

УДК 62-405.6

UDC 62-405.6

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)

ОЦЕНКА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОАККУМУЛЯТОРА ИЗ ГРАФИТА ДЛЯ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

EVALUATION OF THERMOPHYSICAL PARAMETERS OF A GRAPHITE THERMAL ENERGY STORAGE SYSTEM FOR THE AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX

Шарипов Ильнар Ильдарович
Канд. техн. наук
SPIN – код автора: 8046-8265
Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

Sharipov Ilnar Ildarovich
Cand.Tech.Sci.
RSCI SPIN-code: 8046-8265
Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Шамсутдинова Камилла Эдуардовна
Студент
Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

Shamsutdinova Kamilla Eduardovna
Student
Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Эффективное накопление и сохранение тепловой энергии становится всё более актуальной задачей в условиях развития энергоэффективных технологий и растущей потребности в устойчивых решениях для агропромышленного комплекса. Высокотемпературные тепловые накопители предоставляют значительные преимущества, снижая потери энергии и зависимость от внешних источников, что способствует повышению эффективности и экономичности сельскохозяйственных процессов. В данном исследовании рассматривается тепловой накопитель, использующий смесь порошкообразного графита и инертного газа аргона в качестве теплоаккумулирующей среды. Цель работы заключается в изучении теплофизических свойств этой смеси, включая теплопроводность, теплоёмкость и коэффициент теплового расширения, при различных температурах и соотношениях графита. Для аппроксимации температурной зависимости теплопроводности графита применялся метод линейной интерполяции, что позволило учесть её плавное снижение с ростом температуры. Коэффициент теплового расширения смеси определялся как взвешенная сумма коэффициентов её компонентов, принимая во внимание температурные зависимости каждого из них. Результаты исследования показали, что увеличение доли графита в смеси существенно повышает её теплопроводность. Например, при 20 °C теплопроводность варьируется от 108,65 Вт/(м·°C) для смеси с содержанием графита 50% до 189,24 Вт/(м·°C) при содержании графита 95%. Теплоёмкость и коэффициент теплового

The effective accumulation and storage of thermal energy are becoming increasingly relevant due to the rapid development of energy-efficient technologies and the rising demand for sustainable solutions in the agro-industrial sector. High-temperature thermal energy storage systems offer significant advantages by reducing energy losses and dependency on external sources, thus enhancing the efficiency and cost-effectiveness of agricultural processes. This study focuses on a thermal energy storage system utilizing a graphite powder mixture as the primary heat-accumulating medium. The research aims to investigate the thermophysical properties of this mixture, including thermal conductivity, specific heat capacity, and thermal expansion coefficient, across varying temperatures and graphite proportions. A linear interpolation method was employed to approximate the temperature dependence of graphite's thermal conductivity, ensuring accurate representation of its gradual decrease with increasing temperature. Similarly, the mixture's thermal expansion coefficient was derived as a weighted sum of the individual components' coefficients, considering their respective temperature dependencies. Results demonstrated that increasing the graphite content significantly enhances the mixture's thermal conductivity. For instance, at 20°C, the thermal conductivity ranged from 108.65 W/(m·°C) for a 50% graphite mixture to 189.24 W/(m·°C) for a 95% graphite mixture. The specific heat capacity and thermal expansion coefficient showed temperature-dependent behavior, with higher graphite proportions leading to improved thermal properties. These findings provide a scientific basis for designing high-efficiency thermal energy storage systems for agricultural applications, particularly in

расширения демонстрируют температурную зависимость, причём повышение доли графита способствует улучшению тепловых характеристик смеси

high-temperature environments such as greenhouse heating systems powered by solar panels

Ключевые слова: ТЕПЛОВОЙ НАКОПИТЕЛЬ, ПОРОШОК ГРАФИТА, ТЕРМОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА, ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ, ТЕПЛОЁМКОСТЬ, ТЕПЛОВОЕ РАСШИРЕНИЕ, АГРОПРОМЫШЛЕННОСТЬ, ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ

Keywords: THERMAL ENERGY STORAGE, GRAPHITE POWDER, THERMOPHYSICAL PROPERTIES, THERMAL CONDUCTIVITY, SPECIFIC HEAT CAPACITY, THERMAL EXPANSION, AGRO-INDUSTRIAL APPLICATIONS, ENERGY EFFICIENCY

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-205-029>

Введение. Проблемы эффективного накопления и сохранения тепловой энергии приобретают всё большую актуальность в связи с развитием энергоэффективных технологий и увеличением потребности в устойчивых решениях для агропромышленного комплекса. В современных условиях важно разрабатывать системы, которые способны обеспечивать стабильное функционирование сельскохозяйственных объектов, снижая зависимость от внешних источников энергии и минимизируя потери тепла. Использование высокотемпературных рабочих тел открывает новые перспективы в области создания инновационных тепловых накопителей, позволяя увеличить эффективность процессов и снизить эксплуатационные издержки.

Одной из ключевых задач является изучение тепловых свойств материалов, используемых в таких накопителях. Особый интерес представляет графит, обладающий уникальными теплофизическими характеристиками, такими как высокая теплопроводность и устойчивость к экстремальным температурам. Исследование его поведения в смеси с инертными газами позволяет не только оптимизировать процессы теплопередачи, но и рассчитать параметры, влияющие на долговечность и надёжность системы. Таким образом, вопросы анализа и математического моделирования характеристик тепловых накопителей с использованием графита становятся центральными в поиске эффективных решений для агропромышленного комплекса.

<http://ej.kubagro.ru/2025/01/pdf/29.pdf>

Особую роль в создании эффективных тепловых накопителей играют материалы, которые используются в их конструкции. Графит благодаря своим уникальным термофизическим свойствам, таким как высокая теплопроводность, химическая инертность и устойчивость к высоким температурам, становится перспективным материалом для таких систем. Исследование его поведения в смеси с инертными газами, например аргоном, позволяет улучшить характеристики теплового накопителя и обеспечить его надёжность при эксплуатации.

Таким образом, актуальность исследования тепловых свойств графита и его смесей с инертными газами продиктована необходимостью создания современных, экологически безопасных и экономически эффективных систем накопления энергии.

Состояние исследований и актуальность проблемы. Научные исследования в области тепловой энергии направлены на поиск эффективных решений для её аккумулирования и последующего использования. В последние годы ведётся активная работа над разработкой материалов, способных выдерживать высокие температуры и сохранять стабильность своих физических характеристик.

Ряд исследований демонстрирует, что комбинирование графита с инертными газами, такими как аргон, позволяет существенно повысить теплофизические свойства смесей. Такие системы обеспечивают не только высокий коэффициент теплопередачи, но и стабильность при значительных температурных перепадах, что особенно важно для условий агропромышленного производства. Однако остаются нерешённые вопросы, связанные с влиянием доли графита в смеси на её теплофизические параметры, такие как теплопроводность, теплоёмкость и коэффициент теплового расширения. Также требует уточнения влияние температуры на данные характеристики, что имеет решающее значение для моделирования и оптимизации процессов аккумулирования тепла.

Создание тепловых накопителей, работающих при высоких температурах, способствует снижению потребления традиционных энергоносителей и повышению автономности агропромышленных объектов.

Разработка высокотемпературных тепловых накопителей особенно важна в контексте перехода к энергоэффективным технологиям в агропромышленном комплексе. Использование таких систем позволяет не только сократить энергозатраты, но и снизить углеродный след, что отвечает современным требованиям устойчивого развития. Кроме того, это создаёт возможности для внедрения автономных систем, способных функционировать в удалённых регионах с ограниченными ресурсами.

В работе [1] представлена модель теплового накопителя энергии, который может быть использован для обогрева тепличного хозяйства. В качестве теплоаккумулирующей среды выступает графитовый порошок. Актуальной задачей является поиск зависимостей коэффициента теплопроводности, теплоемкости и коэффициента теплового расширения графитовой смеси.

Цель исследований. Целью данного исследования является изучение теплофизических параметров теплового накопителя на основе графита и аргона, включая теплопроводность, теплоёмкость и коэффициент теплового расширения, при различных температурах и долях графита в смеси.

Материалы и методы исследований. Для оценки теплофизических характеристик смеси использовались аналитические методы расчёта, основанные на известных теплофизических свойствах её компонентов – порошкообразного графита и инертного газа аргона. Смесь рассматривалась как модельная система, где каждый компонент вносит свой вклад в общие параметры.

Температурная зависимость теплопроводности графита была аппроксимирована методом линейной интерполяции, что позволило учитывать плавное снижение теплопроводности материала при увеличении температуры. Этот подход был выбран благодаря его простоте и возможности точного описания экспериментально наблюдаемых изменений. Общий коэффициент теплового расширения смеси рассчитывался на основе взвешенной суммы коэффициентов теплового расширения графита и аргона.

Результаты исследований. Теплопроводность смеси рассчитывалась на основе модели эффективной среды:

$$\lambda_{\text{см}}(T) = \varphi \lambda_{\text{г}}(T) + (1 - \varphi) \lambda_{\text{арг}}, \quad (1)$$

где φ – объемная доля графита; $\lambda_{\text{г}}(T)$ – теплопроводность графита от температуры, Вт/(м·К); $\lambda_{\text{аргон}}$ – теплопроводность аргона (принималась 0,0177 Вт/(м·К) при температуре 20 °С).

Стоит отметить, что теплопроводность аргона принималась равной постоянному значению, т. к. это значение практически не изменяется в диапазоне температур от 20 до 2500 °С.

В ходе расчетов рассматривались различные объемные доли графита $\varphi = 0,5, 0,75, 0,85$ и $0,95$ и температура от 20 до 2500 °С.

Температурная зависимость теплопроводности графита аппроксимировалась линейной интерполяцией

$$\lambda_{\text{г}}(T) = 200 - 0,04016T. \quad (2)$$

Как видно, для различных значений объемной доли графита φ теплопроводность смеси уменьшается с ростом температуры, однако скорость снижения зависит от объёмной доли графита.

Для $\varphi = 0,5$:

$$\lambda_{\text{см}}(T) = 100 - 0,02016T + 0,00885. \quad (3)$$

Для $\varphi = 0,75$:

$$\lambda_{\text{см}}(T) = 150 - 0,03012T + 0,004425. \quad (4)$$

Для $\varphi = 0,85$:

$$\lambda_{\text{см}}(T) = 170 - 0,03416T + 0,002655. \quad (5)$$

Для $\varphi = 0,95$:

$$\lambda_{\text{см}}(T) = 190 - 0,038152T + 0,000885. \quad (6)$$

С увеличением температуры теплопроводность смеси снижается, что связано с уменьшением теплопроводности графита из-за рассеяния фононов.

Увеличение объемной доли графита φ существенно повышает теплопроводность смеси. При $\varphi = 0,5$ теплопроводность смеси изменяется от 108,65 ($T = 20$ °C) до 63,37 Вт/(м·°C) ($T = 2500$ °C). При $\varphi = 0,95$ теплопроводность смеси варьируется от 189,24 (при $T = 20$ °C) до 95,28 Вт/(м·°C) (при $T = 2500$ °C).

Массовая теплоемкость смеси $C_{\text{см}}(T)$ определялась по выражению:

$$C_{\text{см}}(T) = \frac{x}{\mu_{\text{гр}}} C_{\text{гр}}(T) + \frac{(1-x)}{\mu_{\text{арг}}} C_{\text{арг}}, \quad (7)$$

Зависимость теплоемкости графита от температуры:

$$C_{\text{гр}}(T) = 25 + 0,00204(T - 20). \quad (8)$$

Для $x = 0,5$:

$$C_{\text{см}}(T) = 1041,75 + 0,085T. \quad (9)$$

Для $x = 0,75$:

$$C_{\text{см}}(T) = 1562,5 + 0,1275T. \quad (10)$$

Для $x = 0,85$:

$$C_{\text{см}}(T) = 1770,75 + 0,1445T. \quad (11)$$

Для $x = 0,95$:

$$C_{\text{см}}(T) = 1979,25 + 0,1617T. \quad (12)$$

Таким образом, при $x = 0,5$ массовая теплоемкость изменяется от 1043,45 (при $T = 20$ °С) до 1253,75 Дж/(кг·°С) (при $T = 2500$ °С). При $x = 0,95$ массовая теплоемкость возрастает от 1982,48 до 2383,5 Дж/(кг·°С).

Общий коэффициент теплового расширения может быть выражен через взвешенную сумму коэффициентов теплового расширения компонентов:

$$\alpha_{\text{см}} = \varphi \alpha_{\text{гр}}(T) + (1 - \varphi) \alpha_{\text{арг}}, \quad (13)$$

Для графита коэффициент теплового расширения увеличивается с ростом температуры. Зависимость можно аппроксимировать следующей формулой:

$$\alpha_{\text{гр}}(T) = \alpha_0 + kT, \quad (14)$$

где $\alpha_0 = 0,000045$ 1/К – начальный коэффициент теплового расширения при температуре 20 °С; $k = 2,5 \cdot 10^{-9}$ 1/К² – коэффициент роста с температурой.

Коэффициент теплового расширения аргона $\alpha_{\text{арг}}$:

$$\alpha_{\text{арг}}(T) = \frac{1}{T}. \quad (15)$$

Подставив выражения (14) и (15) в (13) получим:

$$\alpha_{\text{см}} = \varphi(\alpha_0 + kT) + (1 - \varphi) \frac{1}{T}, \quad (16)$$

Увеличение объемной доли графита снижает общий коэффициент теплового расширения смеси. При $\varphi = 0,5$ коэффициент теплового расширения $\alpha_{\text{см}}$ уменьшается от $1,71 \cdot 10^{-3}$ 1/К (при $T = 20$ °С) до $0,18 \cdot 10^{-3}$ 1/К (при $T = 2500$ °С). При $\varphi = 0,95$ коэффициент теплового расширения $\alpha_{\text{см}}$ изменяется от $0,18 \cdot 10^{-3}$ 1/К (при $T = 20$ °С) до $0,018 \cdot 10^{-3}$ 1/К (при $T = 20$ °С).

Таким образом, проведённые исследования подтвердили, что смеси графита с аргоном обладают высокими теплофизическими характеристиками, позволяющими эффективно использовать их в высокотемпературных тепловых накопителях. Увеличение доли графита в смеси значительно повышает теплопроводность и теплоёмкость, что

делает такие материалы перспективными для применения в условиях агропромышленного комплекса. При этом снижение коэффициента теплового расширения с ростом доли графита обеспечивает стабильность и механическую надёжность системы при воздействии термических нагрузок. Полученные данные могут быть использованы для дальнейшего моделирования и проектирования тепловых накопителей, оптимизированных под конкретные эксплуатационные условия.

Выводы. 1. Проведённый анализ показал, что увеличение доли графита в смеси с аргоном значительно улучшает теплопроводность системы, особенно при низких температурах. 2. Температурная зависимость теплоёмкости смеси свидетельствует о росте её значений с увеличением температуры и доли графита, что указывает на возможность оптимизации тепловых накопителей для высокотемпературных процессов. 3. Коэффициент теплового расширения смеси снижается с ростом доли графита, что повышает механическую устойчивость системы при экстремальных термических нагрузках.

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.