

УДК 681.11.031.11

UDC 681.11.031.11

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)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В ТЕПЛОМ НАКОПИТЕЛЕ ЭНЕРГИИ ДЛЯ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

MODELING OF HEAT TRANSFER IN A THERMAL ENERGY STORAGE SYSTEM FOR THE AGRICULTURAL COMPLEX

Зинуров Вадим Эдуардович
Канд. техн. наук
SPIN – код автора: 1564-3438
Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

Zinurov Vadim Eduardovich
Cand.Tech.Sci.
RSCI SPIN-code: 1564-3438
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

Чернова Олеся Станиславовна
Студент
Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

Chernova Olesia Stanislavovna
Student
Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

В статье рассмотрены актуальные вопросы повышения энергоэффективности в агропромышленном комплексе за счет внедрения тепловых накопителей энергии, способных аккумулировать избыточное тепло для последующего использования в периоды его дефицита. Авторы подчеркивают значимость исследования в условиях роста стоимости энергоресурсов, ужесточения экологических требований и необходимости сокращения углеродного следа. Приведен алгоритм численного моделирования процессов теплообмена, выполненного в среде ANSYS Fluent, с применением метода Монте-Карло, что обеспечило высокую точность расчетов и возможность учета геометрических особенностей исследуемых объектов. Особое внимание уделено сравнительному анализу трех вариантов структурного расположения твердых частиц внутри рабочей смеси: чередование «квадрат-ромб», однородные «квадраты» и «ромбы». Результаты экспериментов демонстрируют, что эффективный коэффициент теплопроводности возрастает более чем в 10 раз при увеличении температуры от 0 до 1200 °С, что подтверждает ключевую роль температурного фактора. Анализ показал, что чередующиеся элементы обеспечивают более равномерный рост теплопроводности на ранних этапах нагрева, тогда

The article addresses pressing issues related to improving energy efficiency in the agricultural complex through the implementation of thermal energy storage systems capable of accumulating excess heat for subsequent use during periods of deficit. The authors emphasize the significance of this research in the context of rising energy costs, stricter environmental regulations, and the need to reduce the carbon footprint. The article presents an algorithm for numerical modeling of heat transfer processes conducted in the ANSYS Fluent environment using the Monte Carlo method, which ensured high accuracy of calculations and the ability to account for the geometric features of the studied objects. Particular attention is paid to the comparative analysis of three structural configurations of solid particles within the working mixture: alternating "square-rhombus," homogeneous "squares," and "rhombuses." The experimental results demonstrate that the effective thermal conductivity coefficient increases more than tenfold as the temperature rises from 0 to 1200°C, highlighting the critical role of the temperature factor. The analysis revealed that alternating elements provide a more uniform increase in thermal conductivity during the initial heating stages, while monolithic structures show superior performance at higher temperatures

как монолитные структуры демонстрируют лучшие результаты при высоких температурах

Ключевые слова: ТЕПЛОВОЙ НАКОПИТЕЛЬ, ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЕ РАБОЧЕЕ ТЕЛО, ТЕПЛОИЗОЛЯЦИЯ, МНОГОСЛОЙНАЯ СИСТЕМА, ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ

Keywords: THERMAL ENERGY STORAGE, HIGH-TEMPERATURE WORKING MEDIUM, HEAT INSULATION, MULTILAYER SYSTEM, NUMERICAL MODELING, ENERGY SAVING

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-206-007>

Введение. Агропромышленная сфера непрерывно совершенствуется под влиянием технологического прогресса, что усиливает требования к качеству и объемам производимой продукции. При этом энергообеспечение остается одним из главных факторов, определяющих стабильность и рентабельность хозяйственной деятельности. Значительная часть затрат в сельскохозяйственном производстве связана с генерированием, передачей и сохранением тепла, используемого в самых разных процессах: от поддержания температуры воздуха в теплицах до сушки и переработки сырья.

Одновременно с этим усиливаются экологические требования, побуждая предприятия искать пути снижения вредных выбросов и оптимизации энергопотребления. По мере роста цен на топливо и энергоносители агробизнес все более заинтересован в минимизации эксплуатационных расходов и рациональном использовании имеющихся ресурсов. Наиболее перспективным направлением в этом контексте становится разработка и внедрение решений, обеспечивающих аккумулирование тепловой энергии для дальнейшего применения в наиболее подходящие временные интервалы.

Именно тепловая энергия в условиях аграрного сектора подвержена наибольшим колебаниям, обусловленным погодными условиями, сезонностью работ и технологической спецификой отдельных этапов производства. В результате возникает существенная разница между пиковыми периодами выработки и потребления тепла, что нередко

<http://ej.kubagro.ru/2025/02/pdf/07.pdf>

приводит к перерасходу энергоносителей или, напротив, к нехватке тепла в критические моменты. Устранение подобного дисбаланса – первоочередная задача, связанная как с экономической эффективностью хозяйств, так и с их устойчивым развитием.

Особый интерес к системам теплонакопления вызван еще и тем, что в ряде регионов агротехнические работы сопровождаются значительными температурными перепадами. В таких условиях необходима гибкая система управления теплом, которая позволяла бы сохранять избыточную тепловую энергию в период ее активной генерации и расходовать накопленный ресурс в моменты дефицита. Кроме того, подобная практика содействует уменьшению зависимости от нестабильных внешних поставок топлива и способствует повышению энергоавтономности сельскохозяйственных предприятий.

Состояние исследований и актуальность проблемы. Научный интерес к возможностям аккумулирования тепловой энергии в агропромышленном комплексе растет уже не первое десятилетие, однако в последние годы тема приобрела особую актуальность. В доступной научно-технической литературе прослеживается расширение спектра методов теплосбережения и накопления энергии, начиная от традиционных емкостных резервуаров и заканчивая инновационными материалами, работающими на фазовых переходах. Фундаментальные и прикладные исследования ведутся в различных организациях, включая университеты, научные институты и крупные сельскохозяйственные холдинги, что указывает на комплексный подход к решению данной задачи.

Несмотря на многочисленные проекты и попытки внедрения подобных технологий, существует ряд серьезных препятствий. Во-первых, экономический аспект часто выходит на первый план: высокие первоначальные вложения в оборудование и инфраструктуру могут

выглядеть непривлекательно для агропредприятий, особенно в условиях нестабильных рынков сбыта. Во-вторых, технологическая сложность систем накопления тепла требует квалифицированного обслуживания и, как правило, более высокого уровня компетенции персонала. Это влечет дополнительные расходы и может затруднять масштабирование инноваций.

Тем не менее общий вектор развития агропромышленной отрасли направлен на повышение энергоэффективности и экологической устойчивости. Накопление тепла способно стать одним из ключевых инструментов в стратегии ресурсосбережения, позволяя гибко реагировать на колебания потребностей в разных фазах производственного цикла. К тому же, подобные решения отвечают глобальным тенденциям по снижению углеродного следа, что особенно важно для компаний, стремящихся сохранять конкурентоспособность на международных рынках.

Последние исследования подчеркивают важность интеграции систем теплонакопления с другими элементами энергообеспечения, включая возобновляемые источники. Такой подход открывает возможность комплексного проектирования энергетического цикла: избыточная энергия солнца или биомассы может быть аккумулирована для последующего использования. Подобные инициативы уже практикуются в ряде стран, что подтверждает растущий интерес к технологии со стороны бизнеса и государства.

Таким образом, актуальность внедрения систем для сохранения тепловой энергии в агропромышленном производстве обусловлена сочетанием экономических, технологических и экологических факторов. Постоянный рост стоимости энергоресурсов, стремление к устойчивому развитию и необходимость повышения конкурентоспособности на внутреннем и внешних рынках формируют спрос на эффективные решения

для аккумуляции тепла. Научное сообщество, в свою очередь, продолжает интенсивно работать над совершенствованием подобных систем, стремясь повысить их надежность, экономическую целесообразность и удобство эксплуатации.

В работе [1] представлена оригинальная конструкция теплового накопителя энергии, ориентированная на повышение эффективности использования тепла в аграрных процессах. Актуальной научно-практической задачей при этом является установление закономерностей изменения коэффициента теплопроводности рабочей смеси под воздействием различных температурных режимов.

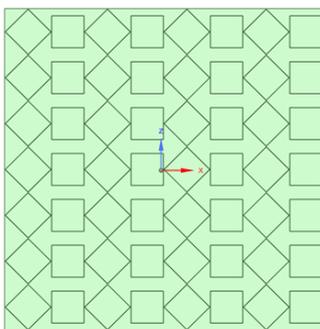


Рисунок 1 – Упорядоченное расположение частиц

Цель исследований. Целью данной работы является численное исследование теплообмена в модели теплового накопителя энергии.

Материалы и методы исследований. Компьютерные эксперименты были проведены в среде ANSYS Fluent, предоставляющей широкие возможности для детального изучения механизмов теплопереноса. На этапе выбора алгоритма моделирования рассматривались разные подходы к решению уравнений переноса излучения: P1, DO, DTRM, а также вероятностный метод Монте-Карло. В конечном итоге именно метод Монте-Карло был принят за основу, поскольку он предоставляет гибкий инструмент для учета специфики пространственного распределения тепла и геометрических особенностей исследуемого объекта.

В рамках расчетов на одной из граничных поверхностей задана плотность теплового потока $q_{\text{гр}}$, изменяющаяся в диапазоне от 1000 до 150000 Вт/м². Противоположная граница моделировала среду с постоянной температурой 25 °С, что обеспечивало отвод лишнего тепла. Остальные стенки расчетной области были заданы как симметричные, исключая неконтролируемые потери тепла через эти поверхности и упрощая вычислительную постановку задачи (рис. 1).

Для более глубокого анализа физических процессов было разработано три структурированных варианта расчетных моделей, отличающихся характером расположения твердых частиц внутри исследуемой смеси. Все варианты предполагали равномерную укладку элементов, но с различными геометрическими схемами, чтобы выявить влияние конфигурации системы на результат.

Результаты исследований. Проведенные численные эксперименты подтвердили ключевую роль температурного фактора в формировании эффективного коэффициента теплопроводности исследуемой смеси. По мере роста температуры на входе расчетной области все три варианта структуры (1 – чередование «квадрат-ромб», 2 – последовательные «квадраты», 3 – цепочка «ромбов») продемонстрировали примерно схожую тенденцию – плавное увеличение λ от начальных значений (около 0,05 Вт/(м·°С)) до максимальных (порядка 0,7 Вт/(м·°С)) при достижении температурного уровня около 1200 °С.

Однако, при детальном сравнении можно заметить, что вариант 1 (чередование «квадрат-ромб») дает несколько более высокие значения λ на начальной стадии нагрева, в то время как конфигурации 2 (только «квадраты») и 3 (только «ромбы») в среднем выше выходят на максимальные показатели ближе к верхнему пределу температур. Такая динамика может свидетельствовать о более эффективном теплообмене на ранних этапах для систем с комбинированными элементами, но при этом

монолитные структуры на высоких температурах превосходят смешанные формы с точки зрения общей теплопроводности.

В количественном отношении, при повышении температуры на входе расчетной области от 0 до 1200 °С коэффициент теплопроводности во всех случаях возрастает более чем в десять раз. Для варианта 1 наименее резкий скачок λ наблюдается в диапазоне 200–600 °С, что может быть связано с влиянием геометрического чередования на тепловые потоки. Варианты 2 и 3 демонстрируют наиболее активный рост λ после 600 °С, достигая максимума на уровне, сопоставимом с результатами смешанных структур, но несколько опережая их по итоговым значениям.

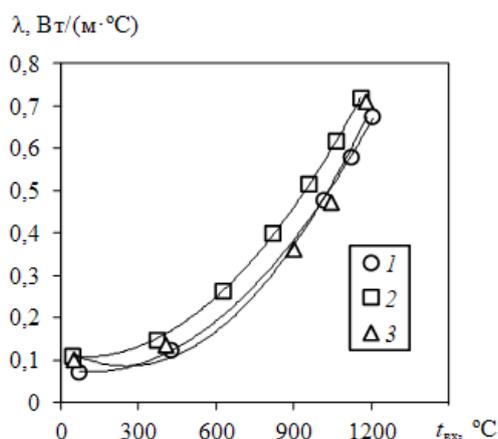


Рисунок 2 – Зависимость эффективного коэффициента теплопроводности смеси от температуры на входе: 1 – вход в расчетную область со стороны чередующихся форм «квадрат-ромб»; 2 – вход в расчетную область со стороны «квадратов»; 3 – вход в расчетную область со стороны «ромбов»

Таким образом, все три схемы расположения частиц показывают схожее поведение с точки зрения увеличения теплопроводности при росте температуры, хотя и с различными нюансами в отдельных диапазонах. Полученные результаты являются важным вкладом в оптимизацию конструкций тепловых накопителей и позволяют дифференцированно подходить к проектированию систем, исходя из конкретных целей, условий эксплуатации и требуемого диапазона рабочих температур.

Выводы. 1. Во всех трех вариантах структур (чередование «квадрат-ромб», монолитные «квадраты» и «ромбы») отмечен выраженный рост эффективного коэффициента теплопроводности с увеличением температуры на входе, что указывает на важность корректного выбора рабочих температур при проектировании тепловых накопителей. 2. По результатам численного моделирования установлено, что при увеличении температуры на входе расчетной области от 0 до 1200 °С эффективный коэффициент теплопроводности исследуемой смеси возрастает более чем в 10 раз: с исходного уровня 0,05 Вт/(м·°С) до 0,7 Вт/(м·°С).

Работа выполнена за счет гранта Академии наук Республики Татарстан, предоставленного молодым кандидатам наук (постдокторантам) с целью защиты докторской диссертации, выполнения научно-исследовательских работ, а также выполнения трудовых функций в научных и образовательных организациях Республики Татарстан в рамках Государственной программы Республики Татарстан «Научно-технологическое развитие Республики Татарстан»

Библиографический список

1. Алгоритм расчета многослойной системы теплоизоляции теплового накопителя энергии с высокотемпературным рабочим телом / А. Н. Чадаев, А. В. Дмитриев, В. Э. Зинуров [и др.] // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2024. – Т. 26, № 6. – С. 166-179.

References

1. Algoritm rascheta mnogoslojnoj sistemy teploizoljicii teplovogo nakopitelja jenergii s vysokotemperaturnym rabochim telom / A. N. Chadaev, A. V. Dmitriev, V. Je. Zinurov [i dr.] // Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Problemy jenergetiki. – 2024. – T. 26, № 6. – S. 166-179.