

Тепловой аккумулятор с теплоизоляционным материалом на основе аэрогеля

Александр Валерьевич Федюхин¹, Владислав Александрович Карасевич²,
Михаил Сергеевич Повернов³, Ольга Валерьевна Афанасьева⁴

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ» (НИУ «МЭИ»); г. Москва, Россия;

² Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина (РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина); г. Москва, Россия;

³ Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (МФТИ); г. Москва, Россия;

⁴ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ); г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Установки для аккумулирования тепловой энергии позволяют сглаживать пиковые нагрузки и обеспечивать устойчивость работы теплоэнергетической системы. Особую актуальность данные решения имеют для частных домовладений. Цель исследования — анализ целесообразности применения теплового аккумулятора на основе талькомагнезита и с тепловой изоляцией из аэрогеля.

Материалы и методы. Для определения температуры на поверхности тепловой изоляции и визуализации температурного профиля проведено моделирование в программном пакете ANSYS. В качестве системы автоматического проектирования выбран Autodesk Inventor.

Результаты. Получены изображения температурных профилей на режимах 350 °С для толщины тепловой изоляции: 20 и 50 мм для аэрогеля, 70 и 150 мм для минеральной ваты. Проведенный анализ показал, что для всех вариантов температура поверхности оставалась ниже 60 °С, что свидетельствует о корректности выбора толщины изоляции. Для варианта теплоизоляции из минеральной ваты (150 мм) и аэрогеля (50 мм) температура поверхности оказалась значительно ниже необходимой, что позволило уменьшить толщину слоя изоляции до 70 мм для минеральной ваты и 20 мм для аэрогеля соответственно. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что использование тепловой изоляции на основе аэрогеля существенно уменьшает толщину теплоизолирующего слоя.

Выводы. Несмотря на сложность и дороговизну создания теплоизоляционных материалов на основе аэрогеля, его использование в составе теплового аккумулятора дает возможность избежать множества проблем, связанных со старением, разрушением и частой заменой тепловой изоляции, снизить нагрузку на теплоизоляционные конструкции и значительно повысить экономическую эффективность теплоэнергетических систем, сократив потери при производстве и передаче тепловой энергии.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: тепловое аккумулирование, талькомагнезит, аэрогель, моделирование, ANSYS, температурные профили, толщина изоляции

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания № 075-03-2024-226/1 от 15.02.2024. Авторы выражают благодарность анонимному рецензенту за содержательную рецензию и редактору, помогающему оформить статью.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Федюхин А.В., Карасевич В.А., Повернов М.С., Афанасьева О.В. Тепловой аккумулятор с теплоизоляционным материалом на основе аэрогеля // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 12. С. 1963–1976. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.12.1963-1976

Автор, ответственный за переписку: Ольга Валерьевна Афанасьева, eccolga@mail.ru.

Heat accumulator with aerogel-based thermal insulation material

Alexander V. Fedyukhin¹, Vladislav A. Karasevich²,
Mihail S. Povernov³, Ol'ga V. Afanas'eva⁴

¹ National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (MPEI); Moscow, Russian Federation;

² Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University) (Gubkin University); Moscow, Russian Federation;

³ Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University); Moscow, Russian Federation;

⁴ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU); St. Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Installations for thermal energy storage make it possible to smooth peak loads and provide stability of heat and power system. These solutions are of particular relevance for private households. The purpose of this paper is to analyze the feasibility of using a heat accumulator based on talc-magnesite and with aerogel thermal insulation.

Materials and methods. In order to determine the temperature on the insulation surface and visualize the temperature profile, simulation in the ANSYS software package was carried out. Autodesk Inventor was selected as an automatic design system.

Results. Images of temperature profiles were obtained at 350 °C for thermal insulation thicknesses: 20 and 50 mm for aerogel, 70 and 150 mm for mineral wool. The analysis showed that for all options the surface temperature remained below 60 °C, which indicates the correct choice of insulation thickness. For the thermal insulation option made of mineral wool (150 mm) and aerogel (50 mm), the surface temperature turned out to be significantly lower than necessary, which made it possible to reduce the thickness of the insulation layer to 70 mm for mineral wool and 20 mm for aerogel, respectively. The results obtained allow us to conclude that the use of aerogel-based thermal insulation can significantly reduce the thickness of the heat-insulating layer.

Conclusions. Despite the complexity and high cost of creating thermal insulating materials based on aerogel, its use as part of a thermal accumulator will help avoid many problems associated with aging, destruction and frequent replacement of thermal insulation, reduce the load on thermal insulation structures and significantly increase the economic efficiency of thermal power systems, reducing losses during production and transfer of thermal energy.

KEYWORDS: thermal storage, talc-magnesite, aerogel, modeling, ANSYS, temperature profiles, insulation thickness

Acknowledgements. This research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment No. 075-03-2024-226/1 от 15.02.2024. The authors are grateful to the anonymous reviewer for the informative review and the editor who helps to prepare the paper.

FOR CITATION: Fedyukhin A.V., Karasevich V.A., Povernov M.S., Afanas'eva O.V. Heat accumulator with aerogel-based thermal insulation material. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(12):1963-1976. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.12.1963-1976 (rus.).

Corresponding author: Ol'ga V. Afanas'eva, eccolga@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Для Российской Федерации, в некоторых регионах которой отопительный период превышает 250 дней, снабжение домовладений теплом служит критическим фактором поддержки жизнеобеспечения. Одним из направлений для внедрения электрических генераторов тепла по принципу его аккумулирования малой мощности (максимально до 15 кВт, согласно Постановлению Правительства от 21.04.2009 РФ № 334 «О совершенствовании порядка технического присоединения потребителей к электрическим сетям») являются частные домовладения. Тепловое аккумулирование представляет собой процессы (физические или химические), благодаря которым происходит накопление тепла в аккумуляторе тепловой энергии. Большинство частных домовладений не подключены к сетевому природному газу и отапливаются альтернативным образом. Если предположить, что средняя установленная мощность дачного (огородного, деревенского, коттеджного) дома составляет 10 кВт, а электричеством отапливаются около 5 % жилищ, то речь идет о домовладениях с общей установленной мощностью до 8 ГВт. В таких домовладениях теплоснабжение — основной потребитель электроэнергии.

Коллективом авторов в настоящий момент ведется работа, направленная на создание энергоэффективного генератора тепла (теплового аккумулятора). В качестве основы для накопления тепловой энергии планируется использовать талькомагнезит из-за его высоких показателей теплоемкости и теплопроводности. Эффективности функционирования устройства предполагается достичь при помощи ин-

теллектуального накопления с последующей выдачей тепловой энергии посредством системы автоматизации на базе внутреннего контроллера собственной разработки. Данный подход позволит динамически использовать доступную электрическую мощность на объекте посредством ее измерения на входящем фидере (вводном кабеле), динамически производить нагрев теплового аккумулятора остаточной мощностью и согласно пользовательским настройкам, не допуская перегрузки и аварийного отключения защитной автоматики электрощита, как следствие. Возможно осуществлять нагрев теплового аккумулятора с применением выгодных тарифов на электроэнергию (преимущественно в ночное время) с последующей выдачей тепла в течение всего дня. Это позволит сэкономить расходы, затрачиваемые на нагрев. Также целесообразно использование возобновляемых источников электроэнергии (ВИЭ) для приоритетной зарядки теплового аккумулятора вырабатываемой ими электроэнергией параллельно с электроэнергией сети. В качестве изоляционного материала планируется применять аэрогель из-за его показателей. Аэрогель обладает рекордно низкой плотностью и демонстрирует ряд уникальных свойств, хорошо подходящих для конструкции теплового аккумулятора: твердость, жаропрочность, низкая теплопроводность. Еще одна важная конструктивная особенность планируемого к разработке устройства — его возможность почти полной разборки на части и неполной загрузки накопителем тепловой энергии. Это обеспечит удобную транспортировку устройства (даже на легковом автомобиле за несколько заходов), также возможность приобретения

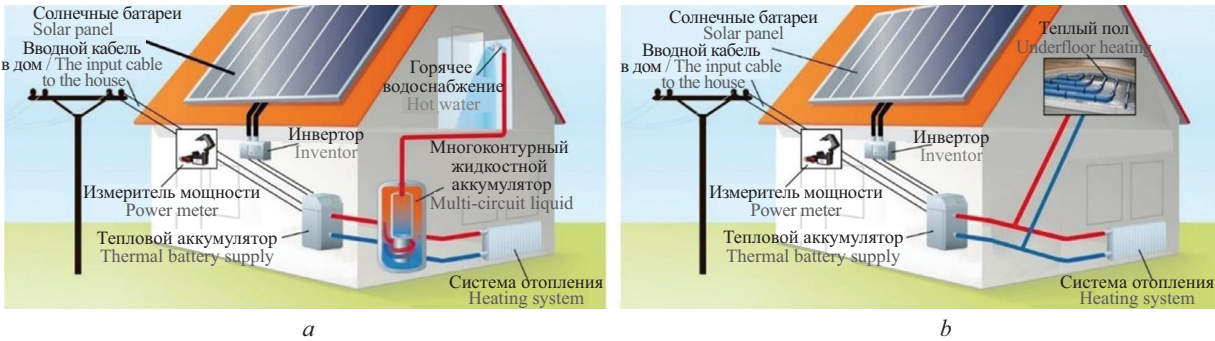


Рис. 1. Использование аккумулятора тепла в жилом доме: *a* — подключение с горячим водоснабжением и водяным баком; *b* — подключение без горячего водоснабжения

Fig. 1. Use of a heat accumulator in a residential building: *a* — connection with hot water supply and water tank; *b* — connection without hot water supply

устройства при нехватке бюджета и его дальнейшего усовершенствования (добавления накопителя тепловой энергии до желаемой теплоемкости). С помощью устройства можно круглосуточно отапливать небольшой дом (до 100 м²), используя электроэнергию от ВИЭ (там, где нет подключения к электроэнергии) или электроэнергию по ночному тарифу (в несколько раз дешевле, чем по дневному). Модульная сборная конструкция (наличие возможности добавлять или убирать талькомагнетитные блоки) позволяет регулировать необходимую установленную мощность. Применение плавного регулирования подачи электроэнергии на вход аккумулятора дает возможность использовать только «свободную» электрическую мощность домовладения и не ставить под угрозу надежность его электроснабжения, а плавное

регулирование потоков воздуха на выходе из аккумулятора — обеспечить в доме комфортный уровень температуры. Рис. 1 иллюстрирует использование аккумулятора тепла в жилом доме [1, 2].

В работе [3] представлены обширный обзор существующих и перспективных систем накопления тепловой энергии, классификация применяемых для накопления тепловой энергии материалов с анализом их основных свойств, таких как температура эксплуатации, теплопроводность, плотность. Авторы исследования [4] показывают актуальность накопления тепловой энергии для зданий и сооружений и делают акцент на использовании материалов с фазовым переходом в строительных конструкциях, доказывая, что данные материалы превосходят минеральную вату по теплофизическим и эксплуатационным ха-

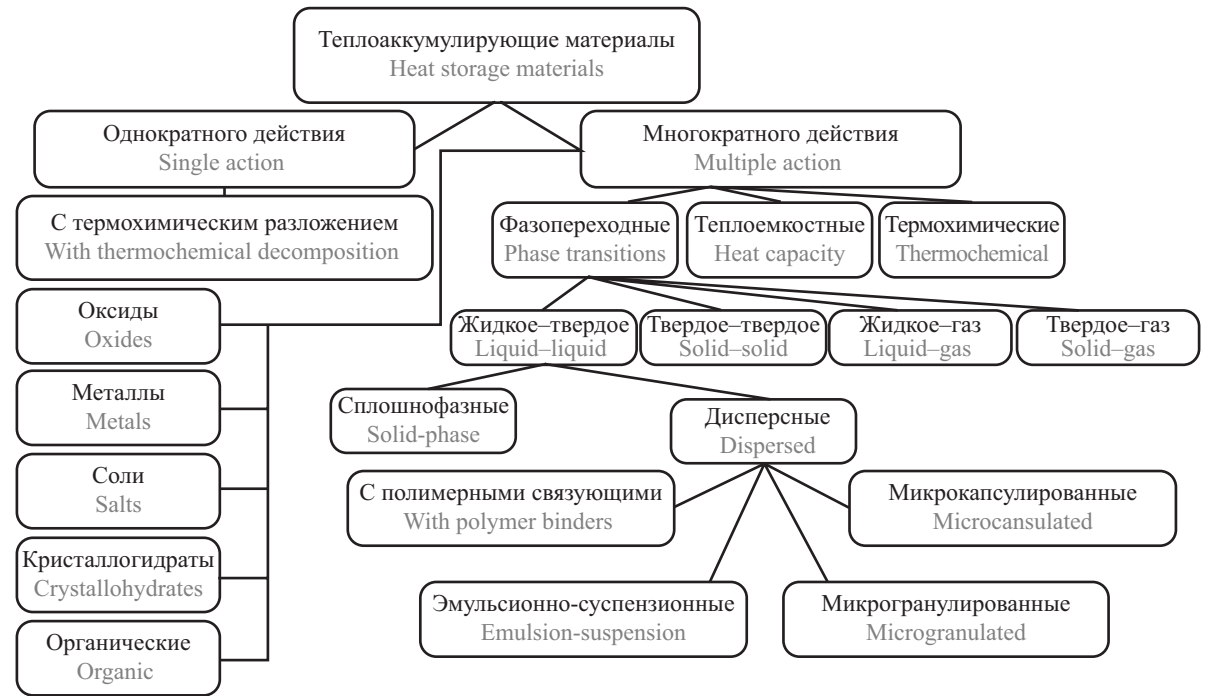


Рис. 2. Классификация теплоаккумулирующих материалов

Fig. 2. Classification of heat storage materials

рактикам. Предлагаются критерии выбора теплоаккумулирующих материалов [1], наиболее перспективными для создания гибридных систем накопления энергии являются материалы на основе гидроксидов кальция и магния, кристаллогидратов лития и натрия, эвтектические составы на основе нитратов натрия, калия и лития. Исследование [2] также носит аналитический характер и охватывает более 150 материалов, используемых в качестве накопителей тепловой энергии с оценкой их преимуществ и недостатков.

Тепловой аккумулятор представляет собой теплоизолированный герметичный резервуар, который обеспечивает обратимые процессы накопления или хранения и выделения тепловой энергии в количествах, необходимых потребителю. На основании первого закона термодинамики аккумулярование энергии может осуществляться в результате изменения внутренней энергии материала, массы системы, давления, объема, энтальпии и различных их комбинаций. Способность выделять энергию, требуемую потребителем, — важный показатель, характеризующий возможность и целесообразность аккумулярования тепла. Исходя из размеров теплового аккумулятора, распределения температур, желаемой длительности хранения теплоты, выполняется выбор конструкции аккумулятора и теплоаккумулирующего материала (ТАМ) (рис. 2) [5].

По типу процесса аккумулярования энергии в тепловых аккумуляторах различают тепловые емкостные аккумуляторы, аккумуляторы теплоты фазового перехода и термохимические аккумуляторы. Перспективы применения тепловых аккумуляторов на основе нетоксичных материалов анализируются в публикации [6]. Авторы описывают модель сравнительно простого в изготовлении и эксплуатации грунтового аккумулятора, теплообмен в котором осуществляется путем взаимодействия продуваемого воздуха и капсул с теплоаккумулирующими свойствами. В труде [7] рассматриваются вопросы взаимодействия ВИЭ и аккумуляторов, представлен обзор солнечных коллекторов и систем накопления тепловой энергии. Показаны преимущества и недостатки различных типов солнечных коллекторов, в том числе неконцентрирующих и концентрирующих коллекторов. Анализу различных типов и режимов работы тепловых аккумуляторов посвящена работа [8]. Авторы особо отмечают потенциал применения химических аккумуляторов, эффективность которых достигает 70 %.

К отдельному направлению исследований стоит отнести разработку моделей теплообмена [9, 10] и прогнозирования свойств материалов при переменном режиме работы теплового аккумулятора [11, 12]. Представлена математическая модель теплообмена при фазовом переходе ТАМ, которая учитывает теплофизические свойства материала, толщину слоя фазового перехода и время ее образования, а также разность температур между температурой исход-

ного состояния и температурой фазового перехода ТАМ [9]. В исследовании [10] на основе расчета теплового баланса установлено, что парафин является приоритетным в применении материалом для различных приложений, связанных с низкотемпературной аккумуляцией теплоты. Работа [11] значима с точки зрения обработки результатов экспериментальных исследований, направленных на разработку методики по определению составов с наилучшими теплоаккумулирующими свойствами. Показано, что при 80%-ном содержании микрокапсул в накопителе материал разрушается, поэтому оптимальной долей будет 50 % от состава строительного материала. Предложен оригинальный метод параметрической идентификации эффективного коэффициента теплопроводности как функции температуры теплового аккумулятора в виде элемента обеспечения системы теплового режима [12]. Анализ результатов показал, что эффективный коэффициент теплопроводности находится в пределах 0,16–0,56 Вт/(м·К). Отмечается, что наибольшее влияние на КПД теплового аккумулятора оказывают объем, время зарядки и разрядки, а также термическое сопротивление [13].

Вопросы практического применения тепловых аккумуляторов для индивидуальных и многоквартирных жилых домов рассмотрены во многих трудах. В публикации [14] приведена оригинальная методика расчета водораспределителя постоянного поперечного сечения, равномерно перфорированного по высоте, для многослойного слоистого теплового накопителя, используемого в системах солнечного отопления и горячего водоснабжения. Представлена модель теплового накопителя, совмещенная с системой «теплого пола» [15]. В качестве ТАМ автором предлагается использование композиции из теплопроводного металла и теплоемкой эпоксидной смолы. Работа [16] содержит методику расчета тепловой нагрузки системы солнечного теплоснабжения с аккумулятором энергии. Показано, что решением уравнения теплового баланса можно получить численные значения тепловых потерь через ограждающие конструкции здания. Необходимо отметить, что в качестве решения во многих публикациях предлагается комбинация солнечных коллекторов и теплового аккумулятора на базе воды [17], грунта [18] или материалов с фазовым переходом [19]. В частности, в исследовании [19] представлена принципиальная схема применения аккумулятора в системе теплоснабжения многоэтажного жилого дома для снятия пиковых нагрузок горячего водоснабжения путем аккумулярования тепловой энергии, поступающей от солнечного коллектора.

Основные характеристики теплоаккумулирующих материалов, которые получили широкое распространение в настоящее время, приведены в таблице.

У эвтектических составов многокомпонентных систем более высокие значения теплоты фазовых переходов, чем у индивидуальных веществ [20]. Благо-

Основные характеристики теплоаккумулирующих материалов

Main characteristics of heat-accumulating materials

Материал Material	Температурный интервал, °С Temperature range, °C	Удельная теплоемкость, кДж/(кг·°С) Specific heat capacity, kJ/(kg·°C)	Объемная теплоемкость, кДж/(м³·°С) Volumetric heat capacity, kJ/(m³·°C)	Теплопроводность, Вт/(м·°С) Thermal conductivity, W/(m·°C)
Твердые Solid				
Хлорид натрия Sodium chloride	<800	0,92	2,0	9*. **
Чугун Cast iron	<1500	0,46	3,6	70**–34**
Камень (гранит) Stone (granite)	<1700	0,79	2,2	2,7**
Кирпич Brick	–	0,84	1,4	0,6
Земля (сухая) Earth (dry)	–	0,79	1,0	1,0
Жидкие Liquid				
Вода Water	0–100	4,2	4,2	0,6
Масло («термо») Oil («thermo»)	От –50 до 330 From –50 до 330	2,4	1,9	0,1
Натрий Sodium	От 98 до 880 From 98 до 880	1,3	1,3	85**–60***
Диэтиленгликоль Diethylene glycol	От –10 до 240 From 98 до 880	2,8	2,9	0,25

Примечание: * — в случае гранулированного материала с заполненными воздухом пустотами — меньше; ** — при 1000 °С; *** — при 700 °С.

Note: * — in case of granular material with air-filled voids — less; ** — at 1,000 °C; *** — at 700 °C.

даря тому, что существует большое количество эвтек-
тических составов двух-, трех-, четырех- и пятиком-
понентных систем, это дает возможность использо-
вать их в качестве фазопереходных материалов. К дос-
тоинствам органических кислот и парафинов отно-
сятся большие значения удельной энергии, разность
температур теплоносителя и источника теплоты
определяется желаемой интенсивностью теплопере-
дачи. Недостатки: материалы имеют низкий коэффи-
циент теплопроводности, в расплавленном состоя-
нии являются коррозионноактивными веществами,
изменяют объем при плавлении и относительно до-
роги [21].

Таким образом, можно заключить, что в научно-
технической литературе практически не встречаются
работы, где рассматриваются технические аспек-
ты применения теплового аккумулятора на основе
талькомагнезита с тепловой изоляцией из аэрогеля.
Практическая значимость данной работы заключа-
ется в разработке конструкции теплового аккумулятора
и расчете температурного профиля тепловой изоля-
ции из аэрогеля.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Цель исследования — проведение анализа целе-
сообразности применения современных энергоэффе-
ктивных генераторов тепла (тепловых аккумуляторов)
с использованием теплоизоляционных материалов
на основе аэрогеля. В качестве объекта исследования
выбран емкостный тепловой аккумулятор с твердым
теплоаккумулирующим материалом. Основой для на-
копления тепловой энергии является талькомагнезит
(из-за его высоких показателей теплоемкости и тепло-
проводности). Конструктивная особенность заключа-
ется в возможности почти полной разборки на части
и неполной загрузки объема аккумулятора тепловой
энергии (рис. 3).

Модульная сборная конструкция (наличие воз-
можности добавлять или убирать талькомагнезитные
блоки) позволяет регулировать необходимую уста-
новленную мощность. Использование плавного регу-
лирования подачи электроэнергии на вход теплового
аккумулятора дает возможность использовать только
«свободную» электрическую мощность домовладе-
ния и не ставить под угрозу надежность его электро-

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 19. Выпуск 12, 2024
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 19. Issue 12, 2024

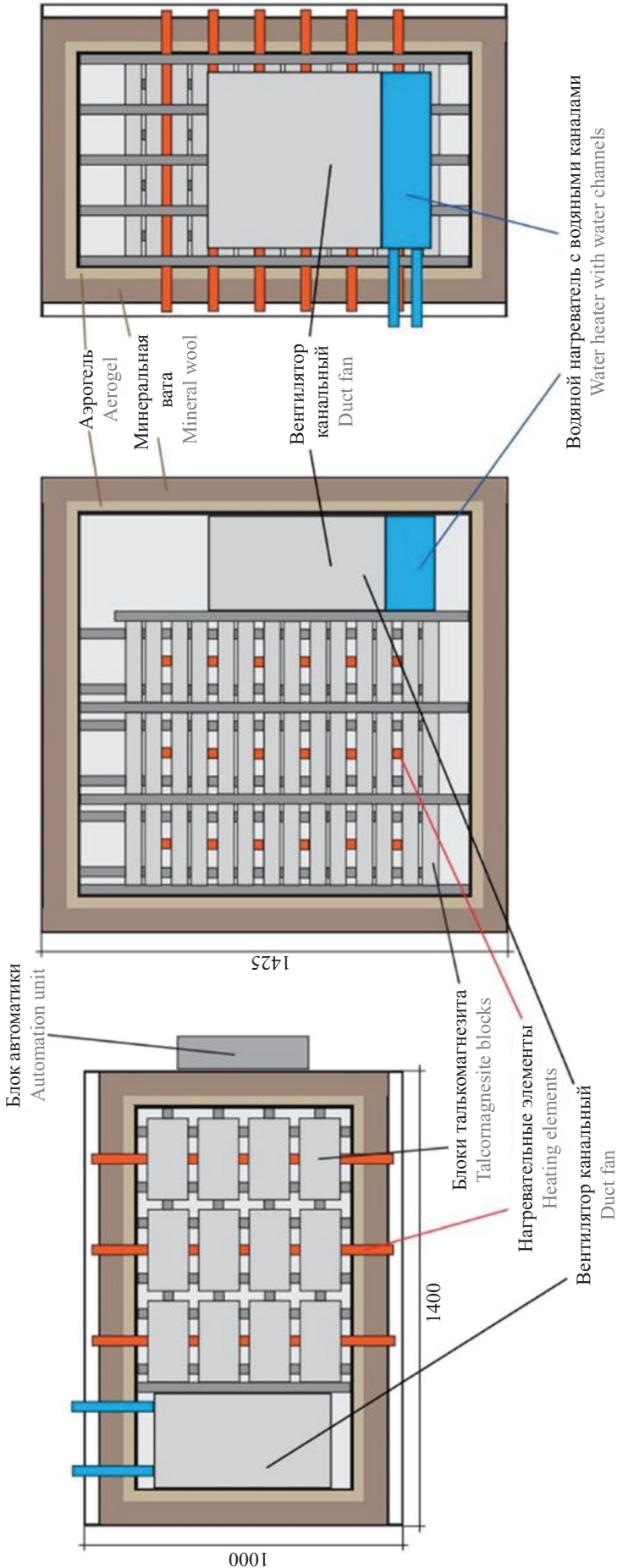


Рис. 3. Тепловой аккумулятор
Fig. 3. Thermal accumulator

снабжения, а плавное регулирование потоков воздуха на выходе из аккумулятора позволяет обеспечить в доме комфортный уровень температуры.

При сравнении устройства теплового аккумулятора с классическими электрическими нагревательными приборами и жидкостными тепловыми аккумуляторами выделяется ряд технических и экономических преимуществ:

1. Возможность накопления тепловой энергии в желаемый промежуток времени и с желаемой доступной нагрузкой, в том числе с использованием ВИЭ. В случае с обычными электрическими нагревательными элементами есть возможность их применения лишь при необходимости (падении температуры нагреваемого помещения или теплоносителя, в частности). При нехватке доступной электроэнергии на объекте (использование доступной мощности обычно в пределах 10 кВт другими бытовыми электроприборами) существует риск падения температуры (недогрева) в целом с последующим общим остыванием постройки.

2. Использование в качестве основы для накопления тепловой энергии твердого материала в отличие от жидкостного с возможностью нагрева до нескольких сотен градусов (точка плавления талькомагнезита составляет более тысячи градусов), что позволяет накапливать большее количество тепловой энергии при одинаковой площади.

3. Возможность применения совместно с ВИЭ. При использовании ВИЭ можно направить всю доступную неиспользуемую электрическую мощность на нагрев теплового аккумулятора с последующим хранением и выдачей тепловой энергии по необходимости. Учитывая особенность ВИЭ (ветряные электростанции (ВЭС), солнечные электростанции (СЭС), водород и др.), при неиспользовании свободной электроэнергии она пропадает, а в случае СЭС может привести к порче оборудования. Тогда тепловой аккумулятор может играть роль устройства, предохраняющего от всплесков электрической мощности.

4. Применение инновационного изоляционного материала аэрогеля позволит добиться хороших показателей при тепловой изоляции теплового аккумулятора. Также аэрогель весьма прочный материал и может выдерживать нагрузку в 2000 раз больше собственного веса, что удобно в использовании конструкции теплового аккумулятора, учитывая его вес. Температура плавления кварцевого аэрогеля составляет 1200 °С, что хорошо подходит при совместном использованием с твердым материалом накопления тепловой энергии.

5. Разборный корпус устройства теплового аккумулятора позволяет легко транспортировать устройство и изменять его конфигурацию (степень загрузки, в частности). Данное свойство недоступно для жидкостного теплового аккумулятора, который в силу своей конструкции (использование жидкости в качестве основы накопления тепловой энергии в первую

очередь) имеет монолитную конструкцию. Также есть возможность динамического добавления и замены активных элементов теплового аккумулятора в зависимости от мощности (таких как трубчатые электронагреватели, вентилятор, силовые твердотельные устройства), а также пассивных элементов конструкции.

6. Возможность дистанционного управления и диспетчеризации устройства теплового аккумулятора посредством встроенного контроллера и цифровых каналов связи.

В качестве объекта исследования выбран наиболее перспективный для частных домовладений емкостный тепловой аккумулятор с основой для накопления тепловой энергии в виде талькомагнезита и с тепловой изоляцией на основе аэрогеля [22–25]. Так как основой для накопления тепловой энергии является талькомагнезит с температурой 350 °С, то поверхность теплового аккумулятора необходимо изолировать. При использовании тепловой изоляции как средства, предохраняющего обслуживающий персонал от ожогов, температура поверхности не должна превышать 60 °С для изолируемых объектов, расположенных на открытом воздухе, в рабочей или обслуживаемой зоне¹.

Приняты следующие исходные данные: δ_1 — толщина первого слоя; λ_1 и λ_2 — коэффициенты теплопроводности; t_{c1} , t_{c3} — температуры поверхности стенок; $t_{окр.ср}$ — температура воздуха с коэффициентом теплоотдачи для воздуха α . Температуры между поверхностями в местах теплового контакта, который предполагается идеальным, обозначены через t_{c2} и t_{c3} .

При стационарном режиме плотность теплового потока постоянна и для всех слоев одинакова. Поэтому можно записать следующие уравнения²:

$$\left\{ \begin{array}{l} q = q_1 = q_2 = q_3; \\ q_1 = \frac{\lambda_1}{\delta_1} \cdot (t_{c1} - t_{c2}); \\ q_2 = \frac{\lambda_2}{\delta_2} \cdot (t_{c2} - t_{c3}); \\ q_3 = \alpha \cdot (t_{c3} - t_{окр.ср}). \end{array} \right.$$

Из этих уравнений определена необходимая толщина изоляции δ_2 для минеральной ваты и аэрогеля. Полученные значения составили 65,8 и 19,09 мм соответственно.

Для проверки аналитических данных, приведенных выше, проведено моделирование эксперимента в программном пакете ANSYS. Основная задача — нахождение температуры на поверхности изоляции, а также визуализация температурного профиля. В ка-

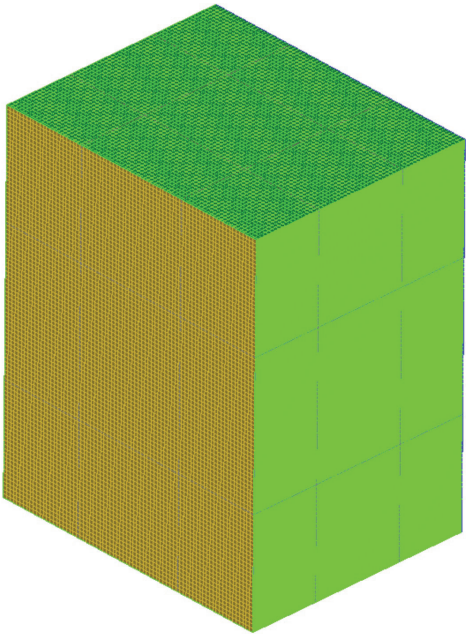
¹ СП 41-103-2000. Проектирование тепловой изоляции оборудования и трубопроводов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200007844>

² Пашинский В.А., Кресова Е.В. Учебно-методический комплекс по учебной дисциплине «Теплопередача». 2016.



Рис. 4. Изображение сетки

Fig. 4. Grid image



честве САПР выбран Autodesk Inventor. Построено тело для потока и слой изоляции, которые в дальнейшем соединены в одну модель.

Первоначальной задачей в ANSYS было построение сетки в модуле ICEM CFD. Прежде чем приступить к построению сетки, требуется проверить геометрию, затем разбить поверхности модели на группы поверхностей, на которые в дальнейшем в ANSYS CFX наложены граничные условия. После разбиения модели на группы поверхностей следовал этап

создания сетки. На каждой из этих частей была построена сетка с одинаковым размером ячеек. На рис. 4 приведены параметры сетки и ее изображение на примере прямоугольника со следующими параметрами: длина 600 мм, ширина 750 мм, высота 950 мм.

Максимальный размер ячейки принят 1 мм, что позволило провести дальнейшее моделирование, так как при большем размере могли появиться неточности, а меньший размер вызывал избыточную нагрузку на систему при вычислении, приводя к ошибкам.

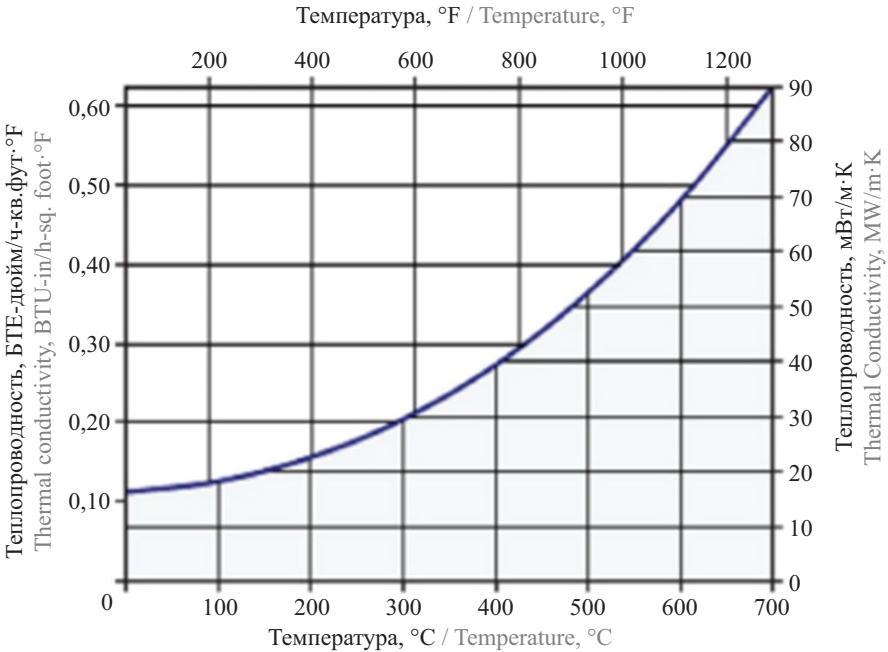


Рис. 5. Значения коэффициента теплопроводности аэрогеля при различных значениях температуры

Fig. 5. Values of aerogel thermal conductivity coefficient at different temperature values

В качестве метода построения сетки выбран Cartesian, что означает квадратная сетка. Толщина тепловой изоляции для температурного режима 350 °С принята: 20 и 50 мм для аэрогеля, 70 и 150 мм для минеральной ваты. Дальнейшая методика расчета описана на примере режима 350 °С.

После загрузки двух пластин возникла необходимость в добавлении материалов. Для настройки параметров 1 пластины (талькомагнезит) заданы следующие параметры: плотность 2800 кг/м³, теплоемкость 800 Дж/кг·К, коэффициент теплопроводности 3,5 Вт/м·К. Величины приняты согласно информации, представленной на сайте камнерезной компании, выпускающей изделия из толькомагнезита³. Для настройки параметров минеральной ваты задан аналогичный набор параметров: плотность 200 кг/м³, теплоемкость 700 Дж/кг·К, а также коэффициент теплопроводности, рассчитанный по следующей формуле: $\lambda = 0,04500 + 0,00021 \cdot t^1$.

Стоит отметить, что для уточнения значения коэффициента теплопроводности при моделировании опыта с аэрогелем величины были приняты согласно информации, представленной на сайте производителя аэрогеля Aspen Aerogels⁴. Зависимость значения коэффициента теплопроводности от температуры показана на рис. 5.

Для моделирования теплообмена с окружающей средой задан коэффициент теплоотдачи для воздуха (принято 10 Вт/м²·К), а также его температура (принято 20 °С). Для осуществления теплообмена между частями общей модели созданы два новых интерфей-

са (Interface Domain) и выбраны стенки тех частей, которые граничат друг с другом. После всех выполненных операций произведена настройка решателя в разделе Solver Control: заданы минимальное (100) и максимальное (1000) количество итераций, которые были проведены во время расчета, и величина сходимости (0,0001).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В результате расчета расчетная модель достаточно быстро вышла на стационарный режим. В течение примерно 10 итераций невязки стали постоянными, тем не менее расчет завершился на 100 итерациях для устранения возможности каких-либо ошибок и наиболее высокой точности. На рис. 6–9 представлены изображения температурных профилей на режимах 350 °С, полученных в результате расчета.

Отдельно необходимо остановиться на сравнении свойств твердотельных и жидких теплоносителей, например воды и толькомагнезита. Несмотря на то, что удельная теплоемкость воды (4,2 кДж/кг·°С) значительно превышает удельную теплоемкость толькомагнезита (0,8 кДж/кг·°С) за счет более высоких плотности (2800 против 1000 кг/м³ у воды) и температуры допустимого нагрева (талькомагнезит можно нагревать до 600 °С и выше против 100–110 °С, которые обычно указываются в паспортах на водяные теплоаккумулирующие емкости), толькомагнезит в конечном счете может оказаться весьма эффективным для небольших по размерам теплоаккумулирующих устройств. В частности, при нагреве 1 дм³ толькомагнезита до температуры 600 °С величина запасаемой тепловой энергии (температура 600 °С выбрана исходя из теплофизических свойств аэрогеля для применения в качестве тепловой изоляции) составит примерно 1,5–1,6 МДж, в то время как для 1 дм³ воды при температуре 100 °С величина запасаемой тепло-

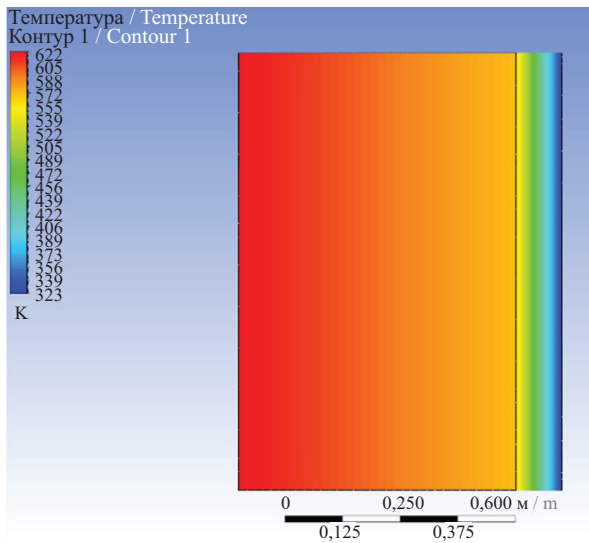
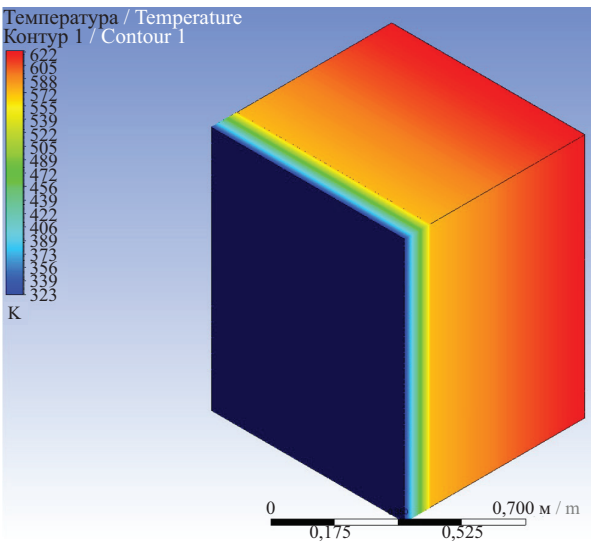


Рис. 6. Температурные профили минеральной ваты (150 мм), 350 °С

Fig. 6. Temperature profiles of mineral wool (150 mm), 350 °С

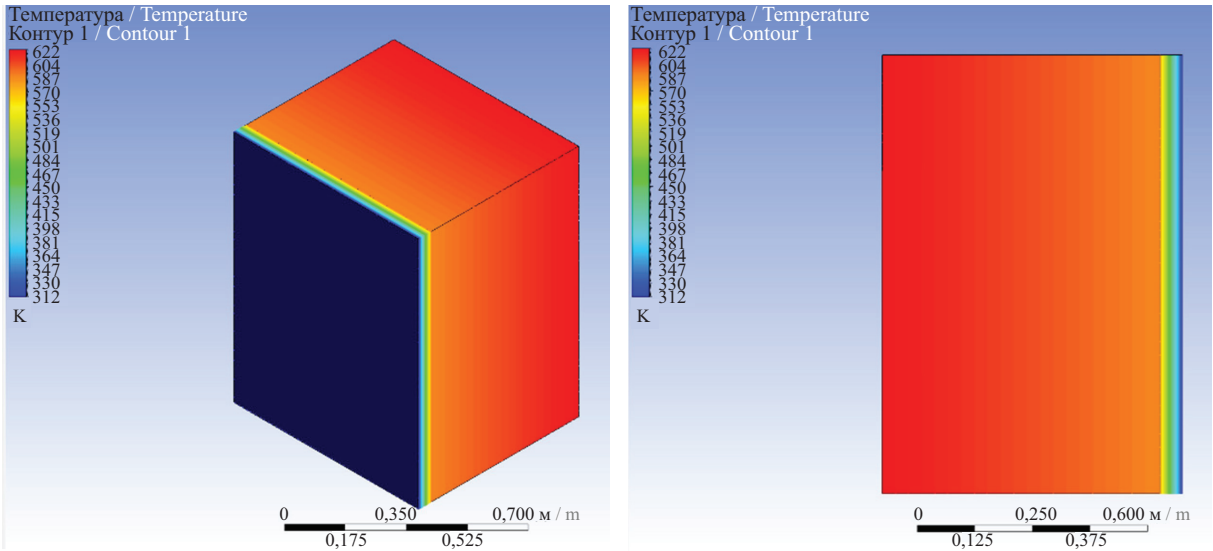


Рис. 7. Температурные профили аэрогеля (50 мм), 350 °С
Fig. 7. Temperature profiles of aerogel (50 mm), 350 °C

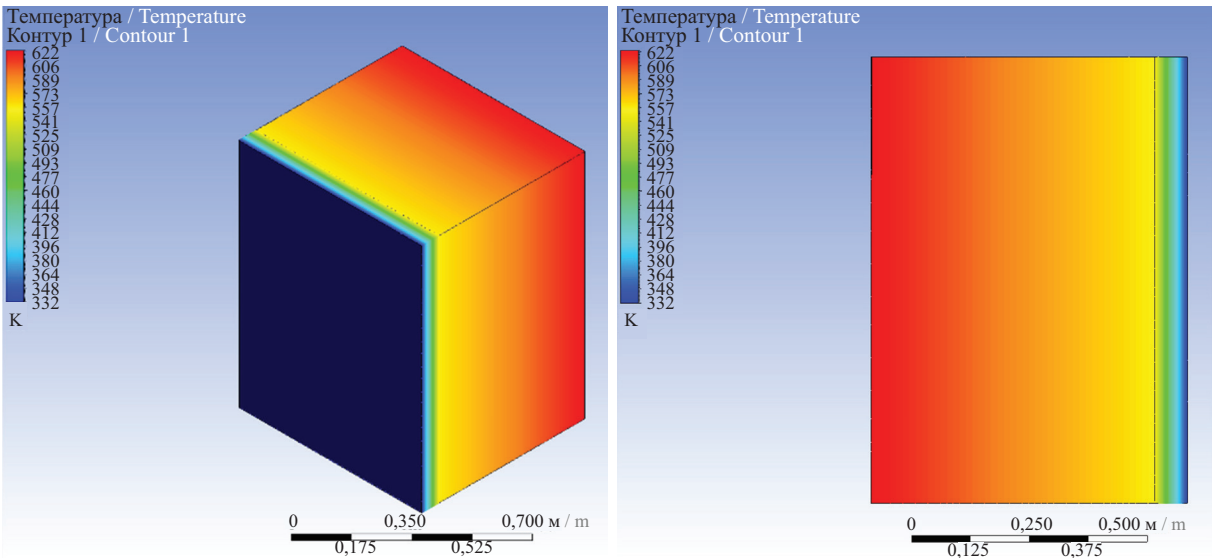


Рис. 8. Температурные профили минеральной ваты (70 мм), 350 °С
Fig. 8. Temperature profiles of aerogel (70 mm), 350 °C

вой энергии будет составлять только 0,4 МДж. Таким образом, количество тепловой энергии в объеме для твердотельных тепловых аккумуляторовкратно выше, чем для жидкостных при условии поддержания высоких температур.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Тепловой аккумулятор дает возможность сбалансированно использовать имеющуюся на объекте электроэнергию с перераспределением в тепловую энергию и последующим хранением и сбалансированным применением (выдачей в теплосеть). Достичь эффективности планируется за счет балансировки электрической нагрузки и теплоотдачи, основанной на интеллектуальном измерении ключевых параме-

тров в режиме реального времени и энергоэффективной конструкции устройства. Также использование устройства теплового аккумулятора целесообразно совместно с ВИЭ, что позволяет накапливать тепловую энергию и избежать переизбытка (всплеска) генерации вырабатываемой электроэнергии, что является важным моментом при использовании генераторов возобновляемой энергии.

По полученным данным в ходе моделирования в программном пакете ANSYS можно сделать следующие выводы:

- во всех случаях для разной толщины изоляции температура поверхности всегда оставалась ниже 60 °С, что позволяет эксплуатировать тепловой аккумулятор в помещении, где могут находиться люди;

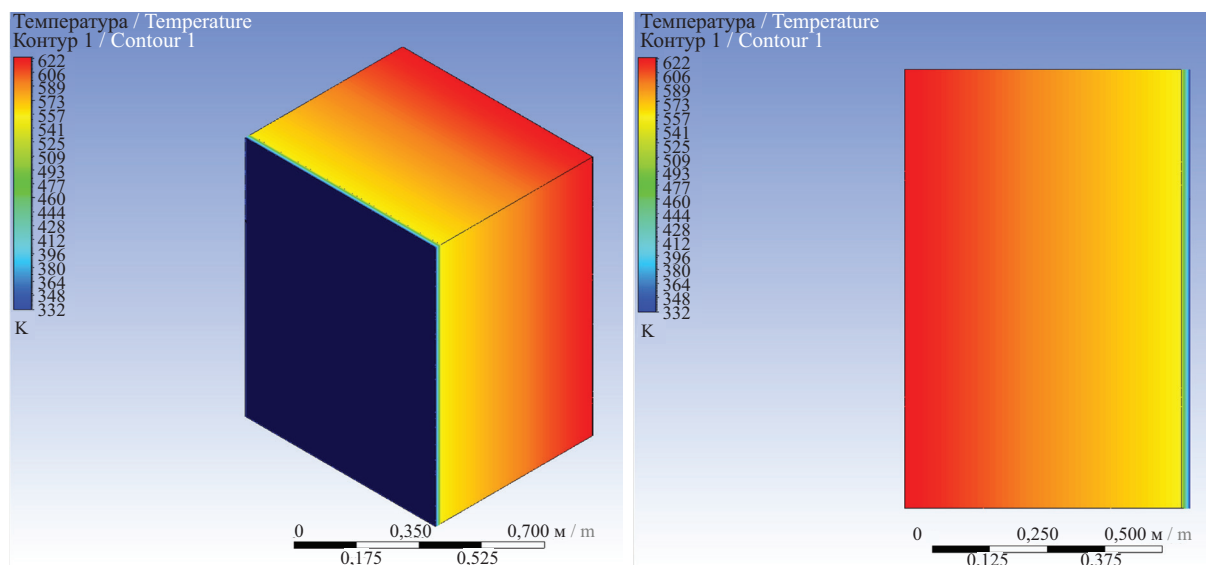


Рис. 9. Температурные профили аэрогеля (20 мм), 350 °C

Fig. 9. Temperature profiles of aerogel (20 mm), 350 °C

• в случае моделирования для минеральной ваты с толщиной изоляции 150 мм и аэрогеля 50 мм температура поверхности оказалась значительно ниже 60 °C, что позволило впоследствии уменьшить толщину слоя изоляции до 70 мм для минеральной ваты и 20 мм для аэрогеля.

Учитывая допущения, сделанные при моделировании эксперимента в программном продукте ANSYS, результаты исследований показывают, что использование тепловой изоляции на основе аэрогеля дает

возможность в несколько раз снизить толщину теплоизолирующего слоя. Несмотря на сложность и дороговизну создания теплоизоляционных материалов на основе аэрогеля, его применение позволит избежать множества проблем, связанных со старением, разрушением и частой заменой тепловой изоляции, снизить нагрузку на теплоизоляционные конструкции и значительно повысить экономическую эффективность теплоэнергетических систем, сократив потери при производстве и передаче тепловой энергии.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Моржухин А.М., Моржухина С.В., Назмитдинов Р.Г., Мойя-Полл А. Теплоаккумулирующие материалы (обзор) // Вестник Международного университета природы, общества и человека «Дубна». Серия: Естественные и инженерные науки. 2016. № 4 (36). С. 24–33. EDN VROIKD.
2. Zalba B., Marín J.M., Cabeza L.F., Mehling H. Review on thermal energy storage with phase change: Materials, heat transfer analysis and applications // Applied Thermal Engineering. 2003. Vol. 23. Issue 3. Pp. 251–283. DOI: 10.1016/S1359-4311(02)00192-8
3. Zhang H., Baeyens J., Cáceres G., Degrevé J., Lv Y. Thermal energy storage: Recent developments and practical aspects // Progress in Energy and Combustion Science. 2016. Vol. 53. Pp. 1–40. DOI: 10.1016/j.pecs.2015.10.003
4. Левина Ю.С., Усачев С.М., Усачев А.М. Получение энергосберегающих строительных материалов на основе традиционного сырья и теплоаккумулирующих добавок // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 4–2 (46). С. 124–126. DOI: 10.18454/IRJ.2016.46.218. EDN VVTKUD.
5. Бабаев Б.Д. Принципы теплового аккумулярования и используемые теплоаккумулирующие материалы // Теплофизика высоких температур. 2014. Т. 52. № 5. С. 760. DOI: 10.7868/S0040364414050019. EDN SKIBBL.
6. Маркин Е.М., Шарнар Н.М. Использование теплового аккумулятора для снижения техногенных тепловых выбросов в окружающую среду // Инновационное развитие техники и технологий в промышленности (ИНТЕКС-2021) : сб. мат. Всерос. науч. конф. молодых исследователей с междунар. участием. 2021. С. 148–152. EDN USENGR.
7. Tian Y., Zhao C.Y. A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications // Applied Energy. 2013. Vol. 104. Pp. 538–553. DOI: 10.1016/j.apenergy.2012.11.051
8. Несов А.Е., Репкин Э.С., Сотникова О.А. Анализ тепловых режимов аккумулярования теплоты // Научный журнал. Инженерные системы и сооружения. 2012. № 2 (7). С. 84–89. EDN NPALAE.
9. Кудабаяев Р.Б., Джумабаев А.А., Сулейменов У.С., Камбаров М.А., Риставлетов Р.А., Калиша

бекова Э.Н. Математическая модель теплообмена при фазовом переходе теплоаккумулирующего материала // Вестник Евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилева. Серия: Технические науки и технологии. 2022. № 2 (139). С. 102–110. DOI: 10.32523/2616-7263-2022-139-2-102-110. EDN HMBBLS.

10. Альбинская Ю.С., Усачев С.М., Ресснер Ф., Рудаков О.Б. Направления создания микрокапсулированных теплоаккумулирующих материалов с фазовым переходом // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Физико-химические проблемы и высокие технологии строительного материаловедения. 2013. № 7. С. 21–27. EDN RYFUET.

11. Яковлева Ю.С., Бирюков А.Н. Моделирование физических характеристик теплоаккумулирующих строительных материалов // Омский научный вестник. 2023. № 2 (186). С. 97–104. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-97-104. EDN XKABVK.

12. Борщев Н.О. Определение эффективной тепловой проводимости тепловых аккумуляторов методами параметрической идентификации // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2024. № 1 (766). С. 101–109. DOI: 10.18698/0536-1044-2024-1-101-109. EDN MXDXAA.

13. Цымбалюк Ю.В., Гераськин М.В. Основы расчета фазопереходных тепловых аккумуляторов для автономной системы теплоснабжения многоквартирных и блокированных жилых домов // Научный журнал. Инженерные системы и сооружения. 2014. № 4–2 (17). С. 71–75. EDN STCGLN.

14. Boboev S.M., Eshmatov M.M., Aitmuratov B. Calculation and experimental study of water distributor of stratification heat accumulator of solar heating system // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2022. № 3 (88). С. 129–137. EDN MYELVA.

15. Умеренкова Э.В., Умеренков Е.В., Бобрышева Д.В. Использование тепловых аккумуляторов для системы теплоснабжения индивидуального жилого дома // Будущее науки – 2018 : сб. науч. ст. 6-й Междунар. мол. науч. конф. 2018. С. 374–377. EDN UOXVNC.

16. Бабаев Б.Д., Мамаев Н.И. Определение тепловой нагрузки системы солнечного теплоснабже-

ния с аккумулятором для жилого дома // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2003. № 2. С. 49–50. EDN HQVBIB.

17. Султангузин И.А., Христенко Б.А., Чайкин В.Ю., Яцок Т.В., Кругликов Д.А., Яворский Ю.В. и др. Разработка и исследование сезонного аккумулятора теплоты и холода для системы энергоснабжения здания // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. 2021. № 3 (231). С. 39–44. EDN PJQWXI.

18. Сенцов И.В., Постникова П.И., Цыгвинцев И.В., Козлова К.С., Шкорко М.Ю., Журович Е.А. и др. Аккумулятор тепла в тепловом аккумуляторе для дежурного отопления индивидуального дома // Синергия наук. 2017. № 9. С. 353–365. EDN YHHYHF.

19. Пральников Д.Ф., Ткаченко В.С., Ващенко Е.С. Вариант включения в систему теплопотребления многоэтажного жилого дома теплового аккумулятора // Наука молодых — будущее России : сб. науч. ст. 8-й Междунар. науч. конф. перспективных разработок молодых ученых. 2023. С. 138–141. EDN XEZWSE.

20. Бабаев Б.Д. Разработка и исследование энергосистем на основе возобновляемых источников с фазопереходным аккумулярованием тепла : дис. М., 2016. 345 с. EDN UMBMEB.

21. Сотникова О.А., Турбин В.С., Григорьев В.А. Аккумуляторы теплоты теплогенерирующих установок систем теплоснабжения // АВОК. 2003. № 5.

22. Melita L., Croitoru C. Aerogel, a high performance material for thermal insulation — a brief overview of the building applications // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 111. P. 06069. DOI: 10.1051/e3s-conf/201911106069

23. Wei T.Y., Lu S.Y. Aerogels for energy saving and storage // Energy Efficiency and Renewable Energy Through Nanotechnology. 2011. Pp. 873–911. DOI: 10.1007/978-0-85729-638-2_25

24. Kong X., Nie R., Yuan J. A review of shape stabilized aerogel-based phase change materials for preparation, classification and applications // Energy and Built Environment. 2023. DOI 10.1016/j.enbenv.2023.11.001

25. Wu L., Zhao B., Gao D., Jiao D., Hu M., Pei G. Solar transparent and thermally insulated silica aerogel for efficiency improvement of photovoltaic/thermal collectors // Carbon Neutrality. 2023. Vol. 2. Issue 1. DOI: 10.1007/s43979-023-00046-8

Поступила в редакцию 18 июня 2024 г.

Принята в доработанном виде 8 ноября 2024 г.

Одобрена для публикации 8 ноября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: Александр Валерьевич Федюхин — кандидат технических наук, доцент; Национальный исследовательский университет «МЭИ» (НИУ «МЭИ»); 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1; РИНЦ ID: 729038, Scopus: 55940977500, ResearcherID: T-8964-2019, ORCID: 0000-0002-1819-0450; fedukhinav@yandex.ru;

Владислав Александрович Карасевич — кандидат технических наук, доцент; Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губ-

кина (РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина); 119991, г. Москва, пр-т Ленинский, д. 65, корп. 1; РИНЦ ID: 337965, Scopus: 36237431700, ResearcherID: U-1498-2017; crucian-74@mail.ru;

Михаил Сергеевич Повернов — ведущий инженер; **Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (МФТИ)**; 117303, г. Москва, ул. Керченская, д. 1 А, корп. 1; Scopus: 58644005600; 8@1024.su;

Ольга Валерьевна Афанасьева — кандидат технических наук, заместитель руководителя Центра трансфера технологий; **Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)**; 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, литера Б; РИНЦ ID: 617556, Scopus: 57212263097, ResearcherID: P-9204-2017, ORCID: 0000-0002-6614-2728; eccolga@mail.ru.

Вклад авторов:

Федюхин А.В. — идея, написание исходного текста.

Карасевич В.А. — написание исходного текста.

Повернов М.С. — проведение расчетов, сбор и обработка результатов, написание статьи.

Афанасьева О.В. — редакторская правка, оформление статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Morzhukhin A.M., Morzhukhina S.V., Nazmitdinov R.G., Moia-Pol A. Heat storage materials. Bulletin of Dubna International University for Nature, Society, and Man. *Series: Natural and Engineering Sciences*. 2016; 4(36):24-33. EDN VROIKD. (rus.).
2. Zalba B., Marín J.M., Cabeza L.F., Mehling H. Review on thermal energy storage with phase change: Materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering*. 2003; 23(3):251-283. DOI: 10.1016/S1359-4311(02)00192-8
3. Zhang H., Baeyens J., Cáceres G., Degre J., Lv Y. 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
4. Levina J.S., Usachev S.M., Usachev A.M. Getting energy-saving building materials based on traditional raw materials and heat-retaining additives. *International Research Journal*. 2016; 4-2(46):124-126. DOI: 10.18454/IRJ.2016.46.218. EDN VVTUKD. (rus.).
5. Babaev B.D. Principles of heat accumulation and heat-accumulating materials in use. *Teplofizika Vysokikh Temperatur*. 2014; 52(5):760. DOI: 10.7868/S0040364414050019. EDN SKIBBL. (rus.).
6. Markin E.M., Sharpar N.M. Use of thermal accumulator to reduce man-made thermal emissions into the environment. *Innovative development of equipment and technologies in industry (INTEX-2021) : collection of materials of the All-Russian scientific conference of young researchers with international participation*. 2021; 148-152. EDN USENGR. (rus.).
7. Tian Y., Zhao C.Y. A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications. *Applied Energy*. 2013; 104:538-553. DOI: 10.1016/j.apenergy.2012.11.051
8. Nesov A.E., Repkin E.S., Sotnikova O.A. Analysis of thermal regimes of heat accumulation. Scientific Journal. *Engineering Systems and Structures*. 2012; 2(7):84-89. EDN NPALAE. (rus.).
9. Kudabaev R.B., Jumabayev A.A., Suleimenov U.S., Kambarov M.A., Ristavletov R.A., Kalshabekova E.N. Mathematical model of heat transfers during phase transition of heat storage material. *Bulletin of L.N. Gumilyov Eurasian National University Technical Science and Technology Series*. 2022; 2(139):102-110. DOI: 10.32523/2616-7263-2022-139-2-102-110. EDN HMBBLS. (rus.).
10. Albinskaya Y.S., Usachev S.M., Roessner F., Rudakov O.B. The directions of creation of the micro-capsulated heat-retaining materials with phase transition. Scientific Bulletin of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. *Series: Physico-chemical problems and high technologies of building materials science*. 2013; 7:21-27. EDN RYFUET. (rus.).
11. Yakovleva Yu.S., Biryukov A.N. Modeling of physical characteristics of heat-accumulating building materials. *Omsk Scientific Bulletin*. 2023; 2(186):97-104. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-97-104. EDN XKABVK. (rus.).
12. Borschev N.O. Determination of the thermal battery effective thermal conductivity by the parametric identification methods. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2024; 1(766):101-109. DOI: 10.18698/0536-1044-2024-1-101-109. EDN MXDXAA. (rus.).
13. Cymbalyuk Yu.V., Geraskin M.V. Basics of calculation of phase-change thermal accumulators for autonomous heat supply system of single-family and block residential buildings. Scientific Journal. *Engineering Systems and Structures*. 2014; 4-2(17):71-75. EDN STCGLN. (rus.).
14. Boboev S.M., Eshmatov M.M., Ajtmuratov B. Calculation-experimental study of water distributor of stratification heat accumulator of solar heating system. Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. *Construction and Architecture*. 2022; 3(88):129-137. EDN MYELVA. (rus.).

15. Umerenkova E.V., Umerenkov E.V., Bobrysheva D.V. Use of thermal accumulators for the heat supply system of an individual residential building. *Future of Science – 2018 : collection of scientific articles of the 6th International Youth Scientific Conference*. 2018; 3:374-377. EDN UOXVNC. (rus.).
16. Babaev B.D., Mamaev N.I. Determination of the heat load of a solar thermal system with accumulator for a residential building. University News. North-Caucasian Region. *Technical Sciences Series*. 2003; 2:49-50. EDN HQVBIB. (rus.).
17. Sultanguzin I.A., Khristenko B.A., Chaykin V.Yu., Yatsyuk T.V., Kruglikov D.A., Yavorovsky Yu.V. et al. Development and research of seasonal heat and cold storage for building energy supply system. *Plumbing, Heating and Air Conditioning*. 2021; 3(231):39-44. EDN PJQWXI. (rus.).
18. Sentsov I.V., Postnikova P.I., Tsygvintsev I.V., Kozlova K.S., Shkorko M.Yu., Zhurovich E.A. et al. Heat storage in a thermal accumulator for duty heating of an individual house. *Synergy of Sciences*. 2017; 9:353-365. EDN YHHYHF. (rus.).
19. Pralnikov D.F., Tkachenko V.S., Vashenko E.S. Variant of including a heat accumulator in the heat consumption system of a multi-storey residential building. *Science of the young — the future of Russia : collection of scientific articles of the 8th International Scientific Conference of Advanced Developments of Young Scientists*. 2023; 138-141. EDN XEZWSE. (rus.).
20. Babaev B.D. *Development and research of energy systems based on renewable sources with phase-transient heat storage : dissertation*. Moscow, 2016; 345. EDN UMBMEB. (rus.).
21. Sotnikova O.A., Turbin B.C., Grigorev V.A. Heat accumulators of heat generating units of heat supply systems. *ABOK*. 2003; 5. (rus.).
22. Melita L., Croitoru C. Aerogel, a high performance material for thermal insulation — a brief overview of the building applications. *E3S Web of Conferences*. 2019; 111:06069. DOI: 10.1051/e3sconf/201911-106069
23. Wei T.Y., Lu S.Y. Aerogels for Energy Saving and Storage. *Energy Efficiency and Renewable Energy Through Nanotechnology*. 2011; 873-911. DOI: 10.1007/978-0-85729-638-2_25
24. Kong X., Nie R., Yuan J. A review of shape stabilized aerogel-based phase change materials for preparation, classification and applications. *Energy and Built Environment*. 2023. DOI: 10.1016/j.enbenv.2023.11.001
25. Wu L., Zhao B., Gao D., Jiao D., Hu M., Pei G. Solar transparent and thermally insulated silica aerogel for efficiency improvement of photovoltaic/thermal collectors. *Carbon Neutrality*. 2023; 2(1). DOI: 10.1007/s43979-023-00046-8

Received June 18, 2024.

Adopted in revised form on November 8, 2024.

Approved for publication on November 8, 2024.

B I O N O T E S : **Alexander V. Fedyukhin** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; **National Research University “Moscow Power Engineering Institute” (MPEI)**; build. 1, 14 Krasnokazarmennaya st., Moscow, 111250, Russian Federation; ID RSCI: 729038, Scopus: 55940977500, ResearcherID: T-8964-2019, ORCID: 0000-0002-1819-0450; fedyukhinav@yandex.ru;

Vladislav A. Karasevich — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; **Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University) (Gubkin University)**; build. 1, 65 Leninsky prospekt, Moscow, 119991, Russian Federation; ID RSCI: 337965, Scopus: 36237431700, ResearcherID: U-1498-2017; crucian-74@mail.ru;

Mihail S. Povernov — leading engineer; **Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)**; build. 1, 1 A Kerchenskaya st., Moscow, 117303, Russian Federation; Scopus: 58644005600; 8@1024.su;

Ol'ga V. Afanas'eva — Candidate of Technical Sciences, Deputy Head of the Technology Transfer Center; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 B Polytechnicheskaya st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation; ID RSCI: 617556, Scopus: 57212263097, ResearcherID: P-9204-2017, ORCID: 0000-0002-6614-2728; eccolga@mail.ru.

Contribution of the authors:

Alexander V. Fedyukhin — idea, writing the original text.

Vladislav A. Karasevich — writing the original text.

Mihail S. Povernov — carrying out calculations, collecting and processing results, writing the article.

Ol'ga V. Afanas'eva — editing, design of the article.

The authors declare no conflict of interest.