

УДК 631.171

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИХРЕВОЙ КАМЕРЫ С ДИСКОВЫМ РАСПЫЛИТЕЛЕМ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОДОПОЛЬЗОВАНИЯ В АГРОПРОМЫШЛЕННОМ КОМПЛЕКСЕ

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

Голубева Ирина Львовна
Канд. техн. Наук, доцент
Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

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

В статье рассматривается исследование гидравлических характеристик вихревой камеры с дисковым распылителем, предназначенной для применения в агропромышленном комплексе. Проведено численное моделирование закрученного потока в программном комплексе Ansys Fluent с целью определения коэффициента гидравлического сопротивления аппарата при различных режимах работы. Рассмотрены зависимости коэффициента сопротивления от скорости воздушного потока на входе и отношения массовых расходов жидкой и газовой фаз. Результаты расчетов показали, что при увеличении скорости газа на входе с 5 м/с до 15 м/с коэффициент сопротивления уменьшается на 6,8% за счет стабилизации структуры потока и снижения зон рециркуляции. Напротив, рост массовой доли жидкой фазы приводит к увеличению сопротивления: при фиксированной скорости газа рост отношения массовых расходов с 0,1 до 0,2 увеличивает коэффициент на 9,8–13%, что связано с возрастанием вязкостных потерь. Анализ полученных данных показал, что оптимальные режимы работы вихревой камеры достигаются при высоких скоростях газа и минимальных массовых расходах жидкости, что позволяет снизить гидродинамические потери и повысить эффективность аппарата. Проведенное исследование подтверждает эффективность численного моделирования для оценки

UDC 631.171

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

INVESTIGATION OF THE HYDRAULIC CHARACTERISTICS OF A VORTEX CHAMBER WITH A DISK SPRAYER TO IMPROVE WATER USE EFFICIENCY IN THE AGRICULTURAL INDUSTRY

Rukavishnikov Viktor Alekseyevich
Dr.Sci.Ped., Professor
RSCI SPIN-code: 4897-9169
Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Golubeva Irina Lvovna
Cand.Tech.Sci., associate professor
Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

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

This article presents a study of the hydraulic characteristics of a vortex chamber with a disk sprayer designed for use in the agricultural sector. Numerical modeling of the swirling flow was carried out in the Ansys Fluent software package to determine the hydraulic resistance coefficient of the apparatus under various operating conditions. The dependence of the resistance coefficient on the inlet air velocity and the mass flow ratio of the liquid and gas phases was analyzed. The simulation results showed that increasing the inlet gas velocity from 5 m/s to 15 m/s reduces the resistance coefficient by 6.8% due to the stabilization of the flow structure and the reduction of recirculation zones. In contrast, an increase in the mass fraction of the liquid phase leads to higher resistance: at a fixed gas velocity, increasing the mass flow ratio from 0.1 to 0.2 raises the coefficient by 9.8–13%, which is associated with increased viscous losses. The analysis of the obtained data demonstrated that the optimal operating conditions for the vortex chamber are achieved at high gas velocities and minimal liquid flow rates, allowing for reduced hydrodynamic losses and improved apparatus efficiency. The conducted research confirms the effectiveness of numerical modeling in assessing the hydrodynamic characteristics of vortex chambers and opens up opportunities for further design optimization to enhance energy efficiency and ensure the rational use of water resources in agricultural production

гидродинамических характеристик вихревых камер и открывает возможности для дальнейшей оптимизации конструкции с целью повышения энергоэффективности и рационального использования водных ресурсов в агропромышленном производстве

Ключевые слова: ВИХРЕВАЯ КАМЕРА, ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ, ДИСКОВЫЙ РАСПЫЛИТЕЛЬ, ЗАКРУЧЕННЫЙ ПОТОК, ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ANSYS FLUENT, АГРОПРОМЫШЛЕННЫЙ КОМПЛЕКС, ОПТИМИЗАЦИЯ, ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ

Keywords: VORTEX CHAMBER, HYDRAULIC RESISTANCE, DISK SPRAYER, SWIRLING FLOW, NUMERICAL MODELING, ANSYS FLUENT, AGRICULTURAL INDUSTRY, OPTIMIZATION, ENERGY EFFICIENCY

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-207-047>

Введение. Современные подходы к рациональному использованию водных ресурсов в агропромышленном комплексе (АПК) требуют непрерывного совершенствования технологий обработки и подачи жидкостей. Особое внимание уделяется механизмам, которые позволяют повышать эффективность расходования воды, снижают потери на этапе транспортировки и обеспечивают стабильную работу систем орошения, полива и прочих технологических операций. Вихревые камеры, изначально разработанные для различных промышленных процессов, зарекомендовали себя как универсальные устройства, способные обеспечивать интенсивное перемешивание жидкой и газовой фаз при компактных габаритах и сравнительно низких энергозатратах.

В контексте АПК вихревые камеры могут применяться для оптимизации работы систем увлажнения, внесения жидких удобрений и подготовки растворов в защитных мероприятиях. Их конструктивная особенность – создание устойчивого закрученного потока – оказывает благотворное влияние на процесс диспергирования и последующего переноса жидких компонентов, что в конечном итоге приводит к более равномерному распределению питательных веществ на обрабатываемой площади. Кроме того, вихревые камеры демонстрируют потенциально высокую надежность, так как в их основе лежат относительно простые

<http://ej.kubagro.ru/2025/03/pdf/47.pdf>

механизмы: закручиватели, распылители, направляющие лопатки. Подобное технологическое решение обеспечивает не только экономию воды, но и сокращение потребления электроэнергии благодаря снижению гидравлических потерь.

Дополнительным фактором, стимулирующим интерес к вихревым камерам, является возможность масштабирования: от компактных установок для локальных хозяйств до крупных систем для комплексной переработки жидких сред и аэрозольных смесей. Важно отметить, что за счет высокой эффективности распыления сокращается расход химических реагентов, будь то удобрения или средства защиты растений, что снижает нагрузку на окружающую среду и уменьшает себестоимость конечной продукции.

Таким образом, актуальность внедрения вихревых камер в агропромышленный комплекс трудно переоценить: они позволяют совместить экономичность, надежность и экологическую безопасность.

Состояние исследований и актуальность проблемы. Исторически исследования закрученных потоков с водной и газовой фазами охватывают широкий спектр отраслей – от нефтехимии до теплотехники. В контексте агропромышленности эти работы приобрели особую значимость в связи с возрастающими требованиями к повышению эффективности орошения и сокращению затрат при транспортировке и распределении воды. Многие ученые отмечают, что при использовании традиционных насосных систем для перекачки воды и жидких удобрений возникают значительные потери, вызванные как гидродинамическими, так и конструктивными факторами.

Практика показала, что приспособления, создающие искусственную закрутку потока, позволяют существенно повысить однородность смешения и распределения жидких компонентов. Вихревые камеры, благодаря направленной завихренности, обеспечивают равномерную подачу растворов для подкормки растений и позволяют эффективно

аэрировать жидкость, что нередко требуется при подготовке питательных сред в тепличных комплексах. Вместе с тем, остаются нерешенные вопросы, связанные с оптимизацией геометрических параметров камер, определением рациональной конфигурации лопаток или распылительных элементов, а также подбором режимов работы под разные типы сельскохозяйственных задач.

Актуальность совершенствования конструкций вихревых камер в АПК возрастает ещё и благодаря необходимости снижения техногенной нагрузки на окружающую среду. Сокращение объема использованных химических реагентов, экономия воды и электроэнергии – все это становится критически важным для поддержания экологической устойчивости сельхозпредприятий. В условиях глобальных климатических изменений и дефицита водных ресурсов сельское хозяйство вынуждено внедрять инновационные технологии, обеспечивающие бережное обращение с водой и оптимизацию производственных процессов.

Таким образом, исследование гидравлических характеристик вихревых камер с учетом их использования в сельскохозяйственных целях представляет собой актуальную научно-техническую задачу. Применение математического и компьютерного моделирования, подкрепленного экспериментальными данными, открывает широкие возможности для целенаправленного совершенствования конструкции. Это позволит повысить эффективность устройств, снизить затраты ресурсов, а также обеспечить более надежный контроль ключевых параметров при различных производственных сценариях в АПК. Решение этой задачи формирует основу для внедрения ресурсосберегающих технологий, необходимых для дальнейшего развития агропромышленного комплекса.

Цель исследований. Основная цель настоящего исследования – с помощью численного моделирования определить гидравлическое сопротивление вихревой камеры, оснащенной дисковым распылителем.

Материалы и методы исследований. Для достижения поставленной цели была создана трехмерная модель вихревой камеры в среде КОМПАС-3D с последующей ее передачей в программный комплекс Ansys Fluent, где и выполнялось численное моделирование закрученного потока воздуха и жидкости. При построении геометрии учитывались ключевые размеры аппарата: рабочий участок имел радиус около 0,2 м, а для вывода потока предусматривался выходной патрубок радиусом 0,035 м. Внутри рабочей зоны были установлены 24 лопатки высотой 0,1 м, обеспечивающие формирование закрутки, при этом дно камеры имело наклон относительно оси завихрителя примерно на 20° [1], что способствовало интенсивному вращательному движению потока.

В качестве распылительного механизма применялся диск с несколькими отверстиями и переменным диаметром: от минимального 0,04 м до максимального 0,05 м, с общим количеством восемь дисков и общей высотой распылителя 0,05 м. Степень крутки в аппарате выбиралась равной единице, а материал стенок моделировался как реальный со средней шероховатостью около 0,5 мкм. В качестве рабочей среды использовался сжимаемый газ – воздух.

На этапе задания граничных условий предполагалось, что на входе в аппарат воздух подается при атмосферном давлении 101325 Па и температуре 293 К. Скорость воздуха на выходе из камеры, используемая для расчета, принималась равной 10 м/с. Численная сетка для решения задач гидродинамики была адаптирована таким образом, чтобы корректно описывать пограничные слои и области интенсивного закручивания. Все расчеты проводились с использованием методов турбулентности, наиболее подходящих для моделирования вихревых потоков, с учетом сжимаемости газа.

Результаты исследований. На основании численных экспериментов в Ansys Fluent был рассчитан коэффициент гидравлического

сопротивления вихревой камеры при различных сочетаниях расхода жидкости и газа, а также при неодинаковых значениях скорости воздушного потока на входе. Результаты показали, что увеличение доли жидкой фазы в смеси приводит к закономерному росту коэффициента сопротивления вследствие дополнительного торможения потока и усложнения структуры завихрения. Увеличение скорости воздуха на входе до определенного предела, наоборот, способствует уменьшению гидравлического сопротивления, так как более интенсивное вращение потока частично компенсирует потери в аппарате. Однако после достижения некой критической скорости наступает зона, в которой повышение скорости незначительно влияет на общий коэффициент сопротивления или даже начинает его повышать из-за усложнения режима течения.

В ходе расчетов также была выявлена сильная зависимость сопротивления от геометрических особенностей распылителя. Наличие нескольких дисков с переменным диаметром создает сложную аэродинамическую структуру, меняющуюся при каждом конкретном соотношении массовых расходов жидкой и газовой фазы.

Для наглядности расчетные данные сведены в таблицу 1, где представлены значения коэффициента сопротивления при различных входных скоростях воздушного потока и соотношениях фаз.

При увеличении скорости газа на входе с 5 м/с до 15 м/с наблюдается закономерное снижение коэффициента гидравлического сопротивления (табл. 1). Увеличение скорости воздуха на входе в диапазоне от 5 до 15 м/с приводит к уменьшению коэффициента гидравлического сопротивления на 6,8%, что объясняется более интенсивным развитием закрученного потока, снижением локальных зон рециркуляции и более равномерным распределением давления по рабочему объему камеры.

Таблица 1 – Расчетные значения коэффициента гидравлического сопротивления вихревой камеры

$W_{\text{вх}}, \text{ м/с}$	Отношение массовых расходов (жидкость/газ)	ξ
5	0,1	13,2
10	0,1	12,7
15	0,1	12,3

Выводы. 1. Увеличение массового расхода жидкой фазы при фиксированной скорости воздуха приводит к росту коэффициента гидравлического сопротивления. Например, при скорости газа 5 м/с увеличение массового расхода жидкости с 0,1 до 0,2 повышает коэффициент сопротивления на 9,8%, при 15 м/с – уже на 13%. Это обусловлено увеличением вязкостных потерь и усложнением структуры течения внутри камеры. 2. При увеличении скорости воздуха на входе вихревой камеры с 5 м/с до 15 м/с коэффициент гидравлического сопротивления уменьшается на 6,8%. Это связано с усилением закрученного потока, уменьшением зон рециркуляции и более равномерным распределением давления в рабочей зоне камеры. 3. Численное моделирование в Ansys Fluent позволило корректно оценить характеристики вихревой камеры.

Библиографический список

1. Вихревые аппараты для очистки крупнотоннажных газовых выбросов промышленных предприятий / А. В. Дмитриев, О. С. Макушева, И. Р. Калимуллин, А. Н. Николаев // Экология и промышленность России. – 2012. – № 1. – С. 4-7.

References

1. Vihrevye apparaty dlja ochistki krupnotonnazhnyh gazovyh vybrosov promyshlennyh predpriyatij / A. V. Dmitriev, O. S. Makusheva, I. R. Kalimullin, A. N. Nikolaev // Jekologija i promyshlennost' Rossii. – 2012. – № 1. – S. 4-7.