

УДК 66.066.3

UDC 66.066.3

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)

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ВИХРЕВОЙ КАМЕРЫ ДЛЯ
ИНТЕНСИФИКАЦИИ
ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В
АГРОПРОМЫШЛЕННОМ КОМПЛЕКСЕ**

**NUMERICAL MODELING OF A VORTEX
CHAMBER FOR INTENSIFICATION OF HEAT
AND MASS TRANSFER IN THE AGRO-
INDUSTRIAL COMPLEX**

Мутугуллина Ирина Александровна
Канд. техн. наук, доцент
SPIN – код автора: 8425-6136

Mutugullina Irina Alexandrovna
Cand. Tech. Sci., Associate Professor
RSCI SPIN-code: 8425-6136

Мугинов Арслан Маратович
Студент
SPIN – код автора: 3425-1647
*Казанский государственный энергетический
университет, Казань, Россия*

Muginov Arslan Maratovich
Student
RSCI SPIN-code: 3425-1647
*Kazan State Power Engineering University, Kazan,
Russia*

В статье представлен анализ тепловых процессов, протекающих во вихревой камере, с использованием методов численного моделирования. Исследование актуально в контексте повышения энергоэффективности оборудования для обработки жидкостно-газовых смесей в агропромышленности. Для моделирования использовалась программная среда ANSYS Fluent, в которой была реализована пространственная модель камеры. В качестве входных условий задавался подвод воды через центральный разбрызгиватель, а воздух поступал через боковые лопастные каналы. На выходе камеры устанавливалось атмосферное давление. Соотношение массового расхода воды к воздуху составляло 0,5. Результаты моделирования позволили определить распределение температур в различных зонах камеры и выявить области максимального теплового взаимодействия фаз. Продольный разрез продемонстрировал формирование устойчивого вихревого потока, способствующего эффективному смешению и теплообмену. Результаты исследования представляют ценность для дальнейшего совершенствования конструкции вихревой камеры и могут служить основой для разработки эффективных технических решений, применяемых в сельском хозяйстве при кондиционировании среды, осуществлении орошения и подготовке водо-воздушных потоков

The article presents an analysis of thermal processes occurring in a vortex chamber using numerical modeling methods. The study is relevant in the context of improving the energy efficiency of equipment designed for processing liquid-gas mixtures in the agro-industrial sector. The modeling was performed using the ANSYS Fluent software, where a spatial model of the chamber was implemented. The boundary conditions included water supply through a central sprayer, while air was introduced through side blade channels. Atmospheric pressure was set at the chamber outlet. The mass flow ratio of water to air was 0.5. The simulation results made it possible to determine the temperature distribution in various zones of the chamber and to identify areas of maximum thermal interaction between the phases. The longitudinal section demonstrated the formation of a stable vortex flow that promotes effective mixing and heat exchange. The obtained data can be used for further optimization of the chamber geometry, as well as for the implementation of such systems in agricultural processes such as conditioning, irrigation, and treatment of air-water mixtures. The results of the study are valuable for further improvement of the vortex chamber design and can serve as a basis for the development of efficient technical solutions used in agriculture for environmental conditioning, irrigation, and the preparation of water-air flows

Ключевые слова: ВИХРЕВАЯ КАМЕРА, ANSYS FLUENT, ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, АГРОПРОМЫШЛЕННЫЙ КОМПЛЕКС, ТЕПЛООБМЕН, ВОДО-ВОЗДУШНАЯ СМЕСЬ, CFD

Keywords: VORTEX CHAMBER, ANSYS FLUENT, NUMERICAL MODELING, AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX, HEAT EXCHANGE, WATER-AIR MIXTURE, CFD

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-208-049>

Введение. Современное сельское хозяйство всё чаще обращается к применению сложных технических решений, способных повысить эффективность технологических процессов. Одним из направлений, заслуживающих особого внимания, является управление тепловыми и гидродинамическими процессами, происходящими при взаимодействии жидкостей и газов в условиях ограниченного объема. В таких задачах большое значение имеет степень однородности смеси и равномерность распределения температуры, что напрямую влияет на качество конечного результата.

Среди конструкций, обеспечивающих эффективное перемешивание и теплообмен между фазами, выделяются вихревые камеры. За счёт интенсивной циркуляции потока внутри объема устройства достигается высокая эффективность взаимодействия между компонентами, даже при сравнительно малом энергетическом воздействии. Геометрия камеры, режимы подачи жидкой и газообразной фаз, а также их соотношение определяют распределение температурных и скоростных характеристик внутри рабочей области.

Точные лабораторные исследования таких процессов зачастую сопряжены со значительными материальными и временными затратами. В связи с этим актуальность приобретает метод численного моделирования, позволяющий с высокой точностью прогнозировать поведение потоков в зависимости от геометрии, параметров среды и условий на границах. Современные вычислительные инструменты, такие как ANSYS Fluent, позволяют воспроизводить сложные многофазные и тепловые процессы, обеспечивая тем самым научно обоснованный подход к проектированию оборудования.

Выбор вихревой камеры как объекта исследования обусловлен её универсальностью и широким спектром применений в агропромышленном

<http://ej.kubagro.ru/2025/04/pdf/49.pdf>

комплексе. От систем увлажнения воздуха в теплицах до устройств для обработки почвы или хранения урожая – вихревая динамика способна обеспечить значительное повышение технологической эффективности [1].

Систематическое изучение распределения температур в рабочих объемах таких камер с использованием численных методов открывает перспективы для оптимизации конструкции и управления режимами работы оборудования. Это, в свою очередь, напрямую влияет на энергозатраты и эксплуатационную надёжность техники, что особенно важно в условиях ограниченных ресурсов и растущих требований к устойчивому развитию аграрного производства.

Состояние исследований и актуальность проблемы. Вопросы эффективного смешивания жидкостей и газов в агропромышленном оборудовании остаются предметом пристального внимания исследователей и инженеров. Вихревые камеры, как устройства, способные обеспечить однородное перемешивание, используются во многих отраслях, включая производство удобрений, распылительные установки, системы орошения и климат-контроль в замкнутых пространствах. Однако до сих пор существует ряд задач, связанных с недостаточной изученностью тепловых процессов, возникающих при взаимодействии фаз в подобных системах.

Ранее в научной литературе рассматривались вопросы оптимизации геометрических параметров вихревых устройств, влияние углов наклона лопаток, особенности распыла жидкости. Тем не менее, температура как важнейший параметр, оказывающий влияние на испарение, конденсацию и скорость химических реакций, редко становилась объектом детального численного анализа. Особенно это справедливо для задач, связанных с водо-воздушной смесью, характерной для сельскохозяйственных применений.

Сельскохозяйственные технологии предъявляют особые требования к равномерности климатических условий, особенно в закрытых помещениях, таких как теплицы и склады. Кроме того, оборудование для подготовки воды и воздуха должно функционировать стабильно в условиях пылевой загрязненности, колебаний влажности и температуры. Все это требует разработки устройств с высокой степенью надежности и энергоэффективности.

Применение численного моделирования на основе методов вычислительной гидродинамики (CFD) открывает возможность получения данных, недоступных при традиционных экспериментах. В частности, можно оценить, как соотношение массовых расходов фаз и особенности подачи воздуха и воды влияют на тепловую структуру потока внутри камеры. В условиях, когда необходимо учитывать взаимодействие сразу нескольких физических процессов – турбулентность, теплоперенос, многокомпонентность – без вычислительных моделей обойтись практически невозможно.

В контексте устойчивого развития сельского хозяйства особенно актуальны подходы, позволяющие сократить потребление энергии и повысить отдачу от используемого оборудования. Вихревые камеры с грамотно подобранными геометрическими характеристиками и режимами работы могут стать элементом системы, способной обеспечить оптимальные условия для хранения продукции, проращивания семян или регулирования микроклимата.

Цель исследований. Целью данной работы является численное исследование теплового состояния внутри вихревой камеры, предназначенной для применения в агропромышленном комплексе, с учетом особенностей подачи водо-воздушной смеси и взаимодействия фаз при различных режимах. Особое внимание уделяется определению температурных полей внутри устройства при заданных граничных

условиях, а также анализу эффективности вихревого движения в контексте теплообмена между компонентами смеси.

Материалы и методы исследований. В рамках исследования была разработана пространственная модель вихревой камеры, учитывающая основные конструктивные элементы: центральный канал для подачи воды, боковые входные отверстия с лопастями для ввода воздуха и осевой выходной канал. Моделирование проводилось в программной среде ANSYS Fluent, позволяющей реализовать численный расчет многофазных течений с учетом теплообмена и турбулентности.

Геометрия камеры была воссоздана на основе принципов циклонных устройств с радиальной подачей воздуха и аксиальным выпуском смеси. Подача воды осуществлялась через центральный распылитель, обеспечивающий мелкодисперсное распределение жидкости. Воздух поступал через лопастные боковые каналы под углом, способствуя формированию закрученного потока. На выходе камеры устанавливалось условие атмосферного давления (рис. 1).

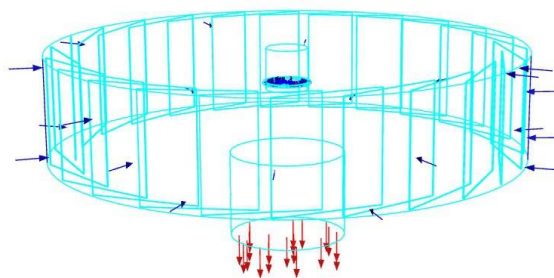


Рисунок 1 – Вихревая камера

В качестве модели турбулентности была выбрана k-ε модель, как одна из наиболее устойчивых и проверенных при решении задач, связанных с вихревыми течениями. Для описания тепловых процессов использовались уравнения энергии с учетом теплопередачи между фазами.

Соотношение массового расхода воды к воздуху составляло 0,5, что позволяет рассматривать поток как разбавленную смесь, характерную для

большинства агротехнических процессов. Температура на входе составляла 15 °С для воды и 50 °С для воздуха. Предполагалась интенсификация теплообмена за счёт турбулентного перемешивания и увеличения поверхности контакта фаз в вихревом потоке.

Сеточная модель была сформирована с учётом локального сгущения элементов в области впуска фаз и в центральной зоне камеры, где происходит интенсивное взаимодействие компонентов. Для обеспечения сходимости решения использовался итерационный подход с автоматической адаптацией временного шага и контроля остаточных норм.

Результаты численного моделирования анализировались как в виде полей температуры и скорости, так и с использованием продольных и поперечных сечений. Особое внимание уделялось области вблизи центральной оси, где происходят ключевые процессы перемешивания и теплообмена.

Результаты исследований. На основе численного моделирования, проведённого в ANSYS Fluent, была получена картина распределения температур и скоростей во внутреннем объёме вихревой камеры при заданных условиях. На рисунке 1 представлена трёхмерная модель камеры, отражающая особенности геометрии и расположение входных и выходных каналов.

На рисунке 2 отображено температурное поле смеси в продольном сечении. Анализ показал, что в центральной части камеры формируется зона интенсивного теплового взаимодействия. Максимальные значения температуры наблюдаются в области, где струя воздуха пересекается с облаком распылённой воды. В данной зоне температура смеси достигает до 47–50 °С, что указывает на эффективный теплообмен за счёт вихревого перемешивания.

Температурный градиент чётко выражен в направлении от периферии к центру камеры. Ближе к боковым стенкам температура

остаётся в диапазоне 15-25 °С, в то время как вблизи оси значение существенно возрастает. Такая структура указывает на формирование устойчивого вихревого кольца, которое способствует удержанию капель в зоне повышенной температуры и увеличивает длительность их теплового контакта с воздухом.

Количественно наблюдалось, что на участке длиной около 100 мм от центра камеры обеспечивается наиболее интенсивный обмен теплом. При этом форма температурных изолиний указывает на наличие вторичных вихрей, формирующихся вследствие несимметричной подачи воздуха через боковые лопасти. Эти вихри усиливают турбулентность и создают условия для равномерного распределения температуры в горизонтальной плоскости.

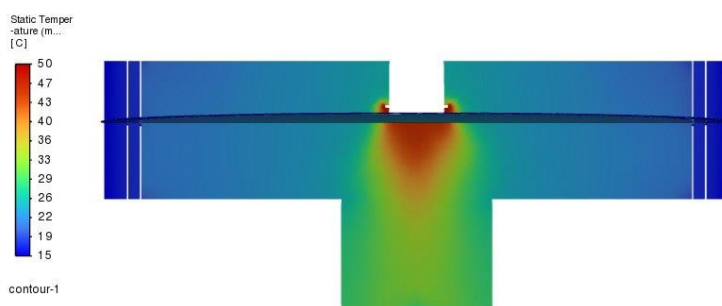


Рисунок 2 – Распределение температуры смеси во внутреннем объёме вихревой камеры (продольное сечение)

Особого внимания заслуживает область выхода, где происходит частичная стабилизация потока и выравнивание температурного профиля. Атмосферное давление на выходе приводит к частичному расширению струи, что снижает турбулентность, однако сохраняет остаточное тепло в смеси, пригодное для использования в последующих технологических операциях.

Таким образом, проведённое численное моделирование подтверждает высокую эффективность рассматриваемой конструкции вихревой камеры с точки зрения интенсификации теплообмена при

взаимодействии водо-воздушной смеси. Формирование устойчивого вихревого потока в центральной зоне камеры обеспечивает активное перемешивание фаз, увеличивая поверхность теплового контакта и способствуя равномерному распределению температуры по объему. За счёт турбулентной структуры потока достигается ускоренный обмен энергией между воздухом и распылённой водой, что особенно важно при необходимости быстрого изменения микроклиматических параметров в замкнутом пространстве.

Полученные результаты позволяют рекомендовать данную камеру к использованию в составе агропромышленного оборудования, предназначенного для процессов теплового кондиционирования, увлажнения, а также подготовки водо-воздушных сред. Такие задачи характерны, например, для тепличных комплексов, складов хранения продукции, помещений для проращивания семян, где требуется точная и быстрая регулировка температуры и влажности воздуха.

Выводы. 1. Проведённое численное моделирование показало наличие устойчивого вихревого потока внутри камеры, способствующего равномерному распределению температуры и эффективному теплообмену между водой и воздухом. 2. Геометрия входных каналов и соотношение расходов фаз играют ключевую роль в формировании температурного поля и стабильности вихревого движения.

Библиографический список

1. Дмитриева, О. С. Дисперсный состав жидкой фазы вихревого сепарационного устройства / О. С. Дмитриева, В. В. Харьков, А. Н. Николаев // Вестник Технологического университета. – 2024. – Т. 27, № 5. – С. 54-58.

References

1. Dmitrieva, O. S. Dispersnyj sostav zhidkoj fazy vihrevogo separacionnogo ustrojstva / O. S. Dmitrieva, V. V. Har'kov, A. N. Nikolaev // Vestnik Tehnologicheskogo universiteta. – 2024. – T. 27, № 5. – S. 54-58.