

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.12.1977-1988

Анализ перспектив применения материалов с фазовым переходом в строительных конструкциях

Александр Валерьевич Федюхин¹, Ольга Валерьевна Афанасьева²,
Марк Дмитриевич Зайцев¹

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

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ);

г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Задачей исследования является анализ перспектив применения материалов с фазовым переходом (МФП) в строительных конструкциях. Актуальность обусловлена отраслевой тенденцией на снижение потребления тепловой энергии зданиями за счет применения современных теплоизоляционных материалов и ограждающих конструкций. В качестве объекта исследования выбраны МФП, производимые в промышленных объемах и применяемые в строительстве в зарубежных странах. Способность данных материалов поглощать и выделять тепловую энергию может быть использована для улучшения тепловых характеристик зданий. Анализ возможности применения МФП в строительных конструкциях проведен для трех городов Российской Федерации: Москвы, Санкт-Петербурга и Сочи.

Материалы и методы. Оценка эффективности использования МФП в строительных конструкциях выполнена посредством энергетического моделирования здания по алгоритму Conduction Finite Difference в программе EnergyPlus с учетом климатических условий и потребления энергии на отопление и охлаждение здания. Расчет осуществлен для конструкций, включающих МФП (три различных материала с фазовым переходом), и без них.

Результаты. Определены значения потребления энергии на отопление и охлаждение помещения, абсолютная и относительная экономия энергии от применения МФП.

Выводы. Проведенный анализ показал, что энергетический и экономический эффект от применения МФП в строительных конструкциях составляет от 2 до 13 % и зависит как от типа материала, так и от региона применения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: материалы с фазовым переходом, энергоэффективность, аккумулирование тепловой энергии, строительные конструкции, EnergyPlus, энергопотребление, теплофизические свойства, температура фазового перехода

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания № 075-01262-22-01 от 28.01.2022 (дополнительное соглашение № 075-03-2022-151/1 от 31.01.2022, № 075-03-2023-291/1 от 28.02.2023). Авторы выражают благодарность анонимному рецензенту за содержательную рецензию и редактору, помогающему оформить статью.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Федюхин А.В., Афанасьева О.В., Зайцев М.Д. Анализ перспектив применения материалов с фазовым переходом в строительных конструкциях // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 12. С. 1977–1988. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.12.1977-1988

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

Analysis of the prospects of phase change materials in building structures

Alexander V. Fedyukhin¹, Olga V. Afanaseva², Mark D. Zaitsev¹

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

² Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU); St. Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The objective of the study is to analyze the prospects of application of phase change materials in building structures. The relevance of the work is due to the industry trend to reduce the consumption of heat energy by buildings through the use of modern thermal insulation materials and enclosing structures. Phase change materials produced in industrial volumes and used in construction in foreign countries are chosen as the object of research. The ability of these materials to absorb and release heat energy can be used to improve the thermal characteristics of buildings. Analysis of the possibility of using these materials in building structures was carried out for three cities of the Russian Federation: Moscow, St. Petersburg and Sochi.

Materials and methods. The efficiency of the use of phase change materials in building structures was carried out by means of energy modelling of the building using the Conduction Finite Difference algorithm in the EnergyPlus programme, taking into account climatic conditions and energy consumption for heating and cooling of the building. The calculation was performed for structures including phase change materials (3 different materials with phase change), and without them.

Results. The values of energy consumption for space heating and cooling, absolute and relative energy savings from the use of phase change materials were determined.

Conclusions. The analysis showed that the energy and economic effect from the application of materials with phase change in building structures is from 2 to 13 % and depends on both the type of material and the region of application.

KEYWORDS: phase change materials, energy efficiency, heat energy storage, building structures, EnergyPlus, energy consumption, thermophysical properties, phase transition temperature

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. 075-01262-22-01 from 28 January 2022 (Additional agreement 075-03-2022-151/1 from 31 January 2022, No. 075-03-2023-291/1 from 28.02.2023). The authors are grateful to the anonymous reviewer for the informative review and the editor who helps to prepare the article.

FOR CITATION: Fedyukhin A.V., Afanaseva O.V., Zaitsev M.D. Analysis of the prospects of phase change materials in building structures. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(12):1977-1988. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.12.1977-1988 (rus.).

Corresponding author: Olga V. Afanaseva, eccolga@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Одна из актуальных задач, стоящих в том числе перед отраслью жилищно-коммунального хозяйства, — решение вопросов энергосбережения и повышения энергоэффективности зданий. В этом аспекте одним из возможных решений, которое позволяет снизить энергопотребление зданий, является использование в конструкциях помещений материалов с фазовым переходом (МФП).

Материалы с фазовым переходом представляют собой класс веществ, которые могут подвергаться обратимым фазовым переходам между твердой и жидкой фазами в определенном диапазоне температур. Во время фазового перехода материал поглощает или выделяет большое количество скрытой теплоты, не испытывая значительного изменения температуры.

Сохранение скрытой теплоты может быть достигнуто путем изменения состояния вещества из жидкого в твердое, твердого в жидкое, твердого в газообразное и жидкого в газообразное. Однако для МФП практически применимы только фазовые переходы: твердое → жидкое и жидкое → твердое. Хотя переходы жидкость → газ имеют более высокую теплоту превращения, чем переходы твердое тело → жидкость, фазовые переходы жидкость → газ нецелесообразны для аккумуляции тепла, поскольку для хранения материалов в их газовой фазе требуются большие объемы или высокое давление. Переходы между твердыми фазами обычно очень медленные и имеют относительно низкую теплоту превращения.

Аккумуляции тепловой энергии с использованием МФП уделяется значительное внимание в последние десятилетия. Преимущества применения МФП — относительно высокая объемная и массовая плотность хранения тепловой энергии (в 5–14 раз выше по сравнению с аккумулирующими жидкостями [1]), постоянная температура фазового перехода, химическая стабильность и экономическая эффективность. Свойства таких веществ должны отвечать следующим требованиям:

- температура фазового перехода МФП находится в диапазоне рабочей температуры системы

охлаждения или нагрева, давление близко к атмосферному;

- высокая удельная теплота плавления;
- высокая теплопроводность;
- высокая плотность;
- незначительное изменение объема во время фазового перехода;
- низкая степень переохлаждения;
- невысокая коррозионная активность по отношению к конструкционным материалам;
- химическая стабильность, отсутствие деградации в процессе эксплуатации и стабильность циклов фазовых переходов;
- нетоксичность и негорючесть;
- экологическая безопасность, в первую очередь, нулевые или близкие к нулевым потенциалы разрушения озонового слоя и глобального потепления;
- доступность и невысокая стоимость [2].

Поскольку материала, который одновременно удовлетворял бы всем положительным критериям, не существует, выбор МФП — это компромисс между его положительными и отрицательными качествами. При анализе свойств и определении технико-экономической целесообразности их применения для накопления тепловой энергии следует учитывать, что параметры работы систем охлаждения или нагрева, схемные решения могут усиливать влияние на эффективность установок и свойства веществ и нивелировать их отрицательные качества.

Существует два основных класса МФП: органические (углеродсодержащие) материалы и гидраты солей. Отдельно выделяют эвтектики (эвтектические смеси жирных кислот и гидратов солей), которые могут как полностью состоять из органических или неорганических соединений, так и содержать органику и неорганику одновременно.

Примеры органических МФП включают карбонаты, некоторые жирные кислоты, парафины, полимеры. Органические МФП обычно дороже неорганических, большинство парафинов являются побочными продуктами нефтеперерабатывающих заводов и поэтому доступны в изобилии, но по относительно высокой цене. Органические МФП имеют

меньшую скрытую теплоту и часто больший диапазон плавления, но зачастую горючи. Теплопроводность также уступает гидратированным солям, что ограничивает теплообмен, скорость зарядки и разрядки тепловых аккумуляторов. Методы интенсификации теплоотдачи включают диспергирование частиц (медь, алюминий, графит и т.д.) в МФП, его пропитку высокопроводящими пористыми материалами (графитовая матрица или металлические пены) или вставку волокнистых материалов, таких как углеродные волокна или нановолокна. С другой стороны, они имеют преимущества, заключающиеся в простоте использования, химической стабильности, неагрессивности, меньшем изменении объема во время фазового перехода, отсутствии явлений переохлаждения (разность температур фазовых переходов «твердое тело – жидкость» и «жидкость – твердое тело»).

Более того, некоторые органические МФП, например жирные кислоты, можно получить из возобновляемого или повторно используемого сырья, такого как животный жир и растительность, например говяжий жир, сало, пальмовое масло, кокосовое масло и соевые бобы (МФП на биологической основе). Преимущества жирных кислот включают конгруэнтное плавление и охлаждение, высокую скрытую теплоту плавления, низкую стоимость, огнестойкость, нетоксичность, незначительное переохлаждение и изменение объема, хорошую химическую и термическую стабильность после большого количества термических циклов и быстрое разложение при утилизации, что уменьшает воздействие на окружающую среду в конце срока службы. Помимо этого, температуру плавления можно свободно регулировать, выбирая правильную комбинацию эвтектических смесей. Наконец, МФП на жировой и масляной основе могут быть вдвое дешевле, чем парафиновые, которые в настоящее время производятся из сырой нефти, а в процессе их производства выделяется гораздо меньше выбросов CO_2 .

Гидратам солей и эвтектикам посвящено много исследований в силу относительно больших величин их удельной теплоты фазового перехода, теплопроводности (0,4–0,7 Вт/(м·К)) и плотности хранения энергии, а также приемлемым температурным диапазоном изменения фаз. Они не подвержены горению и недорого. К их главным недостаткам относятся: расслаивание на границе раздела фаз при фазовых переходах, что приводит к нестабильности циклов фазовых переходов, относительно большие значения переохлаждения и коррозия. Наличие продуктов коррозии в композициях также может приводить к нарушению стабильности циклов [3].

Как органические, так и неорганические материалы получают значительные преимущества при применении нанотехнологий, и в настоящее время ведутся более многообещающие разработки. Включение наноматериалов может значительно улучшить

некоторые характеристики накопления тепла, такие как теплопроводность (особенно для органических МФП с худшими характеристиками), скорость замерзания/плавления и термостабильность.

Органические МФП выигрывают от добавления наноматериалов, таких как наночастицы меди, серебра, графена или графитовые нановолокна. Добавки обеспечивают повышение теплопроводности и скорости фазового перехода за счет незначительных потерь скрытой энтальпии. Например, добавление 2 % наночастиц графена увеличивает проводимость на 63 %, но снижает энтальпию фазового перехода на 8,7 % [4]. Что касается гидратированных солей, то добавление наночастиц в основном исследуется как метод устранения явлений переохлаждения, но может иметь положительные преимущества и в отношении других факторов. В случае хлорида бария добавление 1,13 % наночастиц диоксида титана приводит к увеличению теплопроводности на 15,65 %, повышению скоростей замерзания и плавления.

В целом применение наноматериалов для МФП может быть полезным с точки зрения улучшения характеристик накопления тепла, достижения производства материалов с желаемыми тепловыми, физическими и химическими свойствами и снижения воздействия на окружающую среду. Однако, как и при всех технологических прорывах, возникает ряд проблем, таких как правильная и безопасная утилизация или выгрузка синтетических наноматериалов и связанных с ними побочных продуктов, опасный характер некоторых химических компонентов, необходимых для приготовления наноматериалов, проблемы агломерации и агрегации наночастиц в суспензиях МФП, проблемы безопасности, связанные с контактом человека с наночастицами, и отсутствие стандартизации в характеристике улучшения производительности нановстроенных МФП.

Конечное потребление энергии в жилых домах в 2018 г. составило более 70 % от общемирового. В европейских странах на долю многоквартирных домов приходится почти половина всего жилищного фонда [5]. По данным Федеральной службы государственной статистики России на начало 2021 г. около 70 % населения страны проживало в многоквартирных домах. Высотные здания часто сталкиваются с серьезными проблемами с точки зрения энергоэффективности. Одной из наиболее распространенных причин является температурный дискомфорт в помещении, вызванный ежедневными колебаниями температуры. Значительные перепады температур в умеренной климатической зоне приводят к высоким энергозатратам на кондиционирование воздуха или отопление. Более того, большое влияние имеет расположение квартиры относительно сторон света. В частности, ориентация здания влияет на приток тепла солнечным излучением.

Среди методов, которые могут снизить энергопотребление здания, выделяется использование материалов с фазовым переходом. Использование МФП в зданиях снижает потребление энергии от источников тепла за счет использования теплоты, которая поглощается или выделяется посредством фазовых переходов при определенных температурах. Один из способов заключается в том, чтобы смешивать МФП непосредственно со строительными материалами. Существуют исследования, посвященные повышению энергоэффективности путем применения таких материалов как для внутренних работ, так и для наружных стен или крыш [6–10].

В статье [11] рассматриваются возможности использования материалов с фазовым переходом в строительстве для улучшения терморегуляции зданий. Авторы представляют новый подход к созданию кирпичей с МФП, который может применяться для повышения энергоэффективности зданий. Экспериментально определяется теплопроводность и теплоемкость новых кирпичей с МФП, а также с помощью моделирования их термической производительности. Были проведены эксперименты при различных температурах и скоростях нагрева/охлаждения. В результате авторы пришли к выводу, что созданные кирпичи с МФП обладают высокой термической инерцией, что может привести к более эффективному использованию энергии для отопления и охлаждения зданий. Они также обнаружили, что теплоемкость кирпичей с МФП значительно выше, чем у обычных кирпичей. Кроме того, при использовании кирпичей с МФП наблюдалось более равномерное распределение температуры внутри здания.

В работе [12] описывается экспериментальное исследование использования материалов с фазовым переходом для снижения нагрева крыши зданий в климатических условиях Кувейта. Предлагается использовать бетонную крышу с цилиндрическими отверстиями, заполненными МФП, для увеличения теплоемкости крыши и снижения температуры внутри здания. Эксперимент проводился на двух крышах, одна из которых была традиционной, другая — модифицированной. Результаты эксперимента показали, что температура внутри модифицированной крыши была на несколько градусов ниже, чем в традиционной. Кроме того, использование МФП снизило время нагрева и охлаждения крыши. Для рассмотренных в работе случаев тепловой поток на внутренней поверхности крыши снижался на 9–17 % в зависимости от выбранного МФП, времени и месяца.

Статья [13] посвящена изучению возможности прямого включения бутилстеарата в качестве МФП в состав бетона для увеличения энергоэффективности зданий. В ходе эксперимента были изготовлены образцы бетона с различным содержанием МФП (от 1 до 10 %) и проведены тесты на определение

теплоемкости, теплопроводности и коэффициента теплоотдачи. Результаты показали, что добавление материалов с фазовым переходом в бетон может значительно увеличить его теплоемкость и задерживать тепло на длительное время. Также была проверена долгосрочная стабильность бутилстеарата. Испытание на термоциклирование показало, что после 800 циклов температура плавления осталась постоянной. Потери прочности на сжатие были значительными с увеличением содержания МФП. Однако бетон с содержанием бутилстеарата до 5 % масс. имел прочность на сжатие 40 Н/мм², что составляет выше рекомендуемого значения для большинства конструктивных целей.

Ученые F. Goia, M. Perino и V. Serra [14] выполнили полномасштабное испытание прототипа остекления с МФП. Испытание проведено на южной стене летом, зимой и в межсезонье. Результаты сравнивались с обычным двойным остеклением. Определено, что остекление МФП способно снизить потребление энергии летом на 20–55 %. Зимой подобная технология была менее эффективна. Однако, когда парафин полностью плавится слишком рано, то температура оконных стекол и поступающие тепловые потоки значительно увеличиваются и могут в определенной степени ухудшить работу оконной системы. Необходимо принимать во внимание и тепло, выделяемое остеклением МФП в ночное время. Такая тепловая энергия в определенных условиях может быть нежелательна и должна быть удалена до следующего дня. Этот факт показывает, что нельзя просто использовать современные материалы, требуются также подходящие стратегии интеграции с существующими системами в здании (например, вентиляция/ночное охлаждение).

Несмотря на то что несколько параметров обеспечивают эффективность МФП, почти во всех исследованиях приходят к выводу, что температура плавления является наиболее важным. Следовательно, необходимо учитывать климатические условия. Значительно осложняет подбор и применение материалов с фазовым переходом в реальных условиях серьезных изменений климатических факторов в течение года, особенно в умеренном поясе.

В то время как основная задача МФП предназначена для снижения летнего перегрева, нельзя пренебрегать их влиянием на регулирование температуры в зимний и переходный периоды. Одной из проблем интеграции МФП в зданиях является оптимизация материала для работы в течение всего года, поскольку исследования показали, что материалы с температурой плавления, выбранной на основе летних граничных условий, не работают в другие сезоны. В публикациях [15–17] также рассмотрели недостаточную эффективность одной точки плавления МФП для работы в течение всего года и предложили оптимизировать МФП использованием гибридных систем с двумя или более точками плав-

ления. Например, М. Kheradmand и др. [18] представили гибридный раствор МФП, использующий четыре различные температуры плавления. Предлагаемый гибридный раствор МФП был разработан с учетом более широкого диапазона температур плавления, чтобы соответствовать тепловым условиям зимой и летом в климате Португалии. В труде [19] протестировали применение двух различных температур плавления МФП в модуле адаптивного фасада. Один слой МФП ближе к внешней стороне фасадного модуля с температурой плавления 27 °С для летнего сезона, другой слой МФП ближе к внутренней стороне с температурой плавления 23 °С для зимних условий.

В исследовании [20] проанализирован эффект от применения МФП при реконструкции многоэтажного жилого дома в климате Торонто и Ванкувера. В моделировании использовано здание с наружными стенами из панелей с экструдированным пенополистиролом, каждый этаж состоял из четырех комнат размером 5 × 5 × 3 м. Использован МФП с температурой плавления 25 °С, и выполнены три комбинации: без МФП, с МФП на полу и с МФП на полу и стенах. В расчетах также была учтена работа приточной вентиляции. Результаты показали, что использование МФП на полу и стенах может привести к экономии энергии на охлаждение от 15,8 до 59,4 % в зависимости от климата и ориентации комнаты. Применение МФП в зимний период привело только к небольшому снижению спроса на отопление (не более 6 %).

Другое исследование, проведенное S. Soudian и U. Berardi [21], рассматривало совместную работу МФП и панелей Energain, имеющих разные температуры плавления, в ячейках, представляющих собой уменьшенные версии квартир. Материалы с фазовым переходом были интегрированы в стены и потолок. Результаты эксперимента показали, что использование МФП и панелей Energain привело к снижению температуры воздуха в тестовой ячейке на 47 % днем и повышению на 29 % ночью по сравнению с контрольной ячейкой. Так как среднегодовые температуры Москвы и Торонто практически не отличаются, то это позволяет экстраполировать результаты исследования на нашу страну.

Актуальность работы обусловлена отраслевой тенденцией на снижение потребления тепловой энергии зданиями за счет применения современных теплоизоляционных материалов и ограждающих конструкций. На основании обзора литературных источников можно заключить, что зарубежными специалистами уделяется повышенное внимание синтезу различных МФП для применения их в строительных конструкциях в качестве тепловой изоляции и накопителя тепловой энергии. Цель настоящего исследования заключается в анализе эффективности применения данных материалов в условиях климата, характерного для различных

регионов европейской части РФ. Понятие эффективность в данном контексте характеризуется величиной снижения потребления энергии на нужды отопления или охлаждения здания в соответствующий период года. Для достижения данной цели была построена модель здания в программе EnergyPlus с расчетом его теплопотребления в Москве, Санкт-Петербурге и Сочи. При этом вопросы непосредственно синтеза МФП лежат вне рамок настоящего исследования, для расчета приняты теплофизические свойства трех образцов на основании литературных источников.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для оценки эффективности применения МФП в некоторых регионах России было проведено энергетическое моделирование зданий в программе EnergyPlus, расположенных в Москве, Санкт-Петербурге и Сочи, с учетом климатических условий и потребления энергии на отопление и охлаждение здания. С помощью OpenStudio построена геометрия здания площадью 450 м² со стенами длиной 30 м, шириной 15 м и высотой 5 м. В здании имеется 12 квадратных окон площадью 2,25 м² каждое и двое металлических ворот общей площадью 32 м². На рис. 1 представлено изображение построенной геометрии.

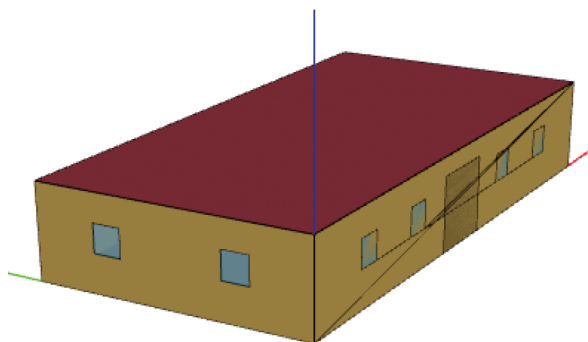


Рис. 1. Изображение геометрии здания

Fig. 1. Image of the building geometry

В качестве материала стен был взят кирпич рядовой керамический полнотелый М100 красный (250 × 120 × 65 мм), толщина стен — 250 мм, коэффициент теплопроводности — 0,572 Вт/м·К. На внутреннюю поверхность стены была нанесена штукатурка известковая слоем толщиной 20 мм, коэффициент теплопроводности — 0,7 Вт/м·К. Для крыши, окон и металлических ворот использовались стандартные конструкции для исследуемой климатической зоны, представленные в библиотеке компонентов программы.

Условно принято, что помещение является производственным. Соответственно, требовалось

задать необходимые нагрузки, такие как: мощность электрооборудования, освещения и количество теплоты, выделяемое людьми во время работы. Мощность электрооборудования задана 4000 Вт, мощность освещения — 1400 Вт. Количество людей, постоянно работающих в помещении, принято равным четырем. Каждый из них выделяет 132 Вт тепловой энергии.

Предположим, что в будние дни с 8:00 до 18:00 в помещении находится персонал. Значит, для освещения и функционирования электрооборудования задается такое расписание, что они работают только в этот промежуток времени. Таким же образом задано расписание для естественной вентиляции помещения, с той лишь разницей, что если температура в помещении достигает 20 °С, то вентиляция прекращается. Вне отопительного сезона вентиляция работает на половину мощности в нерабочее время, кроме выходных. Время для отопительного сезона выбрано с 1 октября по 1 мая. В модели реализована центральная система отопления с температурой подающего трубопровода — 95 °С, обратного — 70 °С, пиковая мощность составляет 50 кВт, что позволяет температуре в самую холодную пятидневку не опускаться ниже 20 °С в любом из регионов. Также до-

бавлена возможность регулирования мощности для поддержания установленной температуры в 22 °С.

В здании установлена система кондиционирования с автоматически подбираемой мощностью для текущих условий. Она может работать только вне отопительного сезона и настроена таким образом, что включается в случае, если температура помещения превышает 22 °С, и выключается, когда охладит помещение до 20 °С. Система доступна только в то время, когда в здании находятся люди, соответственно, она имитирует ручное управление кондиционером.

В расчете сравнивалось три различных МФП, производимых в промышленных объемах и применяемых в строительстве. Характеристики материалов были приняты на основании статьи [22]. Показатели в объеме, необходимом для моделирования, приведены в табл. 1.

Поскольку объектом исследования являются материалы, основное преимущество которых заключено в способности аккумулировать тепло, то для корректных результатов в модели требуется учитывать значительное изменение энтальпии при нагреве. На рис. 2 показана зависимость энтальпии материала от его температуры, которая определяет функцию энтальпия – температура [22]:

$$h_i(T_i) = HTF(T_i). \quad (1)$$

Табл. 1. Теплофизические свойства МФП

Table 1. Thermophysical properties of PCM

Вид материала [22] Type of material [22]	Свойства материала* [22] / Material properties* [22]		
	λ , Вт/м·К / λ , W/m·K	C_p , кДж/кг·К / C_p , kJ/kg·K	ρ , кг/м ³ / ρ , kg/m ³
МФП 1 / PCM 1	0,14–0,18	2,5	855
МФП 2 / PCM 2	0,125–0,2	2,1	860
МФП 3 / PCM 3	0,9–1,1	2,65	1440

Примечание: * λ — коэффициент теплопроводности, Вт/м·К; C_p — изобарная теплоемкость, кДж/кг·К; ρ — плотность, кг/м³.

Note: * λ — heat conductivity coefficient, W/m·K; C_p — isobaric heat capacity, kJ/kg·K; ρ — density, kg/m³.

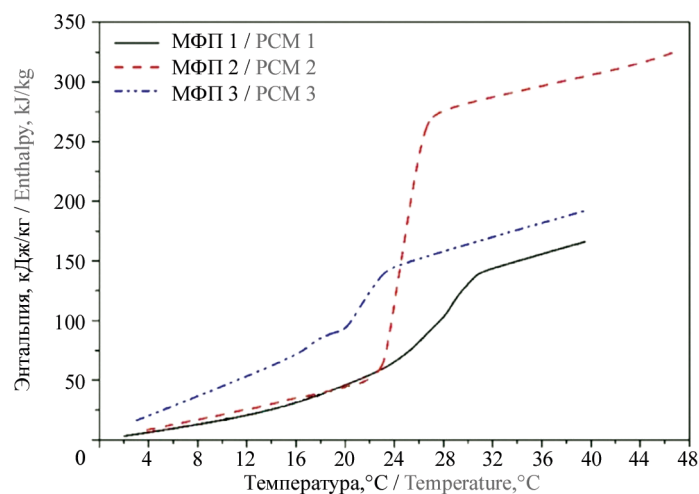


Рис. 2. Зависимость энтальпии МФП от температуры

Fig. 2. PCM enthalpy dependence on temperature

Эквивалентная удельная теплоемкость, как функция температуры $C_p(T)$, также определяется для трех типов МФП на каждой итерации расчета. $C_p(T)$ можно описать следующим уравнением:

$$C_p(T) = \frac{h_i^{j+1} - h_i^j}{T_i^{j+1} - T_i^j}, \quad (2)$$

где h_i — энтальпия узла; T_i — температура узла; i — моделируемый узел; j — текущий узел.

На основе выводов, сделанных авторами работы [22], было принято решение разместить МФП в модели посередине кирпичной кладки. На рис. 3 продемонстрирован вид сечения стены, где слева — внутренняя стена, справа — внешняя, пропорции

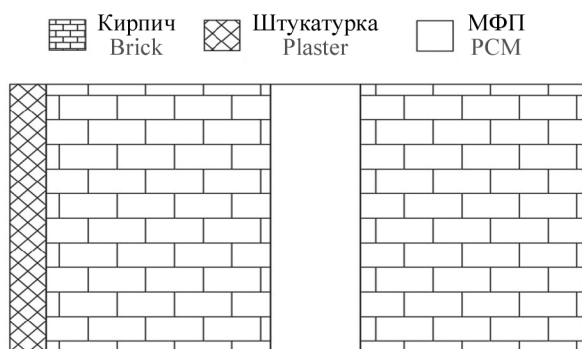


Рис. 3. Сечение стены

Fig. 3. Sectional view of the wall

соблюдены. Одним из способов, как это может быть реализовано на практике, является заполнение пустотелого кирпича. Исследование этой возможности приведено в работе [23]. Также МФП был размещен в качестве внутреннего покрытия крыши. Толщина слоя для обеих конструкций составила 5 см.

В EnergyPlus существует алгоритм Conduction Finite Difference, позволяющий рассчитывать материалы с фазовым переходом. Алгоритм применяет неявную схему конечных разностей, связанную с функцией энтальпия – температура, которая использует значения, заданные пользователем, для учета энергии фазового перехода.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

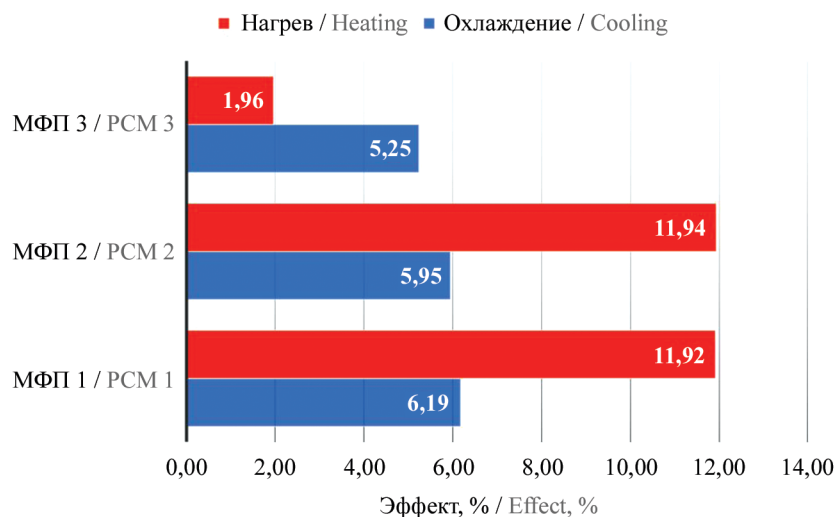
Значения потребления энергии на отопление и охлаждение помещения для трех городов России представлены в табл. 2. Также определена абсолютная и относительная экономия энергии от применения МФП. Стоит отметить, что энергия на охлаждение — электрическая, тогда как на нагрев — тепловая. Это обосновано тем, что система отопления смоделирована как центральная, соответственно, затраты энергии на нагрев теплоносителя до требуемых температур и его прокачку в трубы и радиаторы не учитываются.

На рис. 4 приведены диаграммы, построенные на основе данных, представленных в табл. 2.

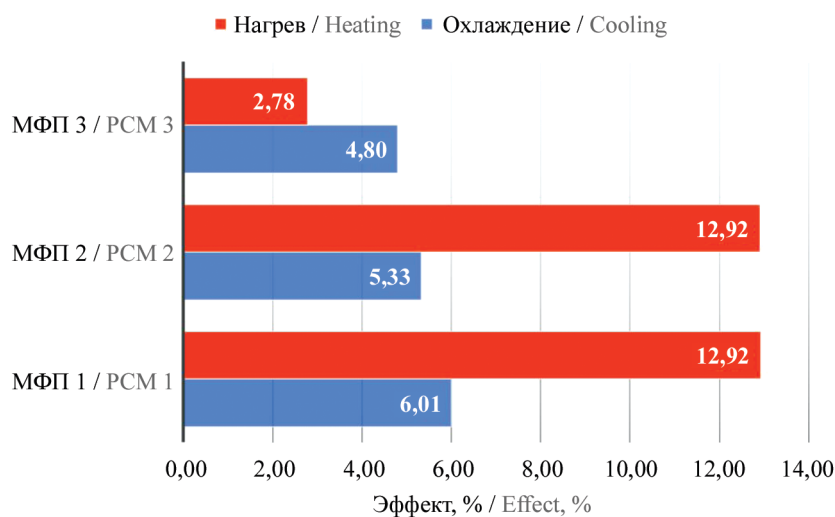
Табл. 2. Результаты расчета

Table 2. Calculation results

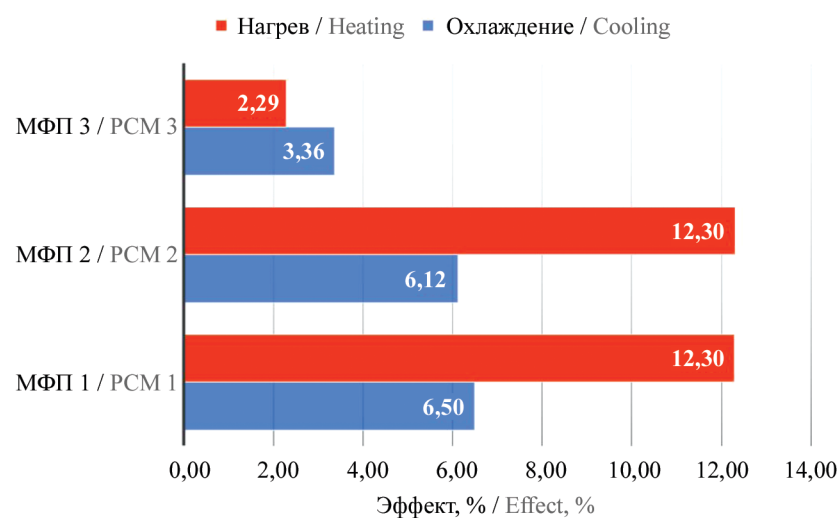
Материал Material	Количество энергии, ГДж/год Quantity of energy, GJ/year		Экономия, % Savings, %		Экономия, ГДж/год Savings, GJ/year		
	Охлаждение Cooling	Нагрев Heating	Охлаждение Cooling	Нагрев Heating	Охлаждение Cooling	Нагрев Heating	Суммарная Total
<i>Москва / Moscow</i>							
Без МФП Without PCM	12,77	378,76	—	—	—	—	—
МФП 1 / PCM 1	11,98	333,60	6,19	11,92	0,79	45,16	45,95
МФП 2 / PCM 2	12,01	333,54	5,95	11,94	0,76	45,22	45,98
МФП 3 / PCM 3	12,1	371,33	5,25	1,96	0,67	7,43	8,10
<i>Санкт-Петербург / St. Petersburg</i>							
Без МФП Without PCM	13,08	390,68	—	—	—	—	—
МФП 1 / PCM 1	12,23	342,64	6,50	12,30	0,85	48,04	48,89
МФП 2 / PCM 2	12,28	342,61	6,12	12,30	0,80	48,07	48,87
МФП 3 / PCM 3	12,64	381,75	3,36	2,29	0,44	8,93	9,37
<i>Сочи / Sochi</i>							
Без МФП Without PCM	13,32	307,15	—	—	—	—	—
МФП 1 / PCM 1	12,52	267,47	6,01	12,92	0,80	39,68	40,48
МФП 2 / PCM 2	12,61	267,48	5,33	12,92	0,71	39,67	40,38
МФП 3 / PCM 3	12,68	298,60	4,80	2,78	0,64	8,55	9,19



a



b



c

Рис. 4. Сравнение экономии энергии от использования МФП 1, 2 и 3 в: а — Москве; б — Сочи; с — Санкт-Петербурге

Fig. 4. Comparison of energy savings from the use of PCM 1, PCM 2 and PCM 3 in the cities: a — Moscow; b — Sochi; c — St. Petersburg

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты показывают, что МФП 3 значительно отстает от конкурентов. Наибольшая относительная экономия для системы охлаждения составила 5,25 % в Москве, для отопления — 2,78 % в климатических условиях Сочи, что в несколько раз хуже, чем у других материалов. По большей части это связано с тем, что коэффициент теплопроводности у этого материала ощутимо выше в сравнении с аналогами. Два других материала позволяют сэкономить до 12–13 % на отоплении.

Также можно отметить тот факт, что суммарная электроэнергия на охлаждение помещения практически не зависит от метеорологических условий. В действительности это значение складывается из двух составляющих — энергия на подготовку воздуха и на его прокачку вентиляторами. Энергия на охлаждающий элемент кратно отличается в зависимости от климата, например, если МФП отсутствует, то в Санкт-Петербурге будет потрачено на охлаждение 1 ГДж/год, в Москве — 1,54 ГДж/год, в Сочи — 3,96 ГДж/год. Тем не менее в итоге это практически полностью компенсируется увеличенными затратами на привод вентиляторного оборудования. Это может быть связано с разной влажностью, скоростью ветра и другими параметрами, которые могут сильно отличаться от одной климатической зоны к другой.

При более детальном анализе можно заметить, что результаты расчетов между МФП 1 и 2 практи-

чески не отличаются, хотя у них разная энтальпия фазового перехода. На наш взгляд, это объясняется тем, что влияние фазового перехода при заданных параметрах модели незначительно. Для проверки этого предположения в одной из итераций расчета значения всех параметров, как и алгоритм расчета, остались прежними, но был удален объект, отвечающий за изменение энтальпии при повышении температуры, т.е. из материалов с фазовым переходом они превратились в обычную тепловую изоляцию.

В результате анализа полученных данных выявлено, что влияние именно фазового перехода для МФП 1 и 2 на тепловой баланс здания незначительно. В зависимости от региона разница в среднем составляет 0,1 %. Поскольку наибольшего эффекта 0,24 % удалось добиться в самом теплом регионе, т.е. в г. Сочи, можно сделать вывод, что температура фазового перехода рассматриваемых материалов сравнительно высока и их применение в РФ возможно только после положительных результатов комплексной технико-экономической оценки. Представленные расчеты показали, что эффективность применения типовых МФП, доступных на зарубежном рынке, в российских условиях, как правило, ниже прогнозируемых величин. Таким образом, актуальным научно-техническим направлением является разработка МФП с теплофизическими характеристиками, отвечающими различным регионам страны с учетом соответствующих сезонных температур окружающего воздуха.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Veerakumar C., Sreekumar A.* Phase change material based cold thermal energy storage: materials, techniques and applications — A review // *International Journal of Refrigeration*. 2016. Vol. 67. Pp. 271–289. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2015.12.005
2. *Бараненко А.В., Кузнецов П.А., Захарова В.Ю., Цой А.П.* Применение веществ с фазовыми переходами для аккумулирования тепловой энергии // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2018. Т. 18. № 6. С. 990–1000. DOI: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-990-1000. EDN YQZIDJ.
3. *Li G., Hwang Y., Radermacher R.* Review of cold storage materials for air conditioning application // *International Journal of Refrigeration*. 2012. Vol. 35. Issue 8. Pp. 2053–2077. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2012.06.003
4. *Marco C.* Phase-change materials // *Smart Buildings*. 2016. Pp. 179–218. DOI: 10.1016/B978-0-08-100635-1.00005-8
5. *Park J.H., Berardi U., Chang S.J., Wi S., Kang Y., Kim S.* Energy retrofit of PCM-applied apartment buildings considering building orientation and height // *Energy*. 2021. Vol. 222. P. 119877. DOI: 10.1016/j.energy.2021.119877
6. *Park J.H., Kang Y., Lee J., Wi S., Chang J.D., Kim S.* Analysis of walls of functional gypsum board added with porous material and phase change material to improve hygrothermal performance // *Energy and Buildings*. 2019. Vol. 183. Pp. 803–816. DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.11.023
7. *Beltran R.D., Martínez-Gomez J.* Analysis of phase change materials (PCM) for building wallboards based on the effect of environment // *Journal of Building Engineering*. 2019. Vol. 24. P. 100726. DOI: 10.1016/j.jobe.2019.02.018
8. *Рёсснер Ф., Рудаков О.Б., Альбинская Ю.С., Иванова Е.А., Перцев В.Т.* Применение микрокапсулированных теплоаккумулирующих материалов с фазовым переходом в строительстве // *Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Физико-химические проблемы и высокие технологии строительного материаловедения*. 2012. № 5. С. 64–70. EDN PCQKAB.

9. Назиров Р.А., Тахтобин А.В. Материалы с изменяющимся фазовым состоянием в ограждающих конструкциях // Строительство и реконструкция. 2019. № 6 (86). С. 66–85. DOI: 10.33979/2073-7416-2019-86-6-66-85. EDN XMLMJZ.

10. Казарова Е.А., Перцев В.Т., Усачев С.М. Возможность применения веществ с фазовым переходом для различных строительных материалов // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Физико-химические проблемы и высокие технологии строительного материаловедения. 2013. № 7. С. 35–39. EDN RYFUFN.

11. Alawadhi E.M. Thermal analysis of a building brick containing phase change material // Energy and Buildings. 2008. Vol. 40. Issue 3. Pp. 351–357. DOI: 10.1016/j.enbuild.2007.03.001

12. Alqallaf H.J., Alawadhi E.M. Concrete roof with cylindrical holes containing PCM to reduce the heat gain // Energy and Buildings. 2013. Vol. 61. Pp. 73–80. DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.01.041

13. Cellat K., Beyhan B., Kazanci B., Konuklu Y., Paksoy H. Direct incorporation of butyl stearate as phase change material into concrete for energy saving in buildings // Journal of Clean Energy Technologies. 2017. Vol. 5. Issue 1. Pp. 64–68. DOI: 10.18178/JO-CET.2017.5.1.345

14. Goia F., Perino M., Serra V. Experimental analysis of the energy performance of a full-scale PCM glazing prototype // Solar Energy. 2014. Vol. 100. Pp. 217–233. DOI: 10.1016/j.solener.2013.12.002

15. Hoes P., Hensen J.L.M. The potential of lightweight low-energy houses with hybrid adaptable thermal storage: comparing the performance of promising concepts // Energy and Buildings. 2016. Vol. 110. Pp. 79–93. DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.10.036

16. Entrop A.G., Brouwers H.J.H., Rein- ders A.H.M.E. Experimental research on the use of

micro-encapsulated phase change materials to store solar energy in concrete floors and to save energy in Dutch houses // Solar Energy. 2011. Vol. 85. Issue 5. Pp. 1007–1020. DOI: 10.1016/j.solener.2011.02.017

17. Heim D., Wieprzkowicz A. Positioning of an isothermal heat storage layer in a building wall exposed to the external environment // Journal of Building Performance Simulation. 2016. Vol. 9. Issue 5. Pp. 542–554. DOI: 10.1080/19401493.2015.1126649

18. Kheradmand M., Azenha M., de Aguiar J.L.B., Castro-Gomes J. Experimental and numerical studies of hybrid PCM embedded in plastering mortar for enhanced thermal behaviour of buildings // Energy. 2016. Vol. 94. Pp. 250–261. DOI: 10.1016/j.energy.2015.10.131

19. Favoino F., Goia F., Perino M., Serra V. Experimental assessment of the energy performance of an advanced responsive multifunctional facade module // Energy and Buildings. 2014. Vol. 68. Pp. 647–659. DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.08.066

20. Berardi U., Manca M. The energy saving and indoor comfort improvements with latent thermal energy storage in building retrofits in Canada // Energy Procedia. 2017. Vol. 111. Pp. 462–471. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.208

21. Soudian S., Berardi U. Experimental investigation of latent thermal energy storage in high-rise residential buildings in Toronto // Energy Procedia. 2017. Vol. 132. Pp. 249–254. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.09.706

22. Qu Y., Zhou D., Xue F., Cui L. Multi-factor analysis on thermal comfort and energy saving potential for PCM-integrated buildings in summer // Energy and Buildings. 2021. Vol. 241. P. 110966. DOI: 10.1016/j.enbuild.2021.110966

23. Hamidi Y., Malha M., Bah A. Analysis of the thermal behavior of hollow bricks walls filled with PCM: Effect of PCM location // Energy Reports. 2021. Vol. 7. Pp. 105–115. DOI: 10.1016/j.egy.2021.08.108

Поступила в редакцию 26 июня 2023 г.

Принята в доработанном виде 29 сентября 2023 г.

Одобрена для публикации 29 октября 2023 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: F-9742-2018, ORCID: 0000-0002-1819-0450; fedyukhinav@yandex.ru;

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

Марк Дмитриевич Зайцев — студент; Национальный исследовательский университет «МЭИ» (НИУ «МЭИ»); 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1; ORCID: 0009-0002-9170-286X; zaitsevmd@mpei.ru.

Вклад авторов:

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

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

Зайцев М.Д. — проведение расчетов, сбор и обработка результатов, написание статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Veerakumar C., Sreekumar A. Phase change material based cold thermal energy storage: materials, techniques and applications — A review. *International Journal of Refrigeration*. 2016; 67:271-289. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2015.12.005
2. Baranenko A.V., Kuznetsov P.A., Zakharova V.Yu., Tsoy A.P. Application of substances with phase transitions for thermal energy accumulation. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2018; 18(6):990-1000. DOI: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-990-1000. EDN YQZIDJ. (rus.).
3. Li G., Hwang Y., Radermacher R. Review of cold storage materials for air conditioning application. *International Journal of Refrigeration*. 2012; 35(8):2053-2077. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2012.06.003
4. Marco C. Phase-change materials. *Smart Buildings*. 2016; 179-218. DOI: 10.1016/B978-0-08-100635-1.00005-8
5. Park J.H., Berardi U., Chang S.J., Wi S., Kang Y., Kim S. Energy retrofit of PCM-applied apartment buildings considering building orientation and height. *Energy*. 2021; 222:119877. DOI: 10.1016/j.energy.2021.119877
6. Park J.H., Kang Y., Lee J., Wi S., Chang J.D., Kim S. Analysis of walls of functional gypsum board added with porous material and phase change material to improve hygrothermal performance. *Energy and Buildings*. 2019; 183:803-816. DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.11.023
7. Beltran R.D., Martínez-Gomez J. Analysis of phase change materials (PCM) for building wallboards based on the effect of environment. *Journal of Building Engineering*. 2019; 24:100726. DOI: 10.1016/j.job.2019.02.018
8. Rössner F., Rudakov O.B., Albinskaya Yu.S., Ivanova E.A., Pertsev V.T. Application of microencapsulated heat-accumulating materials with phase change in construction. *Scientific Bulletin of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Physico-chemical problems and high technologies of building materials science*. 2012; 5:64-70. EDN PCQKAB. (rus.).
9. Nazirov R.A., Tahtobin A.V. Phase change materials used in building envelopes. *Building and Reconstruction*. 2019; 6(86):66-85. DOI: 10.33979/2073-7416-2019-86-6-66-85. EDN XMLMJZ. (rus.).
10. Kazarova E.A., Pertsev V.T., Usachev S.M. Possibility of application of substances with phase transition for various construction materials. *Scientific Bulletin of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Physico-chemical problems and high technologies of building materials science*. 2013; 7:35-39. EDN RYFUFN. (rus.).
11. Alawadhi E.M. Thermal analysis of a building brick containing phase change material. *Energy and Buildings*. 2008; 40(3):351-357. DOI: 10.1016/j.enbuild.2007.03.001
12. Alqallaf H.J., Alawadhi E.M. Concrete roof with cylindrical holes containing PCM to reduce the heat gain. *Energy and Buildings*. 2013; 61:73-80. DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.01.041
13. Cellat K., Beyhan B., Kazanci B., Konuklu Y., Paksoy H. Direct incorporation of butyl stearate as phase change material into concrete for energy saving in buildings. *Journal of Clean Energy Technologies*. 2017; 5(1):64-68. DOI: 10.18178/JOCET.2017.5.1.345
14. Goia F., Perino M., Serra V. Experimental analysis of the energy performance of a full-scale PCM glazing prototype. *Solar Energy*. 2014; 100:217-233. DOI: 10.1016/j.solener.2013.12.002
15. Hoes P., Hensen J.L.M. The potential of lightweight low-energy houses with hybrid adaptable thermal storage: comparing the performance of promising concepts. *Energy and Buildings*. 2016; 110:79-93. DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.10.036
16. Entrop A.G., Brouwers H.J.H., Reiniers A.H.M.E. Experimental research on the use of micro-encapsulated phase change materials to store solar energy in concrete floors and to save energy in Dutch houses. *Solar Energy*. 2011; 85(5):1007-1020. DOI: 10.1016/j.solener.2011.02.017
17. Heim D., Wieprzkowicz A. Positioning of an isothermal heat storage layer in a building wall exposed to the external environment. *Journal of Building Performance Simulation*. 2016; 9(5):542-554. DOI: 10.1080/19401493.2015.1126649
18. Kheradmand M., Azenha M., de Aguiar J.L.B., Castro-Gomes J. Experimental and numerical studies of hybrid PCM embedded in plastering mortar for enhanced thermal behaviour of buildings. *Energy*. 2016; 94:250-261. DOI: 10.1016/j.energy.2015.10.131
19. Favoino F., Goia F., Perino M., Serra V. Experimental assessment of the energy performance of an advanced responsive multifunctional facade module. *Energy and Buildings*. 2014; 68:647-659. DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.08.066
20. Berardi U., Manca M. The energy saving and indoor comfort improvements with latent thermal energy storage in building retrofits in Canada. *Energy Procedia*. 2017; 111:462-471. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.208
21. Soudian S., Berardi U. Experimental investigation of latent thermal energy storage in high-rise residential buildings in Toronto. *Energy Procedia*. 2017; 132:249-254. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.09.706

22. Qu Y., Zhou D., Xue F., Cui L. Multi-factor analysis on thermal comfort and energy saving potential for PCM-integrated buildings in summer. *Energy and Buildings*. 2021; 241:110966. DOI: 10.1016/j.en-build.2021.110966

23. Hamidi Y., Malha M., Bah A. Analysis of the thermal behavior of hollow bricks walls filled with PCM: Effect of PCM location. *Energy Reports*. 2021; 7:105-115. DOI: 10.1016/j.egy.2021.08.108

Received June 26, 2023.

Adopted in revised form on September 29, 2023.

Approved for publication on October 29, 2023.

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: F-9742-2018, ORCID: 0000-0002-1819-0450; fedyukhinav@yandex.ru;

Olga V. Afanaseva — Candidate of Technical Sciences, leading specialist; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Polytechnicheskaya st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation; ID RSCI: 617556, Scopus: 57212263097, ResearcherID: P-9204-2017, ORCID: 0000-0002-6614-2728; eccolga@mail.ru;

Mark D. Zaitsev — student; **National Research University “Moscow Power Engineering Institute” (MPEI)**; build. 1, 14 Krasnokazarmennaya st., Moscow, 111250, Russian Federation; ORCID: 0009-0002-9170-286X; zaitsevmd@mpei.ru.

Contribution of the authors:

Alexander V. Fedyukhin — idea, source text writing.

Olga V. Afanaseva — editing, design of the article.

Mark D. Zaitsev — calculations, data gathering and processing, writing of the article.

The authors declare no conflict of interest.