорости достигаются в центре вихрей и в 1,5–1,9 раза превышают скорости в пространстве между вихрями. С увеличением высоты устройства от 100 миллиметров и выше осевые скорости приобретают исключительно положительные значения, что указывает на стабилизацию потоков и отсутствие обратных токов.

#### Библиографический список

1. Зинуров, В. Э. Численное моделирование газодинамики в центробежном классификаторе / В. Э. Зинуров, А. В. Дмитриев, Н. Ф. Сахибгареев, Д. Н. Латыпов, М. Г. Гарипов // Вестник технологического университета. - 2021. – Т. 24. - № 12. – С. 128-132.

#### References

1. Zinurov, V. Je. Chislennoe modelirovanie gazodinamiki v centrobeznom klassifikatore / V. Je. Zinurov, A. V. Dmitriev, N. F. Sahibgareev, D. N. Latypov, M. G. Garipov // Vestnik tehnologicheskogo universiteta. - 2021. – Т. 24. - № 12. – S. 128-132.