

УДК 621.928.6

UDC 621.928.6

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)

### **РАСЧЕТ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ МУЛЬТИВИХРЕВОГО КЛАССИФИКАТОРА ДЛЯ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА**

### **CALCULATION OF THE HYDRAULIC RESISTANCE OF A MULTIVORTEX CLASSIFIER FOR THE AGRICULTURAL SECTOR**

Шаймухаметова Альбина Шамилевна

Ассистент

SPIN – код автора: 9252-4387

*Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия*

Shaimukhametova Albina Shamilevna

Assistant lecturer

RSCI SPIN-code: 9252-4387

*Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia*

Юмадилова Аида Ильдаровна

Студент

*Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия*

Yumadilova Aida Ildarovna

Student

*Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia*

В представленной работе рассматриваются особенности гидравлического сопротивления мультिवихревого классификатора, предназначенного для реализации фракционирования мелкодисперсных порошков в агропромышленном производстве. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения эффективности разделения твердых веществ на фракции определенного размера, что непосредственно влияет на качество и экономичность конечной продукции в сельском хозяйстве. Точное фракционирование обеспечивает равномерное внесение удобрений и кормовых добавок, сокращает расход материалов и снижает нагрузку на окружающую среду. Для реализации целей исследования была создана трехмерная модель мультिवихревого классификатора с учетом ключевых конструктивных особенностей, после чего в среде Ansys Fluent выполнено комплексное численное моделирование. В ходе расчетов варьировались сеточные параметры, включая размер элементов и общее число ячеек, что позволило оценить влияние различных уровней детализации на получаемое гидравлическое сопротивление системы. Результаты позволили выявить оптимальный диапазон сгущения расчетной сетки, при котором достигается необходимый уровень точности при приемлемых вычислительных затратах. Установлено, что чрезмерное увеличение числа ячеек не всегда приводит к значимому улучшению результатов, а в некоторых случаях способно повышать турбулентные колебания и вносить дополнительные ошибки.

This study examines the hydraulic resistance characteristics of a multivortex classifier designed for the fractionation of fine powders in agricultural production. The relevance of the research is driven by the need to improve the efficiency of separating solid substances into fractions of specific sizes, which directly impacts the quality and cost-effectiveness of agricultural products. Precise fractionation ensures uniform application of fertilizers and feed additives, reduces material consumption, and decreases the environmental burden. To achieve the research objectives, a three-dimensional model of the multivortex classifier was created, taking into account key structural features, followed by comprehensive numerical modeling in the Ansys Fluent environment. During the calculations, mesh parameters, including element size and the total number of cells, were varied, allowing the evaluation of the impact of different levels of detail on the system's hydraulic resistance. The results identified an optimal range of mesh refinement, where the required level of accuracy is achieved with acceptable computational costs. It was found that excessive increases in the number of cells do not always lead to significant improvements in results and, in some cases, may enhance turbulent fluctuations and introduce additional errors.

**Ключевые слова:** АГРОПРОМЫШЛЕННЫЙ КОМПЛЕКС, МУЛЬТИВИХРЕВОЙ

**Keywords:** AGRICULTURAL SECTOR, MULTIVORTEX CLASSIFIER, HYDRAULIC

КЛАССИФИКАТОР, ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ  
СОПРОТИВЛЕНИЕ, ФРАКЦИОНИРОВАНИЕ,  
МЕЛКОДИСПЕРСНЫЕ ПОРОШКИ

RESISTANCE, FRACTIONATION, FINE  
POWDERS

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-206-029>

**Введение.** Современные подходы к повышению эффективности агропромышленного производства все чаще основаны на использовании высокотехнологичных методов обработки материалов. Одним из ключевых процессов, необходимых при получении качественных порошковых продуктов, служит фракционирование, то есть разделение исходного сырья на частицы определенного размера. Данное направление обретает особую значимость при подготовке удобрений, микронутриентных добавок, средств защиты растений и различных кормовых компонентов. Подобные продукты, будучи в дисперсном состоянии, требуют строгой унификации размеров частиц для обеспечения равномерности внесения в почву, предсказуемости реакции с окружающей средой и снижения перерасхода активных веществ.

Классификаторы разного типа уже достаточно долгое время применяются в разных отраслях, включая горнодобывающую, химическую, фармацевтическую промышленность, и их востребованность в аграрном секторе неуклонно растет. Благодаря высокой точности разделения и возможности адаптации под различные характеристики сырья, такие установки дают возможность повысить конечное качество продукции и снизить затраты. В агропромышленном комплексе все чаще возникает необходимость в получении ультра- и нанодисперсных материалов, которые могут оказывать существенное влияние на урожайность, увеличивать стойкость растений к неблагоприятным условиям и снижать объемы применяемых препаратов. При этом точность фракционирования выступает критическим показателем, определяющим эффективность конечного продукта.

<http://ej.kubagro.ru/2025/02/pdf/29.pdf>

В условиях растущих требований к экологической безопасности и экономической целесообразности агропромышленные предприятия стремятся совершенствовать технологии подготовки и переработки сырья. Универсальные системы классификации частиц позволяют не только отделять крупные включения, но и формировать несколько фракций, каждая из которых может быть использована для своих целей. Например, более мелкая фракция подходит для быстрого растворения или равномерного распределения активных ингредиентов, тогда как крупная фракция может применяться для адресного внесения или дальнейшего измельчения.

Таким образом, развитие технологий классификации мелкодисперсных порошков для нужд агрокомплекса открывает новые перспективы в деле повышения урожайности, оптимизации расхода материалов и улучшения экологической обстановки. Формирование узкоразмерных фракций с заранее заданными свойствами позволяет вывести производство агропродукции на качественно иной уровень, отвечая возрастающему спросу на конкурентоспособную и безопасную продукцию.

**Состояние исследований и актуальность проблемы.** Изучение методов фракционирования порошковых материалов активно ведется на протяжении многих десятилетий, поскольку надежная сепарация твердого сырья по крупности частиц играет важную роль в различных технологических процессах. Большинство традиционных классификаторов, таких как ситовые, вибрационные, воздушные и гидравлические системы, уже нашло широкое применение. Однако совершенствование технологических процессов, усиление требований к качеству продуктов и необходимость адаптации к новым видам сырья стимулируют научное сообщество к поиску более продвинутых решений.

Одним из перспективных направлений в области классификации мелкодисперсных веществ выступают вихревые и многофазные классификаторы. Использование потока газа или жидкости для создания динамических зон, в которых частицы отделяются за счет центробежных, инерционных или турбулентных эффектов, обеспечивает более тонкую градацию по размеру. Параллельно ведется поиск оптимальных конструкций, позволяющих уменьшить габариты оборудования и одновременно повысить селективность разделения. В последнее время в исследованиях заметен уклон в сторону углубленного изучения турбулентных структур, формирования нескольких вихревых зон и регулирования времени пребывания частиц внутри потока.

В контексте агропромышленного сектора проблема точного разделения фракций выходит за рамки только лишь повышения качества конечного продукта. Правильно распределенные по крупности частицы удобрений или добавок позволяют сократить их расход, минимизировать негативное воздействие на окружающую среду и обеспечить равномерность действия препаратов. При этом важным остается вопрос снижения энергоемкости оборудования и увеличения пропускной способности, что особенно критично при массовой переработке сырья в условиях производств крупного масштаба.

Результаты многочисленных экспериментов показывают, что любая модернизация классификаторов, ведущая к росту точности фракционирования, должна сопровождаться анализом гидродинамических характеристик оборудования. Высокие энергетические затраты на создание и поддержку вихревого потока, а также возникающие потери давления способны свести на нет экономический эффект от внедрения новых технологий. В работе [1] был разработан мультвихревой классификатор, в котором фракционирование частиц осуществляется преимущественно под действием центробежных сил. Подобные разработки стимулируют

дальнейшие исследования, направленные на оптимизацию конструкции и снижение энергетических издержек, что позволяет говорить о высокой актуальности данной задачи для аграрного сектора.

**Цель исследований.** Целью настоящего исследования является проведение численных расчетов для определения гидравлического сопротивления мультивихревого классификатора, ориентированного на применение в агропромышленном комплексе.

**Материалы и методы исследований.** В ходе работы была создана детализированная трехмерная модель мультивихревого классификатора (рис. 1), разработанная с учетом конструктивных особенностей камеры сепарации и каналов для подвода и отвода потока. Для воссоздания физической картины движения частиц и определения ключевых гидродинамических параметров использовался программный комплекс Ansys Fluent, обеспечивающий широкие возможности по настройке расчетных моделей и анализу полученных данных.

На этапе подготовки к численному исследованию большое внимание уделялось качеству сеточной аппроксимации. Были построены несколько вариантов расчетных сеток, отличающихся степенью сгущения и точностью описания геометрии внутренних элементов классификатора. Основная задача заключалась в поиске оптимального баланса между вычислительными затратами и достоверностью результатов моделирования. Чтобы установить влияние размера элементов сетки на получаемые значения перепада давления, была проведена серия расчетов с различной детализацией ячеек в области предполагаемого формирования вихрей.

При выполнении моделирования учитывались особенности турбулентного течения, наличие внутренних зон рециркуляции, а также потенциальные особенности распределения скоростей и давлений. В ходе вычислений анализировалось поле скоростей, распределение статического

давления и формирование вихревых структур в рабочей полости устройства.

Для последующего анализа результатов были собраны количественные данные о перепаде давления на входе и выходе классификатора, а также оценено влияние сгущения сетки на точность определения гидравлического сопротивления. Полученные результаты легли в основу оценки работоспособности конструкции и дальнейшего совершенствования модели.

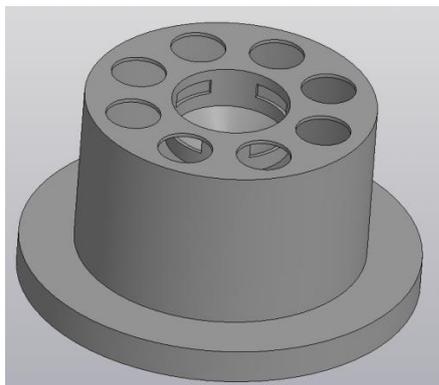


Рисунок 1 – Модель мультивихревого классификатора

**Результаты исследований.** Анализ проведенных расчетов позволил выявить зависимость итоговых значений перепада давления от степени детализации сетки. Чем более тщательно аппроксимирована геометрия ключевых элементов классификатора, тем точнее отражена реальная картина вихревого движения и турбулентных явлений. Для наглядности в таблице 1 представлены обобщенные данные по влиянию сгущения сетки на гидравлическое сопротивление мультивихревого классификатора.

Из представленных данных видно, что при увеличении количества ячеек  $n$  и уменьшении характерного размера сеточного элемента наблюдается неравномерная динамика изменения перепада давления  $\Delta p$ . В ряде случаев повышение точности сетки ведет к росту вычислительных затрат, однако дает более достоверную оценку гидравлического сопротивления. Параллельно, показатель  $\gamma$  отражает относительную

разницу между расчетными значениями, позволяя оценить степень стабилизации результатов при достижении определенной плотности сетки. При умеренном сгущении сетки (до 287 329 ячеек) значения перепада давления выходят на стабильный уровень, а дальнейшее усложнение сетки в отдельных случаях может приводить к незначительным колебаниям из-за более детального учета мелкомасштабных турбулентных структур.

Из таблицы видно, что оцениваемый параметр  $\Delta p$  стабилизировался начиная с сетки, содержащей около 437 480 ячеек, при этом максимальный размер ячейки (Max size) составлял 0,86 мм.

Таблица 1 – Влияние сгущения сетки на гидравлическое сопротивление мультивихревого классификатора

№	$n$ , шт.	Max size, мм	$\Delta p$ , Па	$\gamma$ , %
1	141 366	3,65	716,8	1,28
2	176 167	2,73	726,1	
3	190 512	2,05	741,1	2,01
4	222 274	1,53	742,5	0,19
5	287 329	1,15	738,5	0,54
6	437 480	0,86	738,1	0,04
7	984 019	0,6	745,7	1,02
8	1 973 411	0,43	754,6	2,18

Таким образом, результаты вычислительных экспериментов демонстрируют, что правильная настройка параметров расчета и оптимальный выбор сеточной модели имеют решающее значение для корректного определения гидравлического сопротивления классификатора, что особенно важно при расчете крупномасштабных установок для агропромышленного комплекса.

**Выводы.** 1. Сеточная независимость достигается при 437 480 ячеек, при этом максимальный размер ячейки (Max size) составлял 0,86 мм. 2. Проведенные вычислительные эксперименты подтвердили, что точность моделирования гидравлического сопротивления мультивихревого

классификатора существенно зависит от параметров расчетной сетки, включая количество и размер ячеек.

### **Библиографический список**

1. Зинуров, В. Э. Влияние конструктивного оформления статического мультивихревого классификатора на эффективность фракционирования частиц силикагеля / В. Э. Зинуров, А. В. Дмитриев, О. С. Дмитриева, А. М. Мугинов // Башкирский химический журнал. – 2023. – Т. 30. – № 4. – С. 99-106.

### **References**

1. Zinurov, V. Je. Vlijanie konstruktivnogo oformlenija staticheskogo mul'tivihrevogo klassifikatora na jeffektivnost' frakcionirovanija chastic silikagelja / V. Je. Zinurov, A. V. Dmitriev, O. S. Dmitrieva, A. M. Muginov // Bashkirskij himicheskij zhurnal. – 2023. – Т. 30. – № 4. – S. 99-106.