

УДК 62-65

UDC 62-65

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 ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В НАКОПИТЕЛЕ ЭНЕРГИИ С ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫМ РАБОЧИМ ТЕЛОМ**

### **NUMERICAL MODELING OF HEAT TRANSFER IN A HIGH-TEMPERATURE ENERGY STORAGE SYSTEM**

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*

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*

Разработка эффективных тепловых накопителей энергии с высокотемпературным рабочим телом является актуальной задачей в условиях роста потребности в энергоэффективных технологиях, особенно в агропромышленном комплексе. В данной работе проведено численное моделирование процессов теплопередачи в расчетной области, содержащей дисперсные графитовые частицы, с использованием программного комплекса ANSYS Fluent. Для моделирования лучистого теплообмена применена модель Monte Carlo, которая обеспечивает наивысшую точность при расчетах с высокими температурными градиентами и сложной структурой среды. Установлено, что температурный градиент в области неравномерный: внутри графитовых частиц температура выше, чем в газовых промежутках, что связано с высокой теплопроводностью графита и низкой теплопроводностью газа. Эффективный коэффициент теплопроводности смеси изменяется от 0,23 до 1,19 Вт/(м·°C) при увеличении температуры на входе от 106 до 1615 °C. Аналогичный рост наблюдается при увеличении плотности теплового потока до 150000 Вт/м<sup>2</sup>, что подтверждает значимость радиационного теплообмена в высокотемпературных системах. Полученные результаты позволяют сделать вывод о важности учета сложных механизмов теплопередачи, таких как радиационный теплообмен, для повышения эффективности тепловых накопителей с дисперсной средой. Исследование может служить основой для

The development of efficient thermal energy storage systems with high-temperature working media is a pressing challenge in the context of increasing demand for energy-efficient technologies, particularly in the agro-industrial sector. This study presents numerical modeling of heat transfer processes in a computational domain containing dispersed graphite particles using the ANSYS Fluent software package. The Monte Carlo model was applied for radiation heat transfer simulation, providing the highest accuracy for calculations with high-temperature gradients and complex medium structures. It was found that the temperature gradient within the domain is uneven: the temperature inside the graphite particles is higher compared to the gas-filled gaps, which is attributed to the high thermal conductivity of graphite and the low thermal conductivity of the gas. The effective thermal conductivity of the mixture increases from 0.23 to 1.19 W/(m·°C) as the inlet temperature rises from 106 to 1615 °C. A similar growth trend was observed with increasing heat flux density up to 150,000 W/m<sup>2</sup>, confirming the significance of radiation heat transfer in high-temperature systems. The results highlight the importance of accounting for complex heat transfer mechanisms, such as radiation heat transfer, to enhance the efficiency of thermal storage systems with dispersed media. This research provides a foundation for the development and optimization of thermal energy storage systems used in agro-industrial applications and other industries requiring reliable energy accumulation

разработки и оптимизации тепловых накопителей, применяемых в агропромышленности и других отраслях, где требуется надежное аккумулирование энергии

Ключевые слова: ТЕПЛОВОЙ НАКОПИТЕЛЬ, ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЕ РАБОЧЕЕ ТЕЛО, ГРАФИТОВЫЕ ЧАСТИЦЫ, ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЛУЧИСТЫЙ ТЕПЛООБМЕН, КОЭФФИЦИЕНТ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ, MONTE CARLO, ANSYS FLUENT

Keywords: THERMAL ENERGY STORAGE, HIGH-TEMPERATURE WORKING MEDIUM, GRAPHITE PARTICLES, NUMERICAL MODELING, RADIATION HEAT TRANSFER, THERMAL CONDUCTIVITY, MONTE CARLO, ANSYS FLUENT

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-205-010>

**Введение.** Эффективное использование высокотемпературных рабочих тел в тепловых накопителях энергии играет ключевую роль в контексте развития энергоэффективных технологий. Современные потребности в аккумулировании тепловой энергии обусловлены возрастающей долей возобновляемых источников энергии, таких как солнечная и ветровая, которые характеризуются нестабильностью выработки. Для обеспечения надежности энергоснабжения требуется разработка технологий, способных сохранять энергию в периоды ее избытка и возвращать ее в периоды дефицита. В этом аспекте тепловые накопители, использующие рабочие тела с высокой температурной стойкостью, такие как графит, являются перспективным направлением исследований.

Важным аспектом разработки тепловых накопителей является изучение процессов теплопередачи, включающих теплопроводность, конвекцию и излучение. Взаимодействие этих механизмов в высокотемпературных условиях оказывает значительное влияние на эффективность аккумулирования энергии. Тепловое излучение, будучи доминирующим процессом при высоких температурах, требует детального анализа и моделирования. Использование численных методов, таких как метод Монте-Карло, позволяет учесть сложные геометрии расчетной

<http://ej.kubagro.ru/2025/01/pdf/10.pdf>

области, взаимодействие теплового излучения с дисперсными частицами и особенности рабочих сред.

Особое внимание в современных исследованиях уделяется системам, в которых теплопередача осуществляется через дисперсные среды. Такие среды, представленные, например, графитовыми частицами, обладают уникальными тепловыми характеристиками, которые зависят от их структуры, плотности упаковки и температурного градиента. Моделирование процессов позволяет не только определить основные параметры системы, но и провести их оптимизацию для повышения эффективности теплового накопления.

Разработка математических моделей и численных методов расчета позволяет получить новые знания о поведении тепловых накопителей в экстремальных условиях эксплуатации, что способствует созданию более энергоэффективных и надежных решений для сельскохозяйственного комплекса и промышленности.

**Состояние исследований и актуальность проблемы.** В последние годы исследования в области тепловых накопителей энергии приобрели значительное развитие, что связано с необходимостью интеграции возобновляемых источников энергии в существующую энергосистему. Основное внимание в таких работах уделяется изучению материалов для накопления тепла, таких как расплавленные соли, керамика и графит. При этом высокая температура рабочего тела требует учета лучистого теплообмена, который доминирует над другими механизмами теплопередачи при значительных температурных градиентах.

Различные подходы к моделированию теплопередачи с использованием численных методов, таких как P1, DO, DTRM и метод Монте-Карло, позволяют учитывать специфические особенности физических процессов. Например, метод Монте-Карло демонстрирует наивысшую точность в задачах с высокими температурными градиентами

и сложной геометрией расчетной области. Он активно используется в задачах астрофизики, ядерной энергетики и высокотемпературной термодинамики. Однако его применение для анализа дисперсных сред в тепловых накопителях все еще требует дополнительных исследований.

Особую актуальность приобретают работы, посвященные анализу взаимодействия теплового излучения с дисперсными средами. Графит, обладая высокой теплопроводностью и температурной стойкостью, представляет собой перспективный материал для использования в качестве рабочего тела [1]. Исследования показывают, что эффективный коэффициент теплопроводности таких систем зависит от структуры и размеров частиц, что определяет необходимость численного моделирования для оценки этих параметров.

В контексте сельского хозяйства тепловые накопители с высокотемпературными рабочими телами могут быть использованы для обогрева теплиц, сушки продукции и других задач, требующих стабильного энергоснабжения. Исследования в этой области способствуют решению проблемы энергоэффективности, повышая рентабельность сельскохозяйственных объектов.

**Цель исследований.** Целью данной работы является численное моделирование процессов теплопередачи в тепловом накопителе с высокотемпературным рабочим телом.

**Материалы и методы исследований.** Для изучения процесса теплопередачи в расчетной области использовался программный комплекс ANSYS Fluent, который обеспечивает моделирование сложных тепловых процессов с учетом лучистого теплообмена. Среди множества моделей, реализованных в ANSYS Fluent, основное внимание было уделено выбору наиболее подходящей для задач с высокими температурными градиентами и сложной структурой среды.

Модель Monte Carlo была выбрана для расчетов, так как она обеспечивает наивысшую точность за счет отслеживания траекторий фотонов в задачах любой оптической толщины. Это позволяет учитывать взаимодействие теплового излучения с дисперсными частицами графита, расположенными в хаотическом порядке, что критично для изучения сложных тепловых процессов. Monte Carlo метод обеспечивает высокую детализацию, учитывая поглощение, рассеяние и переизлучение энергии, а также позволяет корректно моделировать тепловое излучение в системах с высокими температурными градиентами и сложной геометрией расчетной области.

В расчетной модели частицы графита случайным образом размещались в ограниченном объеме, имитируя дисперсную среду. Моделировался процесс передачи тепловой энергии от нагретой стенки к стенке, имеющей температуру окружающей среды. Это позволило проанализировать температурное распределение и эффективность теплопередачи в условиях преобладания лучистого теплообмена.

**Результаты исследований.** В результате численного моделирования была изучена теплопередача в расчетной области, заполненной дисперсными графитовыми частицами, расположенными в хаотическом порядке. Графитовые частицы, благодаря их высокой температурной стойкости и теплопроводности, обеспечивали значительное влияние на распределение температуры в расчетной области.

На рисунке 1 представлено распределение температуры. Температура плавно снижается от нагретой стенки (слева), на котором задавался удельный тепловой поток равный  $100000 \text{ Вт/м}^2$  к стенке (справа), на которой задавалась температура окружающей среды и условия естественной конвекции. В области, заполненной графитовыми частицами, температурный градиент проявляется неравномерно: внутри самих частиц температура выше за счет высокой теплопроводности графита, в то время

как в промежутках между частицами, заполненных газовой средой, наблюдается снижение температурного градиента из-за низкой теплопроводности газа.

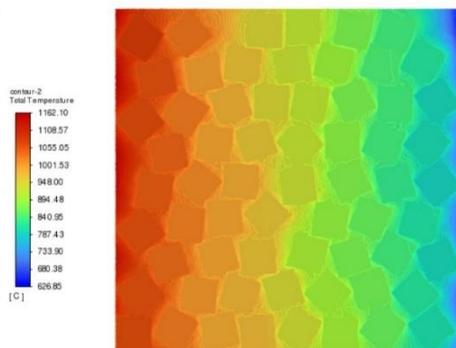


Рисунок 1 – Распределение температуры в расчетной области при заданном удельном тепловом потоке  $100000 \text{ Вт/м}^2$

На рисунке 2 представлена зависимость эффективного коэффициента теплопроводности смеси от температуры на входе в расчетную область и плотности теплового потока.

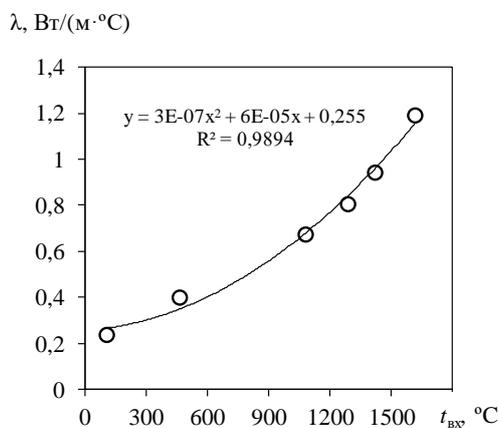


Рисунок 2 – Зависимость эффективного коэффициента теплопроводности смеси от температуры на входе

На ней продемонстрирован рост эффективного коэффициента теплопроводности с увеличением температуры на входе. Это связано с тем, что при повышении температуры теплопроводность графита возрастает, а также усиливается взаимодействие теплового излучения между частицами

в расчетной области. Получено, что эффективный коэффициент теплопроводности смеси изменяется от 0,23 до 1,19 при изменении температуры на входе в расчетную область от 106 до 1615 °С (рис. 2).

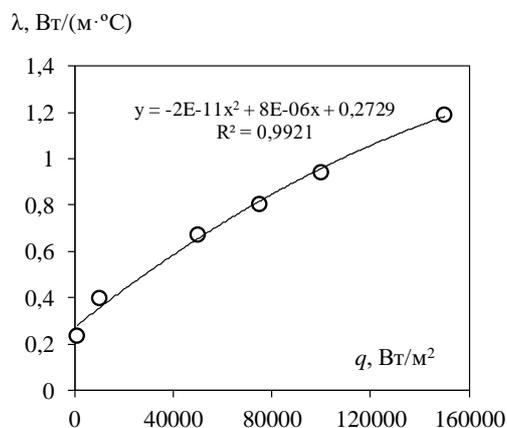


Рисунок 3 – Зависимость эффективного коэффициента теплопроводности смеси от от плотности теплового потока

На рисунке 3 показана зависимость эффективного коэффициента теплопроводности от плотности теплового потока. При плотности потока 1000 Вт/м<sup>2</sup> значение эффективного коэффициента теплопроводности составляет 0,23 Вт/(м·°С). С увеличением плотности теплового потока до 150000 Вт/м<sup>2</sup> эффективный коэффициент теплопроводности достигает максимального значения 1,19 Вт/(м·°С). Наибольший прирост коэффициента наблюдается при  $q < 80000$  Вт/м<sup>2</sup>, после чего темп увеличения замедляется, что свидетельствует о насыщении радиационного взаимодействия при высоких значениях теплового потока.

Таким образом, проведенное исследование позволило установить основные закономерности теплопередачи в дисперсной среде, заполненной графитовыми частицами, при высоких температурах. Выявлено, что эффективность теплопередачи зависит как от свойств материала частиц, так и от условий теплового воздействия, включая температуру на входе и плотность теплового потока. Численные эксперименты подтвердили важность учета радиационного теплообмена, который в сочетании с

высокой теплопроводностью графита обеспечивает значительное улучшение тепловых характеристик системы.

**Выводы.** 1. в расчетной области, заполненной дисперсными графитовыми частицами, теплопередача имеет сложный характер, обусловленный сочетанием теплопроводности и радиационного теплообмена. Температурный градиент между нагретой и охлаждаемой стенками распределяется неравномерно: температура внутри графитовых частиц выше за счет их высокой теплопроводности, в то время как в газовых промежутках градиент температуры ниже из-за низкой теплопроводности газа. 2. Эффективный коэффициент теплопроводности смеси значительно зависит от температуры на входе и плотности теплового потока. При изменении температуры на входе от 106 до 1615 °С эффективный коэффициент теплопроводности увеличивается от 0,23 до 1,19 Вт/(м·°С), что связано с ростом теплопроводности графита и усилением теплового излучения между частицами.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-20061, <https://rscf.ru/project/24-29-20061/>.

#### Библиографический список

1. Зинуров, В. Э. Использование теплового накопителя энергии для обогрева теплиц с использованием солнечных панелей / В. Э. Зинуров, А. Н. Чадаев, К. И. Разакова // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2024. – № 201. – С. 90-97.

#### References

1. Zinurov, V. Je. Ispol'zovanie teplovogo nakopitelja jenergii dlja obogreva teplic s ispol'zovaniem solnechnyh panelej / V. Je. Zinurov, A. N. Chadaev, K. I. Razakova // Politematicheskij setevoj jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2024. – № 201. – S. 90-97.