



АЛГОРИТМ РАСЧЕТА МНОГОСЛОЙНОЙ СИСТЕМЫ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ ТЕПЛООВОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ С ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫМ РАБОЧИМ ТЕЛОМ

Чадаев А.Н.¹, Дмитриев А.В.², Зинуров В.Э.², Мугинов А.М.², Павлов Г.И.³

¹Казанский национальный исследовательский технологический университет,
г. Казань, Россия

²Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

³Казанский национальный исследовательский технический университет,
г. Казань, Россия
vadd_93@mail.ru

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ.* Управление избытком и дефицитом выработки электрической энергии, способствующее стабилизации энергетической системы и повышению ее надежности, является актуальной задачей. Одним из решений является разработка и внедрение тепловых накопителей энергии в системы распределенной энергетики. Важной задачей при их разработке является создание эффективной системы теплоизоляции. **ЦЕЛЬ.** Разработка алгоритма для эффективного проектирования системы теплоизоляции тепловых накопителей энергии с высокотемпературным рабочим телом. **МЕТОДЫ.** Исследования проводятся с использованием теоретических методов, включая теплотехнический расчет слоев теплоизоляции и анализ теплопроводности. Используются методы математического моделирования для определения толщины системы теплоизоляции теплового накопителя энергии. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Разработана конструкция теплового накопителя энергии. На основе разработанного алгоритма определено, что толщина системы теплоизоляции должна составлять 151 мм (толщина первого теплоизоляционного контура – 135 мм, толщина второго теплоизоляционного слоя из минеральной ваты – 16 мм), обеспечивая минимальные тепловые потери при температуре теплоаккумулятора равной 2000 °С. Выявлено, что в слоях, ближайших к графиту, преобладает лучистый тепловой поток, составляющий около 70% от общего потока. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Исследование подтвердило эффективность предложенной многослойной системы теплоизоляции для теплового накопителя энергии. Разработанный алгоритм позволяет проводить расчёт систем теплоизоляции теплового накопителя энергии, который учитывает различные параметры и условия эксплуатации.

Ключевые слова: тепловой накопитель энергии; система теплоизоляции; система распределенной энергетики; теплоаккумулятор; аккумулятор энергии.

Благодарности: работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-20061.

Для цитирования: Чадаев А.Н., Дмитриев А.В., Зинуров В.Э., Мугинов А.М., Павлов Г.И. Алгоритм расчета многослойной системы теплоизоляции теплового накопителя энергии с высокотемпературным рабочим телом // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т. 26. № 6. С. 166-179. doi: 10.30724/1998-9903-2024-26-6-166-179.

CALCULATION ALGORITHM FOR A MULTILAYER THERMAL INSULATION SYSTEM OF A THERMAL ENERGY STORAGE DEVICE WITH A HIGH-TEMPERATURE WORKING FLUID

Chadaev A.N.¹, Dmitriev A.V.², Zinurov V.E.², Muginov A.M.², Pavlov G.I.³

¹Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

²Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

³Kazan National Research Technical University, Kazan, Russia
vadd_93@mail.ru

Abstract: *RELEVANCE.* Managing the surplus and deficit of electric power generation, which contributes to the stabilization of the energy system and enhances its reliability, is a pressing issue. One of the solutions is the development and implementation of thermal energy storage systems within distributed energy systems. An important task in their development is creating an effective insulation system. *THE PURPOSE.* To develop an algorithm for the effective design of insulation systems for thermal energy storages with high-temperature working bodies. *METHODS.* The research is carried out using theoretical methods, including thermal engineering calculation of thermal insulation layers and thermal conductivity analysis. Mathematical modeling methods were used to determine the thickness of the thermal insulation system of a thermal energy storage device. *RESULTS.* The design of a thermal energy storage device has been developed. Based on the developed algorithm, it was determined that the thickness of the thermal insulation system should be 151 mm (the thickness of the first thermal insulation circuit is 135 mm, the thickness of the second thermal insulation layer made of mineral wool is 16 mm), ensuring minimal heat loss at a temperature of the heat accumulator equal to 2000 °C. It was revealed that the radiant heat flux prevails in the layers closest to graphite, accounting for about 70% of the total flux. *CONCLUSION.* The study confirmed the effectiveness of the proposed multi-layer insulation system for thermal energy storage. The developed algorithm allows for the calculation of insulation systems of thermal energy storage, taking into account various parameters and operating conditions.

Keywords: *thermal energy storage; Insulation system; distributed energy system; heat accumulator; energy storage.*

Acknowledgments: *the study was carried out with the financial support of the grant of the Russian Science Foundation No. 24-29-20061.*

For citation: Chadaev A.N., Dmitriev A.V., Zinurov V.E., Muginov A.M., Pavlov G.I. Calculation algorithm for a multilayer thermal insulation system of a thermal energy storage device with a high-temperature working fluid. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2024; 26 (6): 166-179. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-6-166-179.

Введение (Introduction)

В последнее десятилетие актуальным направлением в энергетической сфере является повышение эффективности использования электрической и тепловой энергий с сокращением углеродных выбросов. Одним из перспективных решений данной задачи является применение накопителей энергии, что позволит перейти к созданию устойчивых энергетических систем. Они представляют собой устройства, способные аккумулировать избыточную энергию и отдавать ее при возникновении потребности в ней, что является критически важным для балансировки сети и повышения ее эффективности [1-3].

Накопители энергии классифицируют по основным 4 группам: механические, электрохимические, электромагнитные и тепловые. Каждая из них имеет свои преимущества и ограничения, определяющие области их наиболее эффективного применения [4].

Механические накопители энергии, например, гидроаккумулирующие станции, характеризуются высокой мощностью и долговечностью, используют физические принципы накопления потенциальной или кинетической энергии. Они могут быть особенно полезны в масштабах, требующих значительного накопления мощности, но ограничены географическим расположением и требуют существенных начальных инвестиций [5].

Электрохимические накопители энергии, включая различные типы аккумуляторов, обеспечивают высокую плотность энергии и быстрый отклик на изменения в потреблении, что делает их идеальными для использования в качестве резервных источников питания и для сглаживания пиков нагрузки. Их главным недостатком является ограниченный срок службы и уменьшение емкости со временем, что требует регулярной замены и повторного использования или переработки отработанных элементов [6].

Электромагнитные накопители энергии, например, сверхпроводящие магнитные накопители и конденсаторы, представляют собой устройства, которые используют магнитное поле для хранения энергии в электрическом виде, обеспечивая практически мгновенный доступ к накопленной энергии. Они являются крайне актуальными при

потребности в высокой мощности в краткосрочном периоде времени, например, стабилизация частоты и качества электроэнергии в энергетических системах. Однако, электромагнитные накопители сталкиваются с рядом вызовов, включая высокую стоимость сверхпроводящих материалов и ограниченный срок службы конденсаторов [7].

Тепловые накопители энергии, использующие различные физические процессы для хранения тепла, представляют собой одно из наиболее перспективных направлений в контексте устойчивой энергетики. Эти устройства позволяют сохранять тепловую энергию, полученную от различных источников: мини-ТЭС, возобновляемыми источниками (солнечные коллекторы, панели, ветрогенераторы и др.) и использовать её для отопления, генерации электроэнергии в необходимый момент времени или других целей. Преимуществами тепловых накопителей являются их высокая эффективность, долговечность и способность к работе в широком диапазоне температур. Это способствует повышению эффективности энергосистемы в целом и уменьшению воздействия на окружающую среду [8]. Особое внимание уделяется выбору материалов для хранения тепловой энергии, поскольку от их свойств зависят наиболее важные характеристики системы: емкость, скорость заряда и разряда, стабильность работы в условиях высоких температур [9, 10].

Таким образом, тепловые накопители энергии играют важную роль в создании устойчивых и эффективных энергетических систем, способствуя интеграции возобновляемых источников энергии, сокращению углеродных выбросов и повышению энергетической безопасности.

В литературе представлено множество работ посвященных исследованию тепловых накопителей энергии, используемых в различных практических приложениях. Как отмечалось, одними из ключевых компонентов в тепловых накопителях энергии являются теплоаккумулятор, теплоноситель и система теплоизоляции, каждый из которых играет важную роль процесса хранения и передачи энергии. Теплоаккумулятор представляет собой материал или композит, способный накапливать тепловую энергию. В качестве таких материалов выступают органические соединения (парафины, жирные кислоты, этиленгликоль и др.), неорганические соединения (соли, гидраты солей, графит и др.), полимерные материалы. В исследовании [11] Pielichowska и Pielichowski рассматривали материалы с фазовым переходом, которые накапливают и отдают тепловую энергию путем изменения фазы, обеспечивая высокую плотность хранения при относительно небольшом перепаде температур. В работе [12] Асем и др. изучали материалы на основе графита и соли ($KNO_3/NaNO_3$) для теплового накопления при высоких температурах. Представлена методика изготовления таких композитов и анализируются их термические свойства. Опыты показали, что добавление графита значительно улучшает теплопроводность солей, что может быть полезно для систем теплового накопления, используемых, например, в солнечной энергетике. Badenhorst [13] рассматривал углеродные материалы, включая натуральный и синтетический графит, в качестве потенциальных компонентов для тепловых накопителей, используемых в солнечной тепловой энергетике. Углеродные материалы могут улучшить теплопроводность фазоизменяющих материалов, что критически важно для повышения эффективности систем теплового накопления.

Для передачи тепла к теплоаккумулятору используются различные теплоносители. В солнечных энергосистемах и большинстве промышленных применений обычно используется вода или масло из-за их высокой теплоемкости и теплопроводности. Однако в недавних исследованиях рассматриваются и альтернативные теплоносители [14, 15], такие как жидкие металлы, которые перемещаются с помощью магнитогидродинамического насоса (МГД), не имеющего движущих частей. В работе [16] Zhang и др. рассмотрели использование порошковых циркуляционных контуров для улучшения теплообмена в тепловых накопителях энергии.

Эффективная теплоизоляция может значительно повысить общую эффективность системы за счёт уменьшения потерь накопленной энергии. В последние годы значительное внимание уделяется разработке и применению аэрогелей для теплоизоляции в различных отраслях промышленности. В работе [17] Cuse и др. рассмотрено применение аэрогелей из диоксида кремния, которые известны высокими теплоизоляционными свойствами, но теряют их при температурах выше $600\text{ }^{\circ}\text{C}$. Современные разработки позволяют создавать аэрогели, способные выдерживать температуры свыше $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, что расширяет их потенциальные области применения. В статье [18] исследовано применение термостойких аэрогелей, которые могут функционировать при температурах выше $800\text{ }^{\circ}\text{C}$. Волокнистые материалы, такие как

оксидные волокна (базальтовые, кварцевые, кремнеземные), традиционно используются в промышленности, т. к. отличаются стойкостью к высоким температурам до 1000 °С. Однако для условий, требующих более высоких температур, используются волокна из более тугоплавких материалов, таких как оксид алюминия и муллит, которые выдерживают температуры до 1700 °С и выше. В статье [19] рассмотрено применение волокон оксида циркония, которые могут эксплуатироваться при температурах до 2200 °С. Кроме того, существуют различные керамические материалы с пористой структурой, которые также могут применяться для теплоизоляции в условиях высоких температур. Керамические материалы, такие как карбид кремния (SiC), нитрид кремния (Si₃N₄), оксид алюминия (Al₂O₃) и диоксид циркония (ZrO₂), могут использоваться в аккумуляторах теплоты благодаря их высокой температуре плавления [20].

Таким образом, разработка эффективных тепловых накопителей энергии требует комплексного подхода, включающего выбор подходящего теплоаккумулятора, теплоносителя и системы теплоизоляции. Учет всех этих составляющих является актуальной задачей для устойчивого развития в энергетической сфере, способствуя повышению энергетической эффективности и снижению углеродных выбросов.

Целью работы является разработка алгоритма для эффективного проектирования системы теплоизоляции теплового накопителя энергии с высокотемпературным рабочим телом.

Научная значимость исследования состоит в разработке алгоритма для расчёта многослойной системы теплоизоляции теплового накопителя энергии с высокотемпературным рабочим телом.

Практическая значимость исследования заключается в повышении эффективности и надёжности тепловых накопителей энергии, что способствует стабилизации энергетических систем и снижению эксплуатационных затрат.

Авторским коллективом был разработан накопитель тепловой энергии (рис. 1). В качестве теплоаккумулятора из твердого высокотемпературного рабочего тела 3 выступает графитовый порошок, т. к. он обладает высокой теплопроводностью, термической стабильностью (сохранение физических и химических свойств при высоких температурах, например, его плавление происходит при температуре около 3650 °С) и является относительно недорогим материалом. Передача или отвод тепловой энергии к графиту или от него осуществляется посредством жидкометаллического высокотемпературного теплоносителя, в качестве которого использовалось олово 1. Его выбор был обусловлен низкой температурой плавления, составляющей около 232 °С, высокой теплопроводностью, химической стабильностью и относительно невысокой стоимостью. В накопителе энергии олово 1 перекачивается через цилиндрический канал 2. В качестве которого был выбран вольфрам, т. к. он обладает высокой температурой плавления, составляющей около 3420 °С, прочностью и жесткостью при высоких температурах. По этой же причине графитовый порошок (теплоаккумулятор) 3 размещен в цилиндрической емкости 4, выполненной из вольфрама. Ввиду высоких рабочих температур, соответственно, и тепловых потерь, теплоизоляция накопителя тепловой энергии состоит из вольфрамового экранирования 5 и минеральной ваты 7. Для повышения прочности конструкции накопителя энергии между ними размещен цилиндрический металлический корпус 6. Цилиндрическая емкость хранения теплоаккумулятора 4 в накопителе энергии размещается на опорах 9. В верхней части теплового накопителя энергии располагается патрубок 8, предназначенный для выкачки воздуха и закачки аргона внутрь емкости. При температурах выше 400 °С графит в присутствии воздуха начинает окисляться, что приводит к его постепенному разрушению и потере теплопроводных свойств. При окислении графита образуется углекислый газ CO₂. В результате уменьшается количество активного теплоаккумулирующего материала и возникает вероятность нарушения герметичности и структурной целостности накопителя энергии. Использование аргона, являющегося инертным газом, позволяет предотвратить химическую реакцию между графитом и кислородом. Таким образом, обеспечивается стабильность и долговечность работы накопителя тепловой энергии. К достоинствам аргона можно отнести невысокую стоимость относительно, например, ксенона или криптона.

Разработанный накопитель (рис. 1) предлагается использовать в системе распределенной энергетики в качестве устройства управления избытком и дефицитом выработки электрической энергии. В периоды избыточной генерации, например, солнечными панелями, ветрогенераторами, мини-ТЭС и др., ее избыток может быть использован для нагрева высокотемпературного теплоносителя (олово) посредством

трубчатого электронагревателя (ТЭН) до температуры 2000-2500 °С. Стоит отметить, что при температуре около 2600 °С олово начинает испаряться, что существенно влияет на теплопередачу. При температуре ниже 232 °С олово находится в твердом агрегатном состоянии. Ввиду этого классические насосы для его перекачки не могут быть использованы. Поэтому применяются магнетогидродинамические (МГД) насосы. Таким образом, нагретый до высокой температуры теплоноситель перекачивается через тепловой накопитель энергии, в котором отдает тепловую энергию высокотемпературному рабочему телу (графиту), нагреваемому до температуры 2000-2500 °С. В периоды дефицита электрической энергии осуществляется обратный цикл. Олово нагревается до изменения агрегатного состояния, далее в жидком состоянии перекачивается через тепловой накопитель, отбирая тепловую энергию от графита. Далее олово перекачивается через линию, включающую МГД генератор, который преобразует тепловую энергию в электрическую.

Актуальной задачей повышения эффективности работы накопителя тепловой энергии (рис. 1) является снижение тепловых потерь. Очевидно, что при высоких температурах применение классических теплоизоляционных материалов не представляется возможным, т. к. температура их плавления ниже 2000 °С. Также при высоких температурах теплотери в большей мере обусловлены лучистым теплообменом. Ввиду данных обстоятельств первый контур теплоизоляции представлен вольфрамовым экранированием, выполненным в несколько слоев, второй теплоизоляционный слой представлен минеральной ватой. Для обеспечения функционирования накопителя тепловой энергии, уменьшения его габаритных размеров и экономической стоимости необходима разработка расчетной методики для определения толщины теплоизоляционных слоев.

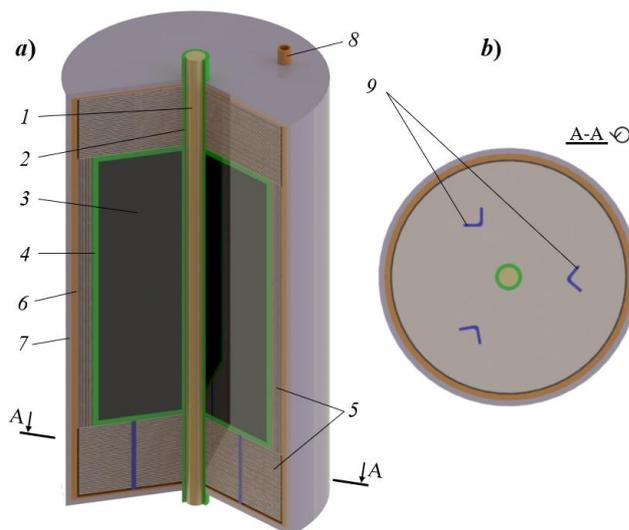


Рис. 1. Трехмерная модель накопителя тепловой энергии переодического действия: 1 – жидкометаллический высокотемпературный теплоноситель (олово); 2 – цилиндрический канал из тугоплавкого материала (вольфрам); 3 – теплоаккумулятор из твердого высокотемпературного рабочего тела (графит); 4 – цилиндрическая емкость из вольфрама для хранения теплоаккумулятора; 5 – вольфрамовое экранирование; 6 – цилиндрический металлический корпус; 7 – теплоизоляционный материал (минеральная вата); 8 – патрубок; 9 – опоры. а) вид со сложным разрезом; б) вид с наклонным разрезом начальной модели (без разрезов) секущей плоскостью в сечении А-А

Fig. 1. Three-dimensional model of a periodic action thermal energy storage: 1 – liquid metal high-temperature heat transfer fluid; 2 – cylindrical channel made of refractory material; 3 – heat accumulator made of solid high-temperature working substance; 4 – cylindrical container for storing the heat accumulator; 5 – shielding; 6 – cylindrical casing; 7 – thermal insulation; 8 – nozzle; 9 – supports. a) the view with a complex section; b) the view with an inclined section of the initial model (without sections) with a secant plane in section A-A

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Для ее разработки модель накопителя тепловой энергии (рис. 1) была упрощена. Схема которой представлена на рисунке 2, состоящая из 5 основных зон: 1 –

высокотемпературный теплоноситель (олово); 2 – нагретый графит, 3 – первый теплоизоляционный контур (вольфрамовое экранирование), представляющий собой множество дискретных вольфрамовых слоев, между которыми находится аргон, 4 – второй теплоизоляционный слой из минеральной ваты, 5 – внешняя среда.

Материал и методы (Material and methods)

В качестве исходных данных принималось, что к теплоаккумулятору – графиту 2 радиусом $r = 125$ мм подводится тепловой поток $Q = 800$ Вт высокотемпературным теплоносителем (олово) 1. В рамках допущения принималось, что тепловой поток через графит 2 распределяется равномерно в осесимметричном направлении. Процесс стационарный. Температура на наружной поверхности графита $t_{1,0}$ принималась 2000 °С. Количество слоев первого теплоизоляционного контура 3, общая его толщина δ_1 и толщина второго теплоизоляционного слоя из минеральной ваты δ_2 рассчитывались на основании следующих условий: 1) температура внешней среды t_f составляет 20 °С; 2) температура на стыке между вольфрамовым слоем и минеральной ватой $t_{1,i}$ составляет менее 900 °С, что исключает вероятность ее плавления; 3) температура наружной поверхности минеральной ваты t_2 составляет от 50 до 350 °С (обоснование данного условия будет представлено ниже).

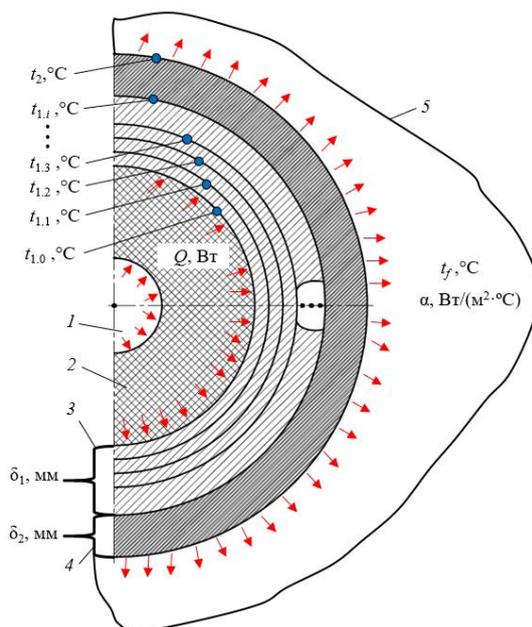


Рис. 2. Упрощенная схема распределения тепловых потерь в тепловом накопителе энергии: 1 – высокотемпературный теплоноситель (олово); 2 – нагретый графит, 3 – первый теплоизоляционный контур; 4 – второй теплоизоляционный слой из минеральной ваты, 5 – внешняя среда

Fig. 2. Simplified diagram of heat loss distribution in a thermal energy storage system: 1 – high-temperature heat transfer fluid (tin); 2 – heated graphite; 3 – first thermal insulation contour; 4 – second thermal insulation layer made of mineral wool; 5 – external environment

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В рамках расчета принималось, что толщина каждого слоя теплоизоляционного контура составляет 1 мм, состоящего из тонкого гофрированного вольфрама $0,1$ мм и прослойки аргона $0,9$ мм. Ввиду малой толщины стенки гофрированного вольфрама и относительно высокой рабочей температуры, расчетом теплового потока через нее пренебрегалось. Таким образом, общий тепловой поток $Q_{1,i}$, Вт, проходящий через каждый i -ый слой теплоизоляционного контура 3 (рис. 2), а именно через прослойку аргона без учета вольфрамовой стенки, представляет собой сумму лучистого $Q_{R(1,i)}$, Вт, кондуктивного $Q_{T(1,i)}$, Вт, и конвективного $Q_{C(1,i)}$, Вт, потоков, рассчитывался по формуле (1):

$$Q_{1,i} = Q_{R(1,i)} + Q_{T(1,i)} + Q_{C(1,i)}, \quad (1)$$

где i – номер слоя в теплоизоляционном контуре 3 (рис. 2).

Лучистый тепловой поток $Q_{R(1,i)}$ рассчитывался по закону Стефана-Больцмана (2):

$$Q_{R(1,i)} = C_{i-i+1} F_i \left[\left(\frac{T_{1,i}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{1,i+1}}{100} \right)^4 \right] \varphi, \quad (2)$$

где C_{i-i+1} – коэффициент взаимного излучения, Вт/(м²·К⁴); F_i – площадь излучающей поверхности, м²; $T_{1,i}$ – абсолютная температура вольфрамовой стенки i -ого слоя, К; $T_{1,i+1}$ – абсолютная температура вольфрамовой стенки $(i+1)$ -го слоя, К; φ – средний угловой коэффициент, определяемый формой и размерами участвующих в теплообмене поверхностей, их взаимным расположением и расстоянием между ними.

При расчете первого слоя теплоизоляционного контура 3, согласно рисунку 2, в формуле (2), $T_{1,i} = t_{1,0} + 273,15$ и $T_{1,i+1} = t_{1,1} + 273,15$.

Коэффициент взаимного излучения C_{i-i+1} рассчитывался по выражению (3), которое применяется при условии, что излучающее тело заключено внутри другого. По этой же причине средний угловой коэффициент φ принимался равным 1.

$$C_{i-i+1} = \frac{1}{\frac{1}{C_i} + \frac{F_i}{F_{i+1}} \left(\frac{1}{C_{i+1}} - \frac{1}{C_0} \right)}, \quad (3)$$

где C_i и C_{i+1} – коэффициент излучения вольфрамовой стенки i -ого и $(i+1)$ -го слоя соответственно, Вт/(м²·К⁴); F_{i+1} – площадь излучающей поверхности, м²; C_0 – коэффициент лучеиспускания абсолютного черного тела, Вт/(м²·К⁴).

Параметры C_i и C_{i+1} рассчитываются по выражениям (4) и (5) соответственно.

$$C_i = C_0 \varepsilon_i, \quad (4)$$

где ε_i – коэффициент излучения вольфрамовой стенки i -ого слоя.

$$C_{i+1} = C_0 \varepsilon_{i+1}, \quad (5)$$

где ε_{i+1} – коэффициент излучения вольфрамовой стенки $(i+1)$ -го слоя.

Кондуктивный тепловой поток $Q_{T(1,i)}$ рассчитывался по выражению (6):

$$Q_{T(1,i)} = \frac{2\pi h \lambda_f (t_{1,i} - t_{1,i+1})}{\ln \frac{r_{i+1}}{r_i}}, \quad (6)$$

где h – высота вольфрамовой стенки, м; λ_f – коэффициент теплопроводности аргона, Вт/(м·°С); $t_{1,i}$ – абсолютная температура вольфрамовой стенки i -ого слоя, °С; $T_{1,i+1}$ – температура вольфрамовой стенки $(i+1)$ -го слоя, °С, r_i и r_{i+1} – радиус вольфрамовой стенки i -ого и $(i+1)$ -го слоя соответственно, м.

Ввиду того, что теплообмен происходит в замкнутом ограниченном пространстве, расчет конвективного теплообмена рассматривают условно, по формуле (6), как перенос тепла только теплопроводностью, вводя в расчет эквивалентный коэффициент теплопроводности λ_e , Вт/(м·°С), который вычисляется по выражению (7).

$$\lambda_e = \varepsilon_k \lambda_f, \quad (7)$$

где ε_k – коэффициент конвекции, который принимается 1 при $GrPr < 1000$ или рассчитывается по выражению (8) при $GrPr > 1000$.

$$\varepsilon_k = 0,18(GrPr)^{0,25}, \quad (8)$$

где Gr – число Грасгофа, рассчитываемое по формуле (9); Pr – число Прандтля.

$$Gr = \frac{gh^3 \beta (t_{1,i} - t_{1,i+1})}{\nu^2}, \quad (9)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с²; β – температурный коэффициент объемного расширения, рассчитываемый по выражению (10), 1/К; ν – коэффициент кинематический вязкости, м²/с.

$$\beta = \frac{1}{273 + t_{1,i+1}}, \quad (10)$$

Таким образом, выражение (1) может быть преобразовано следующим образом:

$$Q_{1,i} = Q_{R(1,i)} + \varepsilon_k Q_{T(1,i)}, \quad (11)$$

Общий тепловой поток Q_2 , Вт, проходящий через второй теплоизоляционный слой 4 из минеральной ваты (рис. 2), очевидно, равен кондуктивному тепловому потоку. По аналогии с выражениями (1) и (6) можно записать:

$$Q_2 = \frac{2\pi h \lambda (t_{1,i} - t_2)}{\ln \frac{r_m}{r_{1,i}}}, \quad (12)$$

где λ – коэффициент теплопроводности минеральной ваты, Вт/(м·°C); r_m – наружный радиус стенки минеральной ваты, м.

Общий тепловой поток Q_3 , Вт, от наружной стенки теплового накопителя энергии во внешнюю среду 5 (рис. 2) равен конвективному тепловому потоку, который рассчитывается по выражению (13):

$$Q_3 = F_m \alpha (t_2 - t_f), \quad (13)$$

где F_m – площадь наружной стенки из минеральной ваты, м²; α – коэффициент теплоотдачи от наружной стенки накопителя энергии к внешней среде, Вт/(м²·°C); t_f – температура внешней среды, °C.

При расположении исследуемого объекта в закрытом помещении коэффициент теплоотдачи α определяется по эмпирическому выражению (14). Стоит отметить, что оно применимо к следующему температурному диапазону: $50 < t_2, \text{ °C} < 350$. Поэтому при расчете толщины теплоизоляции теплового накопителя энергии температура наружной поверхности минеральной ваты t_2 должна составлять от 50 до 350 °C, как указывалось ранее.

$$\alpha = 9,3 + 0,058t_2, \quad (14)$$

Отметим, что толщина каждого теплоизоляционного слоя рассчитывалась через общеизвестное выражение (15):

$$\delta_i = r_{i+1} - r_i, \quad (15)$$

Анализ выражений (1-15) показывает, что для определения толщины, как первого теплоизоляционного контура, так и второго теплоизоляционного слоя из минеральной ваты необходимо рассчитать распределение температурного поля в тепловом накопителе энергии с учетом требований к температурам на границах различных слоев, рассмотренных выше.

В случае несоответствия расчетных температур установленным их значениям на некоторых границах, представленных выше, необходимо увеличить толщину теплоизоляции. Ввиду этого в ходе итерационных расчетов проводилось увеличение толщины первого теплоизоляционного контура δ_1 или толщины второго теплоизоляционного слоя из минеральной ваты δ_2 с шагом – 0,1 мм. Также для решения выражений (1-15) необходимо задать ориентировочное значение разницы температур между соседними слоями теплоизоляционного контура 3 (рис. 2) $\Delta T = T_{1,i} - T_{1,i+1} = t_{1,i} - t_{1,i+1}$. Критерием сходимости было достижение тепловыми потоками $Q_{1,i}$ и Q_3 заданного значения $Q = 800$ Вт. В ходе итерационных расчетов ΔT задавался с шагом 0,1 °C (0,1 K).

Таким образом, для определения толщины теплоизоляционного контура δ_1 , толщины теплоизоляционного слоя из минеральной ваты δ_2 и получения температурного поля в тепловом накопителе энергии был разработан алгоритм из выражений (1-15) в виде программного кода, упрощенная блок-схема которого представлена на рисунке 3. Рассмотрим основные этапы. 1. Ввод числовых значений известных параметров. В том числе температуры на наружной поверхности графита $t_{1,0} = 2000$ °C и теплового потока $Q = 800$ Вт. 2-8. Расчет температур на слоях теплоизоляционного контура. 2-4. Итерационный цикл. 3-4. Ввод ориентировочной разницы температур между соседними слоями теплоизоляционного контура 3 первого слоя (рис. 2) $\Delta T_j = 0,1$ K. 5-6. Расчет теплового потока в первом слое контура $Q_{1,1}$ по выражениям (1-11) и его сравнение с заданным Q . Если расхождение более 1%, то переход к следующей итерации через шаг 7. Если расхождение менее 1%, переход к шагу 8, далее к шагу 9, на котором выполняется проверка – температура наружного слоя теплоизоляционного контура менее или более 900 °C. Если более, то осуществляется переход к шагу 10, т. е. прибавляется добавочный i -ый слой в теплоизоляционном контуре. Таким образом, определяется сколько слоев должен содержать теплоизоляционный контур. Если менее, то переход к шагу 11. 11-14. Определение толщины теплоизоляционного слоя из минеральной ваты δ_2 . Расчет по формулам (11) и (15). 12. Ввод ориентировочного значения $\delta_2 = 0,1$ мм. 13. Расчет наружной температуры теплоизоляционного слоя из минеральной ваты t_2 . 14. Проверка соответствия t_2 диапазону от 50 до 350 °C. Если нет, то переход к шагу 15 – увеличение толщины δ_2 на 0,1 мм. Если да, то переход к шагу 16 – расчет коэффициента теплоотдачи от накопителя тепловой энергии к внешней среде α , Вт/(м²·°C) и Q_3 , Вт по выражениям (13) и (14) соответственно. 17. Сравнение рассчитанного Q_3 с заданным Q . Если расхождение более 1%, то возврат к шагу 14. Если расхождение менее 1%, осуществляется расчет и вывод искомым параметров (шаги 17 и 18).

В ходе расчётов все теплофизические параметры были определены как функции, аппроксимируемые по температуре. Таким образом, значения параметров обновлялись

при каждой итерации и при переходе к расчёту следующего слоя теплоизоляционного контура.

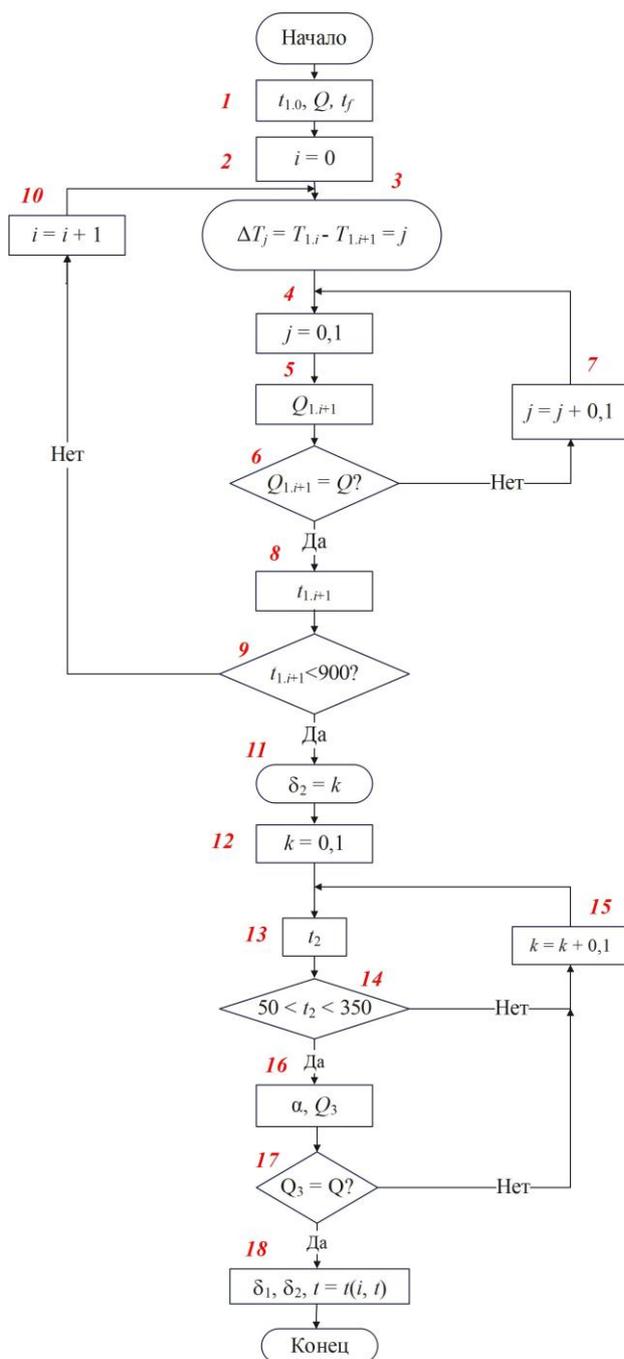


Рис. 3. Упрощенная блок-схема для определения температур в системе теплоизоляции теплового накопителя энергии

Fig. 3. Simplified flowchart for determining temperatures in the thermal insulation system of a thermal energy storage device

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Результаты и обсуждение (Results and discussion)

Результаты исследования показали, что предлагаемая система теплоизоляции, состоящая из первого теплоизоляционного контура, включающего вольфрамовое экранирование и прослойки аргона, и второго теплоизоляционного слоя из минеральной ваты, является эффективной для снижения теплопередачи от центрально расположенного теплоаккумулятора, нагретого до 2000 °С, во внешнюю среду, температура которой составляет 20 °С, при постоянном тепловом потоке 800 Вт, через нее. Получено, что общая толщина системы теплоизоляции теплового накопителя энергии δ должна составлять 155 мм (рис. 4). В ходе исследования проанализировано в качественном и количественном соотношении различные виды тепловых потоков (лучистый,

кондуктивный и конвективный) от общего теплового потока на различном удалении от теплоаккумулятора в тепловом накопителе энергии. При высоких температурах, т. е. ближе к графиту ($R < 263$ мм или $\delta < 138$ мм), преобладает тепловой поток излучением. По мере падения температуры в слое теплоизоляции наблюдается увеличение доли конвективного теплового потока в связи с уменьшением вязкости газа. Стоит отметить, что она оценивалась на основе вклада коэффициента конвекции ϵ_k при расчете общего теплового потока $Q_{1,i}$ по выражению (11). Можно предположить, что конвекция в закрытом пространстве имеет место быть ввиду большого градиента температур. Во втором теплоизоляционном слое из минеральной ваты тепловая энергия полностью передается за счет теплопроводности (рис. 5).

Первый теплоизоляционный контур должен состоять из 135 вольфрамовых экранов ($\delta_1 = 135$ мм). При данных геометрических размерах температура наружной поверхности теплоизоляционного контура будет снижена до 877 °С, что позволит использовать в качестве второго теплоизоляционного слоя более дешевый классический теплоизоляционный материал, например, минеральную вату. При таком подходе минимальная толщина второго теплоизоляционного слоя δ_2 должна составлять 16 мм. Температура наружной поверхности минеральной ваты будет снижена до 129 °С (рис. 4) согласно алгоритму расчета (рис. 3). При температурах более 900 °С применение тепловых экранов является одним из наиболее эффективных методов теплоизоляции.

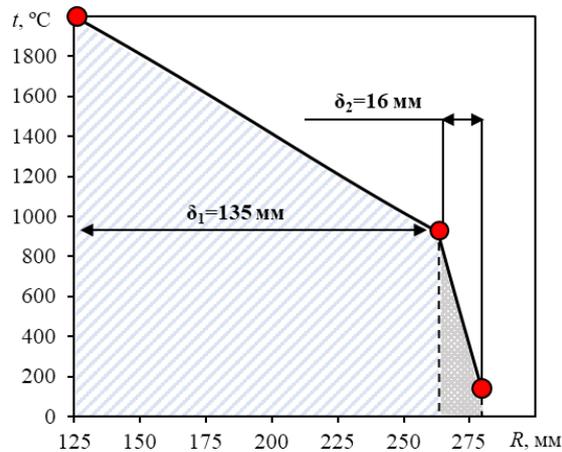


Рис. 4. Зависимость температуры от радиуса в цилиндрическом слое теплоизоляции теплового накопителя энергии

Fig. 4. Temperature dependence on radius in the cylindrical layer of thermal insulation of a thermal energy storage

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Общий заданный тепловой поток Q , Вт разбивается на три тепловых потока (лучистый, кондуктивный и конвективный) в слоях теплоизоляционного контура. По мере удаления от теплоаккумулятора доля лучистого теплового потока в первом теплоизоляционном контуре постепенно уменьшается, т. к. температура на границах слоев снижается (рис. 5).

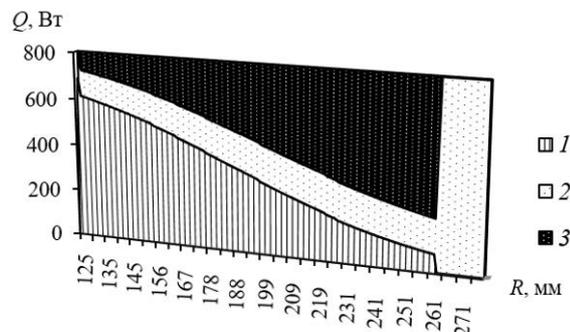


Рис. 5. Распределение различных видов тепловых потоков в зависимости от расстояния от центра теплового накопителя энергии: 1 – лучистый; 2 – кондуктивный; 3 – конвективный

Fig. 5. Distribution of different types of heat fluxes depending on the distance from the center of the thermal energy accumulator: 1 – radiant; 2 – conductive; 3 – convective

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Проведенное исследование подтверждает, что использование многослойной системы теплоизоляции, включающей как вольфрамовое экранирование с аргоновыми прослойками, так и минеральную вату, позволяет значительно снизить теплопередачу от горячего теплоаккумулятора к внешней среде. Это не только увеличивает эффективность системы хранения тепловой энергии, но и снижает потери энергии, делая систему более экономически выгодной и экологически устойчивой. Зная значения температур в каждом слое, становится возможным в качестве материалов экранов использовать не только вольфрам, но и другие материалы, например сталь. Это становится возможным сделать там, где температура экранов становится ниже температуры использования стали.

Разработанный алгоритм представляет собой универсальный инструмент для расчёта систем теплоизоляции, адаптируемый к широкому спектру температур, тепловых потоков и различных типов теплоизоляционных материалов. Благодаря своей гибкости алгоритм может быть эффективно применён для проектирования теплоизоляции в самых разнообразных условиях, от высокотемпературных промышленных процессов до систем хранения энергии, где критичны как сохранение тепла, так и его равномерное распределение.

В перспективе планируется значительное расширение функционала разработанного алгоритма за счёт включения экономических параметров, таких как стоимость материалов, эксплуатационных расходов и др. Это позволит интегрировать в алгоритм критерий стоимости, благодаря которому можно будет определить наиболее эффективный тип теплоизоляции и оптимальную толщину слоёв. Такой подход обеспечит не только технически обоснованный выбор, но и экономически выгодное решение для конкретных условий.

Выводы (Conclusions)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие основные выводы:

1. Предложена конструкция теплового накопителя энергии, которая может быть эффективно интегрирована в систему распределённой энергетики. Устройство позволяет управлять избытком и дефицитом выработки электрической энергии, что способствует стабилизации энергосистемы и повышению её надёжности.

2. Разработан универсальный алгоритм для расчёта систем теплоизоляции теплового накопителя энергии, который учитывает различные параметры и условия эксплуатации.

3. Общая толщина системы теплоизоляции теплового накопителя энергии должна составлять 151 мм (толщина первого теплоизоляционного контура из вольфрамовых экранов – 135 мм, толщина второго теплоизоляционного слоя из минеральной ваты – 16 мм), что обеспечивает эффективное снижение теплопередачи от теплоаккумулятора к внешней среде до заданного при расчете теплового потока 800 Вт.

4. Установлено, что в слоях системы теплоизоляции, расположенных в непосредственной близости к теплоаккумулятору, преобладает лучистый тепловой поток, который составляет около более 70% от общего теплового потока. По мере удаления от теплоаккумулятора увеличивается доля кондуктивного и конвективного теплового потока

Литература

1. Pimm, A.J., Palczewski, J., Barbour, E.R. et. al. Using electricity storage to reduce greenhouse gas emissions. *Applied Energy*. 2021; 282:116199. doi: 10.1016/j.apenergy.2020.116199.
2. Alva G., Lin Y., Fang G. An overview of thermal energy storage systems. *Energy*. 2018;144:341-378. doi: 10.1016/j.energy.2017.12.037
3. Zinurov V., Nikandrova M., Kharkov V. Assessment of thermal storage technologies in energy sector. 2020 Ural Smart Energy Conference. 2020. pp. 68-71. doi: 10.1109/USEC50097.2020.9281236
4. Baker J. New technology and possible advances in energy storage. *Energy Policy*. 2008;36(12):4368-4373. doi: 10.1016/j.enpol.2008.09.040.
5. Mahmoud, M., Ramadan, M., Olabi, A.G. et. al. A review of mechanical energy storage systems combined with wind and solar applications. *Energy Conversion and Management*. 2020;210:112670. doi: 10.1016/j.enconman.2020.112670.
6. Soloveichik G. L. Battery technologies for large-scale stationary energy storage. *Annual review of chemical and biomolecular engineering*. 2011;2:503-527. doi: 10.1146/annurev-chembioeng-061010-114116.
7. Morandi, A., Breschi, M., Ribani, P., et. al. Superconducting magnetic energy storage. *Energy Storage for Power Systems*. 2020. doi: 10.1049/pbpo063e_ch11.
8. Yuan K., Shi, J., Aftab, W., et. al. Engineering the thermal conductivity of functional phase-change materials for heat energy conversion, storage, and utilization. *Advanced Functional Materials*. 2020;30(8):1904228. doi: 10.1002/adfm.201904228.

9. Han G. G. D., Li H., Grossman J. C. Optically-controlled long-term storage and release of thermal energy in phase-change materials. *Nature communications*. 2017;8(1):1446. doi: 10.1038/s41467-017-01608-у.
10. Jamekhorshid A., Sadrameli S. M., Farid M. A review of microencapsulation methods of phase change materials (PCMs) as a thermal energy storage (TES) medium. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014;31:531-542. doi: 10.1016/j.rser.2013.12.033.
11. Pielichowska K., Pielichowski K. Phase change materials for thermal energy storage. *Progress in materials science*. 2014;65:67-123. doi: 10.1016/J.PMATSCI.2014.03.005.
12. Acem Z., Lopez J., Del Barrio E. P. KNO₃/NaNO₃ – Graphite materials for thermal energy storage at high temperature: Part I.–Elaboration methods and thermal properties. *Applied thermal engineering*. 2010;30(13):1580-1585. doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2010.03.013.
13. Badenhorst H. A review of the application of carbon materials in solar thermal energy storage. *Solar Energy*. 2019;192:35-68. doi: 10.1016/J.SOLENER.2018.01.062.
14. Pacio J., Wetzel T. Assessment of liquid metal technology status and research paths for their use as efficient heat transfer fluids in solar central receiver systems. *Solar Energy*. 2013;93:11-22. doi: 10.1016/J.SOLENER.2013.03.025.
15. Niedermeier, K., Mueller-Trefzer, F. Theoretical and experimental studies of dual-media thermal energy storage with liquid metal. In: Daubner, M., Marocco, L., Weisenburger, A. et. al. editors. AIP Conference Proceedings. Solarpaces 2020: 26th International Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems; 28 September – 2 October 2020; Freiburg, Germany. AIP Conf. Proc. 2022;2445(1): 160011.
16. Zhang, H., Baeyens, J., Cáceres, G. et. al. Thermal energy storage: Recent developments and practical aspects. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2016;53:1-40. doi: 10.1016/j.pecs.2015.10.003.
17. Cuce, E., Cuce, P. M., Wood, C. J. et. al. Toward aerogel based thermal superinsulation in buildings: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014;34:273-299. doi: 10.1016/j.rser.2014.03.017.
18. Hu, P., Liu, L., Zhao, M. Design, synthesis, and use of high temperature resistant aerogels exceeding 800 °C. *ES Materials & Manufacturing*. 2021;15:14-33. doi: 10.30919/esmm5f459.
19. Tychanicz-Kwiecień, M., Wilk, J., Gil, P. Review of high-temperature thermal insulation materials. *Journal of Thermophysics and heat transfer*. 2019;33(1):271-284. doi: 10.2514/1.T5420.
20. Соловьева О.В., Соловьев С.А., Шакурова П.З. Обзор современных керамических ячеистых материалов и композитов, применяемых в теплотехнике. *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2023;25(1):82-104. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2023-25-1-82-104>

Авторы публикации

Чадаев Алексей Николаевич – аспирант Казанского национального исследовательского технологического университета (КНИТУ). *ORCID*: <https://orcid.org/0009-0004-3180-5933>, ac312@mail.ru.

Дмитриев Андрей Владимирович – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Автоматизация технологических процессов и производств» (АТПП) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). *ORCID*: <https://orcid.org/0000-0001-8979-4457>, ieremiada@gmail.com.

Зинуров Вадим Эдуардович – канд. техн. наук, и.о. зав. кафедрой «Инженерная графика» (ИГ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). *ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-1380-4433>, vadd_93@mail.ru.

Мугинов Арслан Маратович – студент Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). *ORCID*: <https://orcid.org/0009-0008-2914-6923>, aqwewerr@gmail.com.

Павлов Григорий Иванович – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Специальные технологии в образовании» Казанского национального исследовательского технического университета (КНИТУ). *ORCID*: <https://orcid.org/0000-0001-8979-4457>, pavlov16@mail.ru.

References

1. Pimm, A.J., Palczewski, J., Barbour, E.R. et. al. Using electricity storage to reduce greenhouse gas emissions. *Applied Energy*. 2021; 282:116199. doi: 10.1016/j.apenergy.2020.116199.

2. Alva G., Lin Y., Fang G. An overview of thermal energy storage systems. *Energy*. 2018;144:341-378. doi: 10.1016/j.energy.2017.12.037
3. Zinurov V., Nikandrova M., Kharkov V. Assessment of thermal storage technologies in energy sector. *2020 Ural Smart Energy Conference*. 2020. pp. 68-71. doi: 10.1109/USEC50097.2020.9281236
4. Baker J. New technology and possible advances in energy storage. *Energy Policy*. 2008;36(12):4368-4373. doi: 10.1016/j.enpol.2008.09.040.
5. Mahmoud, M., Ramadan, M., Olabi, A.G. et. al. A review of mechanical energy storage systems combined with wind and solar applications. *Energy Conversion and Management*. 2020;210:112670. doi: 10.1016/j.enconman.2020.112670.
6. Soloveichik G. L. Battery technologies for large-scale stationary energy storage. *Annual review of chemical and biomolecular engineering*. 2011;2:503-527. doi: 10.1146/annurev-chembioeng-061010-114116.
7. Morandi, A., Breschi, M., Ribani, P., et. al. Superconducting magnetic energy storage. *Energy Storage for Power Systems*. 2020. doi: 10.1049/pbpo063e_ch11.
8. Yuan K., Shi, J., Aftab, W., et. al. Engineering the thermal conductivity of functional phase-change materials for heat energy conversion, storage, and utilization. *Advanced Functional Materials*. 2020;30(8):1904228. doi: 10.1002/adfm.201904228.
9. Han G. G. D., Li H., Grossman J. C. Optically-controlled long-term storage and release of thermal energy in phase-change materials. *Nature communications*. 2017;8(1):1446. doi: 10.1038/s41467-017-01608-y.
10. Jamekhorshid A., Sadrameli S. M., Farid M. A review of microencapsulation methods of phase change materials (PCMs) as a thermal energy storage (TES) medium. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014;31:531-542. doi: 10.1016/j.rser.2013.12.033.
11. Pielichowska K., Pielichowski K. Phase change materials for thermal energy storage. *Progress in materials science*. 2014;65:67-123. doi: 10.1016/J.PMATSCI.2014.03.005.
12. Acem Z., Lopez J., Del Barrio E. P. KNO₃/NaNO₃ – Graphite materials for thermal energy storage at high temperature: Part I.–Elaboration methods and thermal properties. *Applied thermal engineering*. 2010;30(13):1580-1585. doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2010.03.013.
13. Badenhorst H. A review of the application of carbon materials in solar thermal energy storage. *Solar Energy*. 2019;192:35-68. doi: 10.1016/J.SOLENER.2018.01.062.
14. Pacio J., Wetzel T. Assessment of liquid metal technology status and research paths for their use as efficient heat transfer fluids in solar central receiver systems. *Solar Energy*. 2013;93:11-22. doi: 10.1016/J.SOLENER.2013.03.025.
15. Niedermeier, K., Mueller-Trefzer, F. Theoretical and experimental studies of dual-media thermal energy storage with liquid metal. In: Daubner, M., Marocco, L., Weisenburger, A. et. al. editors. *AIP Conference Proceedings. Solarpaces 2020: 26th International Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems; 28 September – 2 October 2020; Freiburg, Germany*. AIP Conf. Proc. 2022;2445(1): 160011.
16. Zhang, H., Baeyens, J., Cáceres, G. et. al. Thermal energy storage: Recent developments and practical aspects. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2016;53:1-40. doi: 10.1016/j.peccs.2015.10.003.
17. Cuce, E., Cuce, P. M., Wood, C. J. et. al. Toward aerogel based thermal superinsulation in buildings: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014;34:273-299. doi: 10.1016/j.rser.2014.03.017.
18. Hu, P., Liu, L., Zhao, M. Design, synthesis, and use of high temperature resistant aerogels exceeding 800 °C. *ES Materials & Manufacturing*. 2021;15:14-33. doi: 10.30919/esmm5f459.
19. Tychanicz-Kwiecień, M., Wilk, J., Gil, P. Review of high-temperature thermal insulation materials. *Journal of Thermophysics and heat transfer*. 2019;33(1):271-284. doi: 10.2514/1.T5420.
20. Soloveva O. V., Solovev S.A., Shakurova R.Z. Review of modern ceramic cellular materials and composites used in heat engineering. *Power Eng. Res. equipment, Technol.* 2023;25(1):82-104. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2023-25-1-82-104>

Authors of the publication

Aleksey N. Chadaev – Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia. *ORCID*: <https://orcid.org/0009-0004-3180-5933>, ac312@mail.ru.

Andrey V. Dmitriev – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. *ORCID*: <https://orcid.org/0000-0001-8979-4457>, ieremiada@gmail.com.

Vadim E. Zinurov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. *ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-1380-4433>, vadd_93@mail.ru.

Arslan M. Muginov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2914-6923>, aqwewerr@gmail.com.

Grigory I. Pavlov – Kazan National Research Technical University, Kazan, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8979-4457>, pavlov16@mail.ru.

Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

Получено **21.05.2024 г.**

Отредактировано **06.11.2024 г.**

Принято **11.11.2024 г.**