# СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ

УДК 691.1, 691.3 DOI: 10.33979/2073-7416-2019-86-6-66-85

# P.A. HAЗИРОВ $^1$ , A.B. TAХТОБИН $^1$

<sup>1</sup> ФГАОУ ВО «Сибирский Федеральный Университет», г. Красноярск, Россия

# МАТЕРИАЛЫ С ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ ФАЗОВЫМ СОСТОЯНИЕМ В ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЯХ

Аннотация. В настоящей статье рассмотрены материалы с изменяющимся фазовым состоянием и способы их размещения в ограждающих конструкциях в качестве теплоаккумулирующих элементов, воспринимающих тепловые нагрузки в процессе эксплуатации зданий и сооружений. С позиции тепловой защиты, наружные ограждающие конструкции обеспечивают комфортные параметры микроклимата зданий и санитарно-гигиенические условия при заданном расходе тепловой энергии, как в холодный, так и в тёплый период времени. Достижение заданных параметров микроклимата зданий, как правило, в традиционном строительстве решается путём увеличения общей толщины стеновых конструкций, что влияет на снижение полезной площади помещений и увеличение нагрузок на несущие элементы здания. Выбор эффективной стеновой конструкции, обладающей сравнительно небольшой массой, высокими теплотехническими характеристиками для проектировщиков, строителей и эксплуатационных служб является актуальной задачей. Рассматриваемые ограждающие конструкции основаны на принципах термодинамики, законах теплового баланса и сохранения тепловой энергии. На основе рассмотренных вариантов ограждающих конструкций с применением материалов с изменяющимся фазовым состоянием, получивших теоретическое обоснование и практическое применение в строительной области, предложены решения по их доработке. Систематизация теплоаккумулирующих материалов по классам и их основным характеристикам позволила определить области их применения для конкретных приложений в строительстве, задать концепт по дальнейшей разработке энергоэффективных и безопасных зданий в зависимости от назначения и типа ограждающих конструкций. Разработка ограждающих конструкций с материалами на основе фазового перехода требует комплексного подхода к проектированию с учётом совместной работы и физико-химических свойств применяемых материалов.

**Ключевые слова:** материалы с фазовым переходом, скрытая теплота, энергосбережение, инкапсулирование, плавление, солнечная энергия, энтальпия.

# R.A. NAZIROV<sup>1</sup>, A.V. TAKHTOBIN<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Siberian Federal University, City of Krasnoyarsk, Russia

## PHASE CHANGE MATERIALS USED IN BUILDING ENVELOPES

Abstract. The paper deals with phase change materials and ways to use them in building envelopes as heat storage units absorbing heat loads while in operation of buildings and structures. In terms of thermal protection, envelopes of enclosure provide comfortable parameters of the microclimate of buildings as well as hygiene and sanitary conditions at a given thermal energy consumption, both in cold and heat surplus period. As a rule, the development of specified microclimate buildings parameters is maintained by means of increasing the total thickness of wall structures in traditional construction. As a result, it causes the decrease of premises useful space and load increase affected load-bearing elements of the building. Thus, the choice of an effective means of wall structure, which has relatively small mass, high thermal characteristics for designers, builders and maintenance services, seems to be an urgent task. Building envelopes under consideration are based on the principles of thermodynamics, the laws of heat balance and thermal energy conservation. Based on considered options connected with

building envelopes with phase state materials, which have received theoretical and practical concern in the construction field, solutions for their development have been proposed. The systematization of heat-storage materials with regard to their class and main characteristics allowed us to determine their use for specific applications in construction, to set a concept for the further development of energy-efficient and safe buildings, according to the purpose and type of the building envelope. The development of building envelopes with phase change materials stipulates for an integrated approach to design, taking into account cooperation and physicochemical properties of the materials used.

**Keywords:** phase change materials, latent heat, energy storage, meiting, encapsulation, solar energy, enthalpy.

#### Введение

Новые, законченные капитальным ремонтом и реконструируемые объекты строительства должны отвечать требованиям правового регулирования в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности. Нормативно-правовой базой для проектировщиков и строителей поставлены конкретные задачи по повышению класса энергоэффективности зданий, эффективному и рациональному использованию энергетических ресурсов. Одним из возможных способов реализации поставленной задачи может быть внедрение новых строительных систем ограждающих конструкций с применением теплоаккумулирующих материалов с изменяющимся фазовым состоянием (МИФС) или РСМ (phase change materials).

Известно, что уровень потребления энергоресурсов в России существенно выше по сравнению с другими передовыми странами. Нерациональное использование стратегических ресурсов во многом вызвано наличием энергетически не эффективных жилищных комплексов, возведённых в 60-80 годах прошлого столетия. На сегодняшний день большая часть жилищного фонда страны нуждается в капитальном ремонте или полном обновлении.

Материалы с изменением фазы используются для хранения тепла в скрытом виде [1, 51] и способны поглощать и аккумулировать избыточную тепловую энергию и выделять её в случае дефицита. Энергоэффективность ограждающих конструкций с применением МИФС достигается за счёт сдвига температуры по фазе, снижения амплитуды температурных колебаний на наружных поверхностях и внутри конструкций.

Значительный вклад в изучение МИФС внесён зарубежными исследователями [1-17], из числа которых следует отметить труды Dincer I. и Rosen M. A. [1]; Abhat A. [2], а также работы Lane G. A. [3]; Zalba B. и других [13], Kenisarin M. M. [16].

Коммерческие МИФС представлены на официальных сайтах фирмами-производителями [18-22], приводятся в работах [13, 17, 40].

Классификация теплоаккумулирующих материалов, выделение основных преимуществ и недостатков преводятся в трудах Feldman D., Shapiro M. M., Banu D. [23]; Dimaano M. N. R. и Watanabe T. [24-25]; Sari A., Kaygusuz K. [26-29]; Bhatt V. D. и др. [59].

Основные термины физических и химических процессов, а также номенклатура некоторых МИФС представлены в [30-31]. Совместная работа системы вентиляции с аккумулируемой тепловой энергией в стеновой конструкции описана Pasupathy A. и Velraj R. [33]. В работах [35-38, 42, 51-58, 63, 65] рассмотрено применение МИФС в составе ограждающих стеновых конструкций.

Презентация продукции микроинкапсулированного парафина подробно представлена на сайте корпорации BASF [34]. В работах российских исследователей [32, 39, 40] рассмотрено практическое применение микроинкапсулированных органических соединений в составе строительных материалов и ограждающих конструкций на основе зарубежного опыта [1, 13, 42, 46-49, 62]. Результаты измерения теплопроводности композитов на основе гипса, включающих микрокапсулированный материал на основе фазового перехода представлены в работе Jaworski M., Abeid S. [35].

Благодаря своему уникальному свойству в настоящее время МИФС находят своё применение в таких областях как: аккумулирование тепловой энергии для охлаждения/обогрева зданий в коммунальной сфере, энергетической промышленности, автомобильной, авиационной и космической индустриях [57] и в ряде других приложений [41, 43-46, 54, 56, 57, 61-64, 66].

В рамках настоящей статьи рассматриваются МИФС, используемые в строительной области в составе ограждающих конструкций при кратковременном цикле сохранения тепловой энергии. Предложен концепт по улучшению эффективности ограждающих конструкций с применением пассивных и активных систем аккумулирования тепловой и солнечной энергии. На основании [34, 39, 49, 50, 53] представлен принцип управления температурой в зоне повышенного комфорта на протяжении полного цикла суточных температурных колебаний. Отдельно рассмотрена возможность применения МИФС с повышенной температурой плавления в качестве теплопоглощающих элементов в составе ограждающих конструкций из алюминиевых или стальных профилей с целью повышения предела их огнестойкости.

Исследование зарубежного опыта по применению теплоаккумулирующих материалов в области сбережения тепловой энергии, имеет важное практическое значение для дальнейшего развития данного направления.

# Классификация энергоёмких материалов на основе фазового перехода

На сегодняшний день известен широкий спектр химических компонентов с изменяющимся фазовым состоянием: органические вещества (парафины, жирные кислоты, алканы) и неорганические вещества в виде гидратов солей, эвтектик. Классификация энергосберегающих материалов приведена на рисунке1. Основным назначением МИФС в ограждающих конструкциях является сбережение тепловой энергии для последующего её использования [67].

В фазопереходных теплоаккумулирующих материалах во время изменения агрегатного состояния, когда материал претерпевает фазовую трансформацию, в термодинамической системе открытого типа происходит высвобождение или поглощение определённого количества термической энергии [1, 30, 32]. Изменение агрегатного состояния вещества характеризуется тепловым эффектом реакции и правилом фазового перехода Дж. У. Гиббса [30, 31].

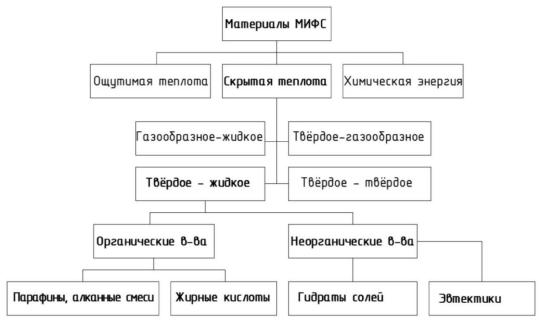


Рисунок 1 — Классификация энергосберегающих материалов, разработанная на основе [2, 13, 17, 46, 50, 51, 53, 63].

Смена фазового состояния происходит в критической точке фазового перехода, соответствующей определённой температуре плавления/твердения для каждого вещества в отдельности, характеризуется качественным изменением свойства вещества. Различные кристаллические фазы могут отличаться друг от друга типом кристаллической структуры, концентрацией компонентов, наличием или отсутствием сверхтекучести, анизотропией упругих свойств [30].

МИФС характеризуются следующими термодинамическими свойствами: точкой плавления в желаемом диапазоне рабочих температур; высокой скрытой теплотой плавления на

единицу массы, высокой удельной теплоёмкостью; конгруэнтным характером плавления; незначительным изменением объёма во время фазового перехода [1].

В зависимости от типа ограждающей конструкции, её условий работы, расположения относительно частей света, климатического района строительства, может быть определён один или несколько МИФС с наиболее подходящими параметрами, а также определено оптимальное расположение энергосберегающих материалов в теле конструкции или за её пределами.

# Виды выпускаемых энергоёмких материалов

В таблицах: 1-5 представлены МИФС с потенциальным использованием в строительной и коммунальной сфере в качестве теплоаккумулирующих материалов [1-29, 31, 59]. Более 200 композиций, органических и неорганических соединений, эвтектик и других смесей считаются перспективными МИФС для интегрирования в стеновые ограждающие конструкции [55].

Органические МИФС представляют собой биологические продукты, которые имеют свою уникальную температуру изменения фазы и при этом не подвержены переохлаждению, имеют более низкую энтальпию плавления по сравнению с другими классами, а также относительно низкую плотность (таблицы 1, 2). По своей природе органические МИФС не являются коррозионными и совместимы с большинством строительных материалов, но при этом они легко воспламеняемы, что является их существенным недостатком [1, 39].

Таблица 1 – Органические вещества с потенциальным использованием в качестве МИФС

No п.п.	Формула	Температура фазового перехода, °С	Энергия фа- зового пе- рехода, кДж/кг	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°C)	Плотность, кг/м³
1	Paraffin C14	4.5 [2]	165 [2]	н.о.	н.о.
2	Paraffin C15-C16	8.0 [2]	153 [2]	н.о.	н.о.
3	Polyglycol E400	8.0 [1, 3]	99.6 [1, 3]	0.187 (жид., 38.6 °C) [1, 3] 0.185 (жид., 69.9 °C) [3]	1125 (жид., 25 °C) [1, 3] 1228 (тв., 3 °C) [1, 3] 1009 (жид./ тв.) [4]
4	Dimethyl-sulfoxide	16.5 [4]	85.7 [4]	н.о.	1009 (жид./ тв.) [4]
5	Paraffin C16-C18	20-22 [5]	152 [5]	н.о.	н.о.
6	Polyglycol E600	22 [1, 3]	127.2 [1, 3]	0.189 (жид.,38.6 °C) [1, 3] 0.187 (жид., 67.0 °C) [3]	1126 (жид., 25 °C) [1, 3] 1232 (тв., 4 °C) [1, 3]
7	Paraffin C13-C24	22-24 [2]	189 [2]	0.21 (TB.) [2]	760 (жид., 70 °C) [2] 900 (тв., 20 °C) [2]
8	1-Dodecanol	26 [6]	200 [6]	н.о.	H.O.
9	Paraffin C18	28 [2] 27.5 [7]	244 [2] 243.5 [7]	0.148 (жид., 40 °C) [2] 0.15 (тв.) [2] 0.358 (тв., 25 °C) [7]	774 (жид., 70 °C) [2] 814 (тв., 20 °C) [2]
10	1-Tetradecanol	38 [6]	205 [6]	н.о.	н.о.
11	Paraffin C16-C28	42-44 [2]	189 [2]	0.21 (тв.) [2]	765 (жид., 70 °C) [2] 910 (тв., 20 °C) [2]
12	Paraffin C20-C33	48-50 [2]	189 [2]	0.21 (тв.) [2]	769 (жид., 70 °C) [2] 912 (тв., 20 °C) [2]
13	Paraffin C22-C45	58-60 [2]	189 [2]	0.21 (тв.) [2]	795 (жид., 70 °C) [2] 920 (тв., 20 °C) [2]
14	Paraffin max	64 [1, 3]	173.6 [1, 3]	0.167 (жид., 63.5 °C) [1, 3] 0.346 (тв., 33.6 °C) [1, 3] 0.339(тв., 45.7 °C) [3]	790 (жид., 65 °C) [1, 3] 916 (тв., 24 °C) [1, 3]
15	Polyglycol E6000	66 [1, 3]	190 [1, 3]	н.о.	1085 (жид., 70 °C) [1, 3] 1212 (тв., 20 °C) [1, 3]
16	Paraffin C21-C50	66-68 [2]	189 [2]	0.21 (тв.) [2]	830 (жид., 70 °C) [2] 930 (тв., 20 °C) [2]
17	Biphenyl	71 [1, 3]	119.2 [1, 3]	н.о.	991 (жид., 71 °C) [1, 3] 1166 (тв., 24 °C) [3]
18	Propionamide	79 [3]	168.2 [3]	н.о.	н.о.

## Окончание таблицы 1

19	Naphthalene	80 [1, 3]	147.7 [1, 3]	0.132 (жид., 83.8 °C) [1, 3] 0.341 (тв., 49.9 °C) [1, 3] 0.310 (тв., 66.6 °C) [3]	976 (жид., 84 °C) [1, 3] 1145 (тв., 20 °C) [1, 3]
20	Erythritol	118.0 [8]	339.8 [8]	0.326 (жид., 140 °C) [8] 0.733 (тв., 20 °C) [8]	1300 (жид., 140 °C) [8] 1480 (тв., 20 °C) [8]

где н.о. – не определено; жид. – жидкая фаза; тв. – твёрдая фаза.

Органические вещества, размещаемые в ограждающие конструкции, должны быть отделены огнеупорным слоем от внешней среды.

Таблица 2 – Жирные кислоты с потенциальным использованием в качестве МИФС

No	Наименование,	Температура фазового	Энергия фазового	Коэффициент теплопро- водности,	Плотность,
п.п	формула	перехода, °С	перехода кДж/кг	BT/(M·°C)	KT/M³
1	Propyl palmiate	10 [6]	186 [6]	н.о.	н.о.
2	Isopropyl palmiate	11 [23]	95-100 [23]	н.о.	н.о.
3	Capric—lauric acid+ pentadecane (90:10)	13.3 [24]	142.2 [24]	н.о.	н.о.
4	Isopropyl stearate	14-18 [23]	140-142 [23]	н.о.	н.о.
5	Caprylic acid CH3(CH2)6COOH	16 [1, 3] 16.3 [2] 16-16.7 [31]	148.5 [1,3] 149 [2]	0.149(жид., 38.6 °C) [1,3] 0.145(жид., 67.7 °C) [3] 0.148(жид., 20 °C) [2]	901 (жид., 30°С) [1,3] 981 (тв., 13°С) [1,3] 1033 (тв., 10°С) [2]
6	Capric–lauric acid (65 mol%–35 mol%)	18.0 [25]	148 [25]	н.о.	н.о.
7	Butyl stearate C17H35COOC4H9	19 [6] 16-20 [31]	140 [6] 123-200 [23]	н.о.	н.о.
8	Capric–lauric acid (45–55%)	21 [6]	143 [6]	н.о.	н.о.
9	Dimethyl sabacate	21 [23]	120-135 [23]	н.о.	н.о.
10	34% Mistiric acid+ 66% Capric acid	24 [3]	147.7 [3]	0.164(жид., 39.1 °C) [3] 0.154(жид., 61.2 °C) [3]	888 (жид., 25 °C) [3] 1018 (тв., 1 °C) [3]
11	Vinyl stearate C17H35COOCH=CH2	27-29 [23] 30.5 [31]	122 [23]	н.о.	н.о.
12	Capric acid CH3(CH2)8COOH	32[1, 3] 31.5 [2]	152.7 [1, 3] 153 [2]	0.153(жид., 38.5°С) [1,3] 0.152(жид., 55.5°С) [3]	878(жид., 45 °C) [1, 3] 886 (жид., 40 °C) [2]
10	36 4 1 10 1 1	31-31.6 [31]	100 106 [00]	0.149 (жид., 40 °C) [2]	1004 (тв.,24 °С) [1,3]
13	Methyl-12 hydroxy- stearate	42-43 [23]	120-126 [23]	н.о.	H.O.
14	Lauric acid CH3(CH2)10COOH	42-44 [2] 44 [3] 43.6-44.5 [31]	178 [2] 177.4 [3]	0.147 (жид., 50 °C) [23]	862 (жид., 60 °C) [3] 870 (жид., 50 °C) [2] 1007 (тв., 24 °C) [3]
15	Myristic acid CH3(CH2)12COOH	49-51 [26] 54 [2] 58 [3] 53.5-54.4 [31]	204.5 [26] 187 [2] 186.6 [3]	н.о.	861 (жид., 55 °C) [3] 844 (тв., 80 °C) [2] 990 (тв., 24 °C) [3]
16	Palmitic acid C15H31COOH	64 [1, 3] 61 [27, 28] 63 [2] 62.5-64 [31]	185.4 [1,3] 203.4 [27, 28] 187 [2]	0.162 (жид., 68.4 °C) [1,3] 0.159 (жид.,80.1°C) [3] 0.165 (жид., 80 °C) [2]	850 (жид., 65 °C) [1, 3] 847 (жид., 80 °C) [2] 989 (тв., 24 °C) [1, 3]
17	Stearic acid CH3(CH2)16COOH	69 [1, 3] 60-61 [28, 29] 70 [2] 69.2-69.9 [31]	202.5 [1, 3] 186.5 [28, 29] 203 [2]	0.172 (жид., 70 °C) [2]	848 (жид., 70 °C) [1, 3] 965 (тв., 24 °C) [1, 3]

н.о. – не определено; жид. – жидкая фаза; тв. – твёрдая фаза.

Большой класс веществ, который может быть использован при создании теплосберегающих систем в ограждающих конструкциях, относится к солевым гидратам (таблица 3). В основном, гидраты имеют высокие значения теплоты плавления, а также относительно высокую плотность, которая способствует созданию компактных блоков хранения.

Наряду с вышеупомянутыми преимуществами гидраты имеют ряд недостатков, которые ограничивают область их применения. Недостатком гидратов является склонность к переохлаждению. В переохлажденном состоянии данные материалы не кристаллизуются даже при температурах, которые ниже десятков градусов, чем температура плавления. Часть из них агрессивна в отношении конструкционных материалов, другая группа характеризуется химической нестабильностью [37].

Таблица 3 – Неорганические вещества с потенциальным использованием в качестве МИФС

No п. п.	Формула	Температура фазового перехода, °C	Энергия фазового перехода кДж/кг	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)	Плотность, кг/м³
1	Н2О	0 [2, 9]	333 [2] 334 [9]	0.612 (жид., 20 °C) [2] 0.610 (жид., 30 °C) [9]	998 (жид., 20 °C) [2] 996 (жид., 30 °C) [9] 917 (тв., 0 °C) [2]
2	Na2CrO4·10H2O	18 [59]	н.о.	н.о.	н.о.
3	KF·4H2O	18.5 [2, 11]	231 [2,6]	н.о.	1447(жид., 20 °C) [2] 1455 (тв., 18 °C) [2]
4	CaCl2·6H2O	29 [1, 3] 29.7 [2]	190.8 [1, 3] 171 [2]	0.54 (жид., 38,7 °C) [1, 3] 0.561 (жид.,61.2 °C) [3] 1.088(тв., 23 °C) [1, 3]	1562 (жид., 32 °C) [1, 3] 1802 (тв., 24 °C) [1, 3] 1710 (тв., 25 °C) [2]
5	Na2SO4·10H2O	32,4 [2, 6]	254 [2, 6]	0.544 [2]	1485 (тв.) [2]
		31-32 [12]	251.1 [12]	H.O.	1458 [12]
6	Na2CO3·10H2O	32-36 [12]	246.5 [12]	н.о.	1442 [12]
7	CaBr2·6H2O	34 [1, 3, 11]	115.5 [1,3]	н.о.	1956 (жид., 35 °C) [1, 3] 2194 (тв., 24 °C) [1, 3]
8	Na2HPO4·12H2O	35 [6]	265 [12] 281 [6]	н.о.	1522 [12]
9	Zn(NO3)2·6H2O	36 [1, 3] 36,4 [2]	146.9 [1, 3] 147 [2]	0.464 (жид. 39.9°С) [1, 3] 0.469 (жид. 61.2 °С) [11]	1828 (жид., 36 °C) [1, 3] 1937 (тв., 24 °C) [3] 2065 (тв.,14 °C) [2]
10	Na2S2O3·5H2O	48 [2]	201 [2]	н.о.	1600 (тв.) [2]
11	NaOH·H2O	58 [11]	н.о.	н.о.	н.о.
12	Cd(NO3)2·4H2O	59.5 [11]	н.о.	н.о.	н.о.
13	Ba(OH)2·6H2O	78 [1, 3]	265.7 [1, 3]	0.653 (жид., 85.7°С) [1, 3] 1.255 (тв., 23°С) [1, 3]	1937 (жид., 84 °C) [1, 3] 2070 (тв., 24 °C) [1, 3]
14	Mg(NO3)2·6H2O	89 [1, 3]	162.8 [1, 3]	0.490 (жид., 95 °C) [1, 3] 0.611(тв., 37°C) [1, 3]	1550 (жид., 94 °C) [1, 3] 1636 (тв., 25 °C) [1, 3]
15	MgCl2·6H2O	117 [1, 3]	168.6 [1, 3]	0.570 (жид., 120°С) [1, 3] 0.694 (тв., 90°С) [1, 3]	1450 (жид., 120 °C) [1, 3] 1569 (тв., 20 °C) [1, 3]
16	NaNO3	308 [13] 307 [59]	199 [13]	0.5 [13]	2257 [13] 2260 [59]
17	KNO3	333 [13]	266 [13, 59]	0.5 [13]	2110 [13, 59]
18	KON	380 [13, 59]	149.7 [59]	0.5 [13]	2044 [13, 59]
19	NaCl	801 [31] 802 [13]	492 [59]	0.5 [59]	2160 [13]
20	53.6%NaF+28.6%	809 [13]	н.о.	н.о.	2110 (жид.) [13]
	MgF2+17.8%KF	[-0]			2850 (TB.) [13]
21	66.9%NaF+33.1% MgF2	832 [13]	н.о.	н.о.	2190 (жид.) [13] 2940 (тв., 25 °C) [13]

н.о. – не определено; жид. – жидкая фаза; тв. – твёрдая фаза.

Следует отметить, что недостатки некоторых солевых гидратов в виде переохлаждения и химической неустойчивости можно частично преодолеть путём образования многокомпонентных композиций и эвтектики [60]. С одной стороны, подобные смеси позволяют расширить количество доступных МИФС и, с другой стороны, увеличить диапазон температур, в котором может использоваться МИФС [16]. Некоторые эвтектики и композиции приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Эвтектики и композиции для хранения тепла в качестве МИ $\Phi$ С

		Температура фа-	Энергия фазово-	Коэффициент	
No п.п.	Формула	зового перехода, °C	го перехода кДж/кг	теплопроводности, Вт/(м·°С)	Плотность, $\kappa \Gamma/M^3$
1	55% CaBr2·6H2O + 45% CaCl2·6H2O	14.7 [16]	140 [16]	н.о.	н.о.
2	51-55% Cu(NO3)3·6H2O + LiNO3·3H2O (*)	16.5 [16]	250 [16]	н.о.	н.о.
3	45-52% LiNO3·3H2O + Zn(NO3)2·6H2O (*)	17.2 [16]	220 [16]	н.о.	н.о.
4	41.5-52.5% Co(NO3)2·6H2O +5.8-9.7%H2O +LiNO3·3H2O	22.3 [16]	265 [16]	н.о.	н.о.
5	55-65% LiNO3·3H2O + Ni(NO3)2·6H2O (*)	24.2 [16]	230 [16]	н.о.	н.о.
6	66,6%CaCl2·6H2O + 33,3%MgCl2·6H2O	25 [13]	127 [13]	н.о.	1590 [13]
7	45% Ca(NO3)2·6H2O + Zn(NO3)2·6H2O (*)	25 [16]	130 [16]	н.о.	1930 [16]
8	48%CaCl2+4,3%NaCl +0,4%KCl+47,3%H2O	26.8 [2, 17]	188 [17]	н.о.	1640 [17]
9	55-65% Cd(NO3)2·6H2O + Zn(NO3)2·6H2O	27.4 [16]	126 [16]	н.о.	н.о.
10	45-55% Ca(NO3)2·4H2O + Zn(NO3)2·6H2O	29.2 [16]	130 [16]	н.о.	н.о.
11	67% Ca(NO3)2·4H2O + Mg(NO3)2·6H2O (*)	30 [2, 16]	135 [16] 136 [2]	н.о.	1670 [16]
12	60%Na(CH3COO) ·3H2O +40%CO(NH2)2	31.5 [14, 16] 30 [15]	226 [14, 16] 200.5 [15]	н.о.	н.о.
13	CH3CO2Na3·H2O+ CO(NH2)2 (*)	31.5 [16]	226 [16]	н.о.	н.о.
14	82% Zn(NO3)2·6H2O +Zn(No3)2·6H2O (*)	32 [16]	136 [16]	н.о.	1910 [16]
15	72% Ca(NO3)2·4H2O + Al(NO3)3·9H2O (*)	35 [16]	139 [16]	н.о.	1720 [16]
16	50%CH3CO2Na· 3H2O + HCONH2	40.5 [16]	255 [16]	н.о.	н.о.
17	61,5%Mg(NO3)2·6H2O + 38,5%NH4NO3	52 [3]	125.5 [3]	0.494 (жид. 65.0 °C) [3] 0.515 (жид. 88.0 °C) [3] 0.552 (тв. 36 °C) [3]	1515 (жид.,65.0 °C) [3] 1596 (жид., 20.0 °C) [3]
18	58,7%Mg(NO3)·6H2O +41,3% MgCl2·6H2O	59 [3] 58 [13]	132.2 [3] 132 [13]	0.510 (жид. 65 °C) [3] 0.565 (жид. 85.0 °C) [3] 0.678 (тв. 38 °C) [3] 0.678 (тв. 53 °C) [3]	1550 (жид., 50.0 °C) [3] 1630 (тв., 24.0 °C) [3]
19	61.5 mol % Mg(NO3)2·6H2O+ MgCl2·6H2O (*)	59.1 [16]	144 [16]	н.о.	1680 [16]
20	53% Mg(NO3)2·6H2O +Al(NO3)2·9H2O (*)	61 [2, 16]	148 [2, 16]	н.о.	1850 [16]

## Окончание таблицы 4

21	14% LiNO3+ 86%Mg(NO3)2·6H2O	72 [13]	>180 [13]	н.о.	1590 (жид.) [13] 1610 (тв.) [13]
22	66,6% urea + 33,4%NH4Br	76 [3]	161 [3]	0.331 (жид., 79.8 °C) [3] 0.324 (жид., 92.5 °C) [3] 0.649 (тв., 39.0 °C) [3] 0.662 (тв., 65.0 °C) [3]	1440 (жид., 85.0 °C) [3] 1548 (тв., 24.0 °C) [3]
23	68% NH4NO3(*)+ 27% LiO3+5%NH4Cl	81.6 [2, 16]	111 [2, 16]	н.о.	н.о.

<sup>(\*) –</sup> эвтектика; н.о. – не определено; жид. – жидкая фаза; тв. – твёрдая фаза.

В зависимости от функциональных требований, которые должна обеспечивать ограждающая конструкция или система теплосбережения, подбираются материалы с необходимыми свойствами, такие как: температура, энергия фазового перехода, теплоёмкость, плотность, теплопроводность. Необходимость обеспечения определённых параметров для энергоёмких материалов способствовала выделению МИФС с заданными свойствами в отдельный коммерческий класс ( таблица 5).

Таблица 5 – Коммерческие запатентованные МИФС, доступные на рынке

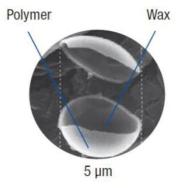
No		Температура фазового	Энергия фазового	Коэффициент	Плот-
п. п.	Формула	перехода, (плавление/	перехода, кДж/кг	теплопроводности,	ность,
		кристаллизация), °С		BT/(M·°C)	$K\Gamma/M^3$
1	Pure Temp -37	-37 [18]	145 [18]	н.о.	н.о.
2	HS 33N	-33 [19]	224 [19]	н.о.	н.о.
3	ClimSel C-21	-21/-24 [21]	285 [21]	1.45 (TB.) [21]	H.O.
				0.33 (жид.) [21]	
4	ClimSel C-18	-18/-23 [21]	288 [21]	1.45 (тв.) [21]	н.о.
				0.56 (жид.) [21]	
5	HS 23N	-23 [19]	262 [19]	н.о.	н.о.
6	Pure Temp -21	-21 [18]	239 [18]	н.о.	н.о.
7	Pure Temp -15	-15 [18]	301 [18]	н.о.	н.о.
8	HS 10N	-10 [19]	290 [19]	н.о.	н.о.
9	HS 3N	-3 [19]	346 [19]	н.о.	н.о.
10	A2	2 [20]	200 [20]	н.о.	н.о.
11	A3	3 [20]	200 [20]	н.о.	н.о.
12	Pure Temp 4	4 [18]	187 [18]	н.о.	н.о.
13	Pure Temp 8	8 [18]	178 [18]	н.о.	н.о.
14	ClimSel C7	8/4 [21]	123 [21]	0.78 (тв.) [21]	н.о.
				0.59 (жид.) [21]	
15	ClimSel C21	26/21 [21]	134 [21]	0.93 (тв.) [21]	н.о.
				0.75 (жид.) [21]	
16	RT26 (paraffin)	26/25 [22]	180 [22]	н.о.	н.о.
17	Pure Temp 27	27 [18]	202 [18]	н.о.	н.о.
18	HS 29	29 [19]	190 [19]	н.о.	н.о.
19	ClimSel C32	32/29 [21]	160 [21]	0.76 (тв.) [21]	H.O.
				1.08 (жид.) [21]	
20	RT44 (paraffin)	44/41 [22]	250 [22]	н.о.	H.O.
21	A52	52 [20]	222 [20]	н.о.	н.о.
22	ClimSel C58	58/55 [21]	260 [21]	0.57(тв.) [21]	H.O.
				0.48 (жид.) [21]	
23	RT65 (paraffin)	65-68 [22]	150 [22]	н.о.	H.O.
24	ClimSel C70	77/70 [21]	144 [21]	0.81(тв.) [21]	н.о.
	1.00	02.5207	4.7.7.50.3	0.81 (жид.) [21]	
25	A82	82 [20]	155 [20]	н.о.	н.о.
26	HS 89	89 [19]	125 [19]	н.о.	н.о.
27	RT100HC	101/99 [22]	180 [22]	н.о.	н.о.
28	A118	118 [20]	340 [20]	н.о.	н.о.

## Способы размещения энергоёмких материалов в слоях ограждающих конструкций

Размещение тепло-сберегающих конструкций и систем в плане может быть периметральным и ориентированным по сторонам света [55]. Размещение МИФС в ограждающих конструкциях может быть выполнено путём непосредственного включения, погружения в конструкцию в специальных контейнерах или введением в строительные материалы как добавка в виде инкапсулированных полимерных гранул. Хранение МИФС может быть выполнено в микро или макро капсулах [1, 36, 42, 50, 62]. В первом случае мелкие сферические или стержнеобразные частицы заключаются в тонкую и высокомолекулярную полимерную плёнку. Затем покрытые частицы могут быть включены в любую матрицу, которая совместима с инкапсулирующей плёнкой [41]. Во втором случае МИФС вводятся в упаковки некоторых форм, таких как трубки, мешочки, сферы, панели или другие контейнеры, сечения которых соразмерны с габаритами элементов ограждающей конструкции. Эти контейнеры могут служить непосредственно в качестве теплообменников или могут быть включены в строительные изделия [33]. Защитная оболочка должна быть совместима как с МИФС, так и с материалом конструкции, в котором она размещена. "Пластиковая упаковка с крышкой из алюминиевой фольги не подходит для хранения органических МИФС, поскольку сварной шов подвергается воздействию органического материала и не может быть использован при температуре выше 70 °C. Парафины совместимы с большинством металлов и сплавов, но могут пропитываться в пористые материалы и смягчать некоторые виды пластмасс" [1].

Недостатками инкапсулированных МИФС в полимерные и поликонденсационные материалы является их горючесть и выделение токсичных продуктов в результате старения [39]. При этом Рёсснером Ф. и Эльберфельдом Д. [39] из Ольденбургского университета (Германия) предложен альтернативный способ инкапсулирования гексадекана, парафинов, высших спиртов и высших карбоновых кислот с помощью кремнийорганических соединений – триалкилсилоксанов, позволяющий снизить пожарную опасность.

На рисунке 2 представлено электронное изображение микроинкапсулированной полиакриловой сферы, заполненной натуральным воском, величина которой составляет всего 5 мкм.



Tm:21/23/26 °C

Рисунок 2 – Электронное изображение микроинкапсулированного полимера [34]

Метод инкапсулирования был предложен химической компанией BASF, которая разработала материала Micronal ® PCM, представляющий собой микрокапсулы из полимеров, внутри которых находится органическое вещество в виде воска (см. рис. 1), способное изменять своё фазовое состояние при комфортном для человека температурном диапазоне: от 21 °C до 26 °C и при этом может хранить большое количество тепла [34]. Если температура в комнате достигает некоторого предопределенного значения (например, 23 °C), то воск внутри микрокапсул плавится, и в процессе фазового перехода происходит поглощение излишков тепла. Это позволяет, в отличие от всех других "пассивных" технологий, остановить процесс увеличения комнатной температуры. "При снижении комнатной температуры воск затвердевает, и капсулы "отдают" поглощённое тепло в окружающее пространство" [39].

Чередующаяся последовательность плавлений и отвердений может быть обусловлена либо естественными факторами (например, разницей ночных и дневных температур), либо использованием активных систем — таких, как системы водяного отопления/охлаждения, систем тепло-энерго сбережения. Как показано на рисунке 3, применение материалов на основе фазового перехода помогает избежать "пиковых" суточных перепадов температуры, и тем самым обеспечивает максимально комфортные условия внутри помещения [10, 34].

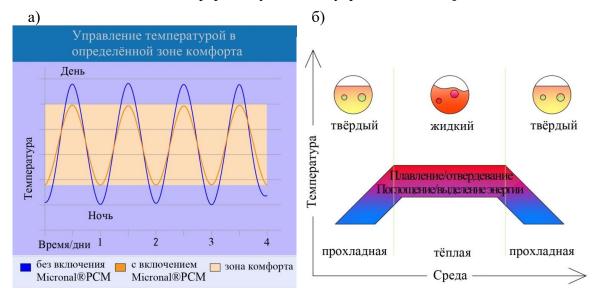


Рисунок 3 — Принцип управления температурой в зоне повышенного комфорта [34]: а) снижение амплитуды температурных колебаний, б) зона комфортной температуры

Микрокапсулы (рисунок 4) вводят в состав строительных материалов холодного нанесения и формования: штукатурного раствора, шпатлёвки, бетоны, строительные блоки, ГКЛ и пр. "Благодаря большой суммарной площади поверхности, многочисленные микрокапсулы способны быстро обмениваться энергией с окружающей средой" [39].

На рисунке 4в представлено изображение гипсокартона Smart Board PCM производства Knauf (Германия). Как описано Рёсснером [39], в данный гипсокартонный лист добавлено до 3 кг/м² гранул Micronal ® PCM.

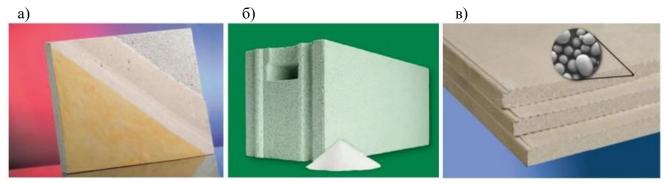


Рисунок 4— Строительные материалы с микрокапсулированными добавками Micronal® PCM [34]: а) штукатурный раствор, б) строительный блок, в) лист ГКЛ SmartBoard PCM

По данным [47] микроинкапсулирование МИФС технически осуществимо для органических материалов. Технология микроинкапсулирования материалов на основе фазового перехода и их практическое применение в составе бетонных и облегчённых ограждающих конструкций подробно описана в исследованиях Туаді V.V., Kaushik S.C., Туаді S.K., Акіуата Т. [48] и других [17, 39, 40, 49].

МИФС можно вводить в конструкцию также путём макрокапсулирования [1, 33, 36, 38, 40, 43, 50]. В зависимости от материала ограждающей конструкции назначается оболочка-капсула для хранения заданного МИФС. Данный способ позволяет использовать полную линейку известных веществ с изменяющимся фазовым состоянием как органического, так и неорганического классов.



Фото 5— Керамический блок с заполнением центральной полости макрокапсулой с МИФС [36, 65]

В своей диссертационной работе Pendyala S. [50] представила исследования по методам и технологиям аккумулирования тепловой энергии в системах теплосбережения, рассмотрела способы микро и макрокапсулирования МИФС в различных оболочках и средах.

Один из возможных способов размещения МИФС в стеновой конструкции методом макро капсулирования представлен на фото 5. Центральное расположение макрокапсулы в строительном элементе представляет пассивную схему хранения тепловой энергии, обеспечивающую термодинамическую стабильность внутри здания. Следует отметить, что в случае размещения макрокапсул с МИФС в крайние отверстия блока можно усилить ожидаемый эффект применения МИФС. МИФС могут хранить от 5 до 14 раз больше энергии по сравнению с другими традиционными материалами [51].

Способность ограждающей конструкции накапливать тепло, а затем постепенно освобождать его определяется значением тепловой инерции. Чем больше тепловая инерция стены, тем лучше её способность сглаживать внешние температурные колебания [52]. Тепловая инерция рассчитывается по формуле 1.

$$I = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c} \tag{1}$$

где:  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $BT/(M \cdot {}^{\circ}C)$ ;

- $\rho$  плотность, кг/м<sup>3</sup>;
- с теплоёмкость, Дж/кг.°С.

Полный процесс хранения тепловой энергии, как правило, включает три этапа: зарядку, хранение и разрядку [1, 53]. «Количество накопленного тепла зависит от удельной теплоты среды, изменения температуры и количества материала для хранения» [63]. Время аккумулирования и удержания тепловой энергии в конструкции зависит от внешних условий, теплоёмкости, теплопроводности самих материалов и ряда других факторов, таких как скрытая теплота плавления, влажность, давление и др.

Концепт стеновой панели с активной теплосберегающей системой представлен на рисунке 6. Данная стеновая конструкция предназначена для круглогодичного сохранения тепловой энергии. Помимо того, что стеновая ограждающая конструкция обеспечивает нормируемое термическое сопротивление (толщина слоёв конструкции определяется теплотехническим расчётом), она выполняет дополнительную тепло-энергосберегающую функцию благодаря специально разработанному стеклопакету, устанавливаемому с наружной стороны здания и наружному штукатурному слою с включением МИФС, позволяющим улавливать и аккумулировать тепловую солнечную энергию.

В летний период стеклянные призмы преломляют и отражают часть солнечного света, а наружный штукатурный слой с включениями микрокапсулированного МИФС абсорбирует и аккумулирует тепловую энергию, поступающую в воздушную прослойку в виде солнечной радиации и возрастающей энтальпии наружного воздуха.

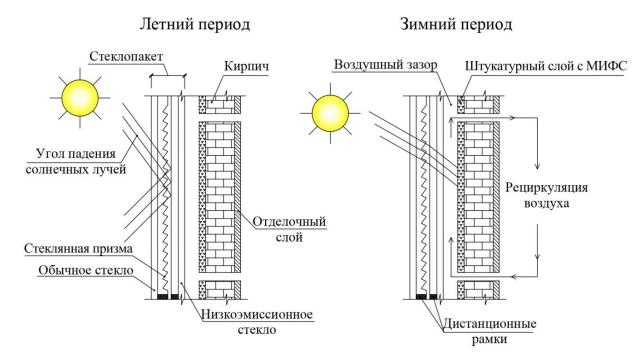


Рисунок 6 — Поперечное сечение стены с МИФС, адаптировано из [38, 53, 55]

В зимний период времени, когда угол падения солнечных лучей достаточно мал, стеклянная призма в составе стеклопакета пропускает солнечный свет на лицевую поверхность стены, повышая её термодинамический потенциал (энтальпию). Далее происходит тепломассоперенос восходящими потоками циркулирующего воздуха с наружной поверхности в помещение. Эффективность получения и накопления солнечной энергии в холодный период времени можно усилить за счёт введения в теплоаккумулирующий слой тёмных пигментов и автоматической регулировки граней стеклянной призмы в зависимости от положения солнца над уровнем горизонта, а также применения линзообразных стёкол. Следует отметить, что в случае обеспечения притока свежего воздуха в воздушный зазор, вентиляция в помещении будет осуществляться по принципу рекуперации.

В целом, указанная стеновая конструкция в комплексе с активной системой теплоэнерго сбережения позволяет сократить затраты на охлаждение и кондиционирование воздуха в тёплый период времени и на отопление в холодный период, также может способствовать сокращению отопительного периода для зданий данного типа.

Очевидно, что МИФС с высокой температурой плавления не целесообразно применять в ограждающих конструкциях с целью сбережения тепловой энергии. Однако такие вещества можно применять в ограждающих конструкциях с целью повышения предела огнестойкости, например, в перегородках из профилей алюминиевых или стальных сплавов. Известно, что температура плавления алюминия 660.4 °C, сплавов на основе железа — от 1539 °C [31], при этом температура потери несущей способности конструкций из алюминиевых сплавов наступает при значениях близких к 250 °C, обычных сталей свыше 300-350 °C приводит к повышению пластичности и сопровождается снижением прочности, появлению заметных деформаций. Огнестойкость ограждающих/несущих конструкций из алюминиевых или стальных сплавов может быть повышена за счёт включения теплосъёмных элементов в виде контейнеров с МИФС с температурой изменения фазового состояния равной или выше температуры, действующей на конструкцию определённое время, при которой наступает отказ конструкции. Принципиальная схема огнестойкой перегородки из алюминиевого профиля представлена на рисунке 7.



Рис. 7 — Принципиальная схема огнестойкой перегородки из алюминиевого профиля

Одним из возможных МИФС в качестве теплосъёмного элемента может быть солевой кристалл, указанный в таблице 3, позиции: 17-23. Обзор типов тугоплавких МИФС приводится в работах Zalba B., Marin J. M., Cabeza L. F., Mehling H. [13], также Bhatt V. D. и др. [59].

В случае теплового воздействия на конструкцию, благодаря высокой теплопроводности размещённого в полостях профильной системы МИФС, а также алюминиевого/стального профиля, передача тепла будет осуществляться от нагреваемой поверхности к теплопоглощающему элементу до наступления теплового баланса. Размещение МИФС в стальных конструкциях может быть выполнено непосредственно в занимаемую им полость либо в матрицуконтейнер. Вне зависимости от принятого метода размещения, необходимо обеспечить мероприятия по предотвращению прямого соприкосновения МИФС с металлом, образования электрохимической и иного вида коррозии. Тип теплоаккумулирующего материала следует подбирать со значением температуры плавления близким по значению с температурой, при которой наступает отказ конструкции. Тип МИФС и степень занимаемого им объёма в конструкции непосредственно влияют на изменение предела огнестойкости профильной системы.

#### Результаты и обсуждения

Применение теплоаккумулирующих материалов в строительной области является весьма востребованным и охватывает широкую область применения, возможные приложения приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Области применения МИФС в строительной области

No	Приложения	Область применения	Диапазон рабочих	Классы МИФС
п.п.	1	•	температур, ⁰С	(по таблицам:1-5)
1	Охладительные системы	Системы вентиляции и кондиционирования зданий	От -37 до +20	1-5
2	Системы поддержания комфортной температуры в помещениях с нормальным тепловым режимом	В составе ограждающих конструкций жилой и коммерческой недвижимости.	От +21 до +26	1-5
3	Аккумулирование тепловой энергии в помещениях со средним и высоким температурным режимом работы (с	1. Ограждающие конструкции технических и служебных помещений: тепловые пункты, насосные, трансформаторные.	От +27 до +60	1-5
	возможностью удаления через систему рекуперации).	2. Аккумулирование тепла в бассейнах, саунах, банях, котельных и др.	От +21 до +60; от +60 до +117	1-5
4	Системы пожарной безопасности	Огнеупорные ограждающие конструкции.	От +118 до +832	3

#### Выводы

- 1. Ни один материал не может удовлетворить потребности для всех случаев, поэтому выбор МИФС для конкретного приложения требует тщательного изучения различных свойств, оценки их относительных достоинств и недостатков. Вместе с тем следует отметить, что свойства продуктов промышленного класса, которые используются в бытовых целях, могут в значительной степени отличаться от заявленных значений из-за наличия примесей, вариаций состава. МИФС в зданиях с тепловым сбережением являются перспективными для применения в составе основных и вспомогательных ограждающих конструкций: стенах, перегородках, перекрытиях, кровле, полах, подвесных потолках и могут быть интегрированы в системы: «тёплый пол», вентиляции и кондиционирования зданий, в систему солнечных коллекторов, горячего и холодного водоснабжения и ряд других приложений.
- 2. Парафиновые МИФС подходят для использования в ограждающих конструкциях в качестве теплоаккумулирующего материала, ввиду их широкого диапазона значений энергии фазового перехода: от 85.7 до 339.8 кДж/кг в интервале рабочей температуры плавления: от 4.5 до 118 °С соответственно. Парафиновые МИФС обладают физической и химической стабильностью, хорошим тепловым поведением и регулируемой переходной зоной. Парафины особенно хорошо подходят для приложений, связанных с энергосбережением в зданиях и сохранением солнечной энергии для использования накопленного тепла в часы пикового спроса. Главным недостатком органических веществ является склонность к горению и изменению объёма при смене фазы, что делает их склонными к утечке. При этом второй недостаток можно использовать как основное преимущество в системах теплового сбережения, где требуется увеличение объёма теплоёмкого вещества.
- 3. Жирные кислоты по физико-химическим характеристикам схожи с парафиновыми МИФС. Однако их применение в составе строительных ограждающих конструкциях следует назначать с учётом долговечности ввиду их подверженности быстрому старению и окислению.
- 4. При проектировании ограждающих конструкций с неорганическими МИФС следует учитывать их коррозионный потенциал. Высокие показатели теплопроводности для большинства неорганических соединений ограничивают их применение в энергоэффективных конструкциях, но их значения температуры фазового перехода позволяют использовать данную группу в огнеупорных конструкциях и ряде других приложений с высокотемпературным режимом работы.
- 5. На сегодняшний день МИФС коммерческого класса наиболее адаптированы к непосредственному применению в строительной области благодаря стабильным характеристикам, наличию сертификатов, паспортов качества, патентов и иной разрешительной документации.
- 6. Большинство МИФС имеют тенденцию к снижению объёмной массы в жидком агрегатном состоянии. Изменение объёмной массы при фазовом переходе может быть использовано при проектировании ограждающих конструкций, в которых активный теплообмен осуществляется посредством гравитационного замещения.
- 7. На сегодняшний день в мировом масштабе применение ограждающих конструкций с МИФС в районах строительства со сложными климатическими условиями существенно ниже по сравнению с тёплыми климатическими зонами. Данная тенденция обусловлена наличием низких температур, малой амплитудой суточных температурных колебаний, низкой солнечной активностью.
- 8. Практическое применение и разрабока ограждающих конструкций с применением МИФС на территории Росийской Федерации по настоящее время практически не реализовано ввиду малоисследовательности данного направления и недостаточности данных экспериментальных исследований.

9. Разработка и внедрение ограждающих конструкций с применением энергоёмких материалов на основе фазового перехода в массовое производство позволит повысить класс энергетической эффективности проектируемых и строящихся жилищных комплексов, откроет ряд преимуществ относительно традиционных строительных систем.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Dincer I., Rosen M. A. Thermal energy storage. Systems and applications. John Wiley & Sons: Chichester (England). 2002. 599 p.
- 2. Abhat A. Low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage materials. *Solar Energy*. 1983. Vol. 3. No. 4. Pp. 313-332.
- 3. Lane G. A. Low temperature heat storage with phase change materials. *International Journal of Ambient Energy*. 2011. Vol. 1. No. 3. Pp. 155-168. Doi: 10.1080/01430750.1980.9675731
- 4. Farid M. M., Hamad F. A., Abu-Arabi M. Phase change cool using dimethyl-sulfoxide. *Energy Conversion and Management.* 1998. Vol. 39. No. 8. Pp. 819-826.
- 5. Michael J. A. Experimental Investigations of the Combination of a Heat Pipe with Metal Foam or Foils for Enhancing Heat Transfer during the Melting and Solidification of a Phase Change Material (PCM) for Latent Heat Thermal Energy Storage Applications. [Master of Science Thesis 570]. Connecticut: University of Connecticut Graduate School. 2014. Pp. 1-196. http://digitalcommons.uconn.edu/gs\_theses/570
- 6. Hawes D. W., Feldman D., Banu D. Latent heat storage in building materials. *Energy Buildings*. 1993. Vol. 20. No.1. Pp. 77-86.
- 7. Sasaguchi K., Viskanta R. Phase change heat transfer during Melting and resolidification of melt aroung cylindrical heat source(s)/sink(s). *Energy Resources Technology*. 1989. Vol. 111. Pp. 43–49. doi.org/10.1115/1.3231400
- 8. Kakiuchi H., Yamayaki M., Yabe M., Chihara S., Terunuma Y., Sakata Y., Usami T. A study of erythritol as phase change material. [II Workshop of the IEA ECES IA Annex 10]. Sofia (Bulgaria). 1998. Pp. 11-13.
- 9. Royon L., Guiffant G., Flaud P. Investigation of heat transfer in a polymeric phase change material for low level heat storage. *Energy Convers Manag.* 1997. Vol. 38. No. 6. Pp. 517-524.
- 10. Tokuça A., Yesügeya S. C., Başaranb T. An evaluation methodology proposal for building envelopes containing phase change materials: the case of a flat roof in Turkey's climate zones. *ARCHITECTURAL SCIENCE REVIEW*. 2017. Vol. 60. No. 5. Pp.408-423. https://doi.org/10.1080/00038628.2017.1343179
- 11. Naumann R., Emons H. H. Results of thermal analysis for investigation of salt hydrates as latent heat-storage materials. *Journal of Thermal Analysis*. 1989. Vol. 35. No 3. Pp. 1009-1031. Doi.org/10.1007/BF02057256.
- 12. Telkes M. Thermal storage for solar heating and cooling. [Proceedings of the Workshop on Solar Energy Storage Subsystems for the Heating and Cooling of Buildings]. Virginia, USA: Charlottesville. 1975. Pp. 17-23.
- 13. Zalba B., Marin 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. Pp. 251-283. Doi: 10.1016/S1359-4311(02)00192-8
- 14. Wada T., Kimura F. Yamamoto R. Studies on salt hydrate for latent heat storage. II. Eutectic mixture of pseudo-binary system CH3CO2Na·3H2O–CO(NH2)2. *Bulletin of the Chemical Society of Japan.* 1983. Vol. 56. No. 4. Pp. 1223-1226.
- 15. Li J. H., Zhang G. E., Wang J. Y. Investigation of a eutectic mixture of sodium acetate trihydrate and urea as latent heat storage. *Solar Energy*. 1991. Vol. 47. No. 6. Pp. 443-445. Doi: 10.1016/0038-092X(91)90112-A.
- 16. Kenisarin M. M. Short-term storage of solar energy. 1. Low temperature phase-change materials. *Applied Solar Energy*. 1993. Vol. 29. No. 2. Pp. 48-65.
  - 17. Cabeza L., Heinz A., Streicher W. A Report of IEA Solar Heating and Cooling programme Task 32, [Advanced storage concepts for solar and low energy buildings]. Spain: IEA SHC. 2005. Pp. 1-33.
  - 18. Pure Temp [Электронный ресурс]. URL: https://www.puretemp.com/ (дата обращения 19.08.2019).
  - 19. Pluss [Электронный ресурс]. URL: https://www.pluss.co.in/ (дата обращения 20.08.2019).
  - 20. РСМ [Электронный ресурс]. URL: https://www.pcmproducts.net (дата обращения 21.08.2019).
  - 21. Climator [Электронный ресурс]. URL: https://www.climator.com/ (дата обращения 21.08.2019).
  - 22. Rubitherm GmbH [электронный ресурс] https://www.rubitherm.eu. (дата обращения 23.08.2019).
  - 23. Feldman D., Shapiro M. M., Banu D. Organic phase change materials for thermal energy storage. *Solar Energy Mater*. 1986. Vol. 13. No. 1. Pp. 1-10. Doi.org/10.1016/0165-1633(86)90023-7
- 24. Dimaano M. N. R., Watanabe T. The capric—lauric acid and pentadecane combination as phase change material for cooling applications. *Applied Thermal Engineering*. 2002. Vol. 22. No. 4. Pp. 365-377. Doi.org/10.1016/S1359-4311(01)00095-3
- 25. Dimaano M. N. R., Watanabe T. The capric and lauric acid mixture with chemical additives as latent heat storage materials for cooling application. *Energy*. 2002. Vol. 27. No. 9. Pp. 869-888.
  - 26. Sari A., Kaygusuz K. Thermal performance of mystiric acid as a phase change material for energy

- storage application. Renewable Energy. 2001. Vol. 24. No. 2. Pp. 303-317.
- 27. Sari A., Kaygusuz K. Thermal performance of palmitic acid as a phase change energy storage material. *Energy Conversion and Management*. 2002. Vol. 43. No. 6. Pp. 863-876.
- 28. Sari A., Kaygusuz K. Thermal energy storage system using some fatty acids as latent heat energy storage materials. *Energy Sources*. 2001. Vol. 23. No. 3. Pp. 275-285.
- 29. Sari A., Kaygusuz K.Thermal energy storage system using stearic acid as a phase change material. *Solar Energy*. 2001. Vol. 71. No. 6. Pp. 365–376. Doi: 10.1016/S0038-092X(01)00075-5.
- 30. Прохоров А.М., Алексеев Д.М., Бонч-Бруевич А.М. и др. Физический энциклопедический словарь. М.: Сов. Энциклопедия, 1983. 928 с.
- 31. Кнунянц И.Л., Вонский Е.В., Гусев А.А. и др. Химический энциклопедический словарь. М.: Сов. энциклопедия, 1983. 792 с.
- 32. Теплофизические свойства фазопереходных теплоаккумулирующих материалов в строительстве / И.О. Аймбетова, У.С. Сулейменов, М.А. Камбаров, Э.Н. Калшабекова, Р.А. Риставлетов // Успехи современного естествознания. 2018. №. 12. С. 9-13. Doi 10.17513/use.36966.
  - 33. Pasupathy A., Velraj R. Phase Change Material Based Thermal Storage for Energy Conservation in Building Architecture. *International Energy Journal*. 2006. Vol. 7. No. 2. Pp. 147-159.
  - 34. Micronal PCM [электронный ресурс]. URL: https://www.micronal.de (дата обращения 14.07.2019).
- 35. Jaworski M., Abeid S. Thermal conductivity of gypsum with incorporated phase change material (PCM) for building applications. *Journal of Power Technologies*. 2011. Vol. 91. No. 2. Pp. 49-53.
- 36. Alvaro de Gracia, Cabeza L. F. Phase change materials and thermal energy storage for buildings. *Energy and Buildings*. 2015. Vol. 103. Pp. 414-419.
- 37. Anusha A. S. Phase Change Materials. *International Journal of Engineering Research and General Science*. 2016. Vol. 4. No. 2. Pp. 332-338.
- 38. Silva T., Vicente R., Rodrigues F. Literature review on the use of phase change materials in glazing and shading solutions, Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. Vol. 53. No. C. Pp. 515-535. Doi: 10.1016/j.rser.2015.07.201.
- 39. Применение микрокапсулированных теплоаккумулирующих материалов с фазовым переходом в строительстве / Ф. Рёсснер, О.Б. Рудаков, Ю.С. Альбинская, Е.А. Иванова, В.Т. Перцев // УДК 541.11. Научный Вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. 2012. No. 5. C. 64-70.
- 40. Назиров Р. А., Тараненко Д. В., Веде П. Ю. Применение материалов с изменяющимся фазовым состоянием в ограждающих конструкциях // Строительство и реконструкция. 2019 №2 (82). С. 90-105. Doi: 10.33979/2073-7416-2019-82-2-90-105.
- 41. Heimrath R., Haller M. Advanced storage concepts for solar and low energy buildings. [A Report of IEA Solar Heating and Cooling programme Task 32]. Austria: IWT TU Graz. 2005. Pp. 1-47.
- 42. Cao S., Gustavsen A., Uvsløkk S., Jelle B. P., Gilbert J., Maunuksela J. The Effect of Wall-Integrated Phase Change Material Panels on the Indoor Air and Wall Temperature Hot box Experiments. [Zero emission buildings proceedings of Renewable Energy Conference]. Norway: Trondheim. 2010. Pp. 15-26.
- 43. Alkilani M. M., Sopian K., Alghoul M.A., Sohif M., Ruslan M. H. Review of solar collectors with thermal storage units. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011. Vol. 15. No.3. Pp. 1476-1490. Doi: 10.1016/j.rser.2010.10.019.
- 44. Jesumathy S.P., Udayakumar M. and Suresh S. Heat transfer characteristics in latent heat storage system using paraffin wax. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2012. Vol. 26. No. 3. Pp. 959-965. Doi: 10.1007/s12206-011-1017-4.
- 45. Kousksou T., Mahdaoui M., Hlimi M., El Alaiji R., El Rhafiki T. Latent energy storage: Melting process around heating cylinders. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2016. Vol. 8. Pp. 128-140. Doi: 10.1016/j.csite.2016.06.010.
- 46. Ravikumar M., Srinivasan S. Phase change material as a thermal energy storage material for cooling of building. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. 2008. Vol. 15. Pp. 503-511.
  - 47. Mehling H., Cabeza L. F. Heat and cold storage with PCM: An Up to Date Introduction into Basics and Applications. *Springer editions*. 2008. Pp. 6-9, 15-40, 218-250, 274-280. Doi: 10.1007/978-3-540-68557-9.
- 48. Tyagi V. V., Kaushik S. C., Tyagi S. K., Akiyama T. Development of phase change materials based microencapsulated technology for buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011. Vol. 15. No. 2. Pp. 1373-1391.
- 49. Sharma A., Tyagi V.V., Chen C.R., Buddhi D. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2009. Vol. 13. No. 2. Pp. 318-345. Doi.org/10.1016/j.rser.2007.10.005.
- 50. Pendyala S. Macroencapsulation of Phase Change Materials for Thermal Energy Storage. [Graduate Theses and Dissertations]. Florida: Mechanical Engineering College of Engineering University of South. 2012. Pp. 1-96. http://scholarcommons.usf.edu/etd/4200.
- 51. Rai A. K., Kumar A. A review on phase change materials and their applications. *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology*. 2012. Vol. 3. No. 2. Pp. 214-225.

- 52. Del Coz Dı'az J. J., Garcı'a Nieto P. J., Betego'n Biempica C., Prendes Gero M. B. Analysis and optimization of the heat-insulating light concrete hollow brick walls design by the finite element method. *Applied Thermal Engineering*. 2007. Vol. 27. Pp. 1445-1456. Doi:10.1016/j.applthermaleng.2006.10.010.
- 53. Socaciu L. G. Thermal Energy Storage with Phase Change Materia. *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*. 2012. Vol. 11. No. 20. Pp. 75-98.
- 54. Stevens V., Craven C., Grunau B. Thermal Storage Technology Assessment, An introductory assessment of thermal storage in residential cold climate construction. *Cold Climate Housing Research Center*. 2013. February. Pp. 1-54
- 55. Cui Y., Xie J., Liu J., Pan S. Review of Phase Change Materials Integrated in Building Walls for Energy Saving. *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 121. Pp. 763-770. Doi: 10.1016/j.proeng.2015.09.027.
- 56. Zhang Y., Zhou G., Lin K., Zhang Q., Lin K., Zhang Q., Di. H. Application of latent heat thermal energy storage in buildings: State-of-the-art and outlook. *Building and Environment*. 2007. Vol. 42. Pp. 2197-2209. Doi: 10.1016/j.buildenv.2006.07.023.
- 57. Tan L., Kwok Y., Date A., Akbarzadeh A. Numerical Study of Natural Convection Effects in Latent Heat Storage using Aluminum Fins and Spiral Fillers. *International Journal of Mechanical and Aerospace Engineering*. 2012. Vol. 6. Pp. 238-245.
- 58. Haghshenaskashani S., Pasdarshahri H. Simulation of Thermal Storage Phase Change Material in Buildings. *World Academy of Science, Engineering and Technology*. 2009. Vol. 3. No 10. Pp. 356-360.
- 59. Bhatt V. D., Gohil K., Mishra A. Thermal Energy Storage Capacity of some Phase changing Materials and Ionic Liquids. *International Journal of ChemTech Research*. 2010. Vol. 2. No.3. Pp. 1771-1779.
- 60. Zhou D., Eames P. A study of a eutectic salt of lithium nitrate and sodium chloride (87-13%) for latent heat storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2017. Vol. 167. Pp. 157-161. http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2017.04.016.
- 61. Nayak A.O., Ramkumar G., Manoj T., and Vinod R. Comparative Study between Experimental Analysis and CFD Software Analysis of PCM material in Thermal Energy Storage System. *International Journal of Chemical Engineering and Applications*. 2011. Vol. 2. No. 6. Pp. 400-407.
- 62. Ostry M., Dostalova D., Klubal T., Prikryl R., Charvat P. Micro-encapsulated phase-change materials for Latent-heat storage: thermal characteristics. *Materials and technology*. 2015.Vol. 49. No. 5. Pp. 813-816. Doi: 10.17222/mit.2013.210.
- 63. Chavan S., Panwar V., Rathod R. Review on Thermal Energy Storage Techniques. *International Journal of Engineering Development and Research.* 2015. Vol.3. No. 4. Pp. 944-948.
- 64. Lassandro P., Turi S. D. Energy efficiency and resilience against increasing temperatures in summer: the use of PCM and cool materials in buildings. *International journal of heat and technology*. 2017. Vol. 35. No. 1. Pp. 307-315. Doi: 10.18280/ijht.35Sp0142.
- 65. Silva T., Vicente R., Soares N., Ferreira V. Experimental testing and numerical modelling of masonry wall solution with PCM incorporation: a passive construction solution. *Energy Build*. 2012. Vol. 49. Pp. 235-245. Doi: 10.1016/j.enbuild.2012.02.010.
- 66. Kant K., Shukla A., Sharma A., Kumar A., Jain A. Thermal energy storage based solar drying systems: A review. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 2016. Vol. 34. Pp. 86-99. Doi.org/10.1016/j.ifset.2016.01.007.
- 67. Abedin A. H., Rosen M. A. A Critical Review of Thermochemical Energy Storage Systems. *The Open Renewable Energy Journal*. 2011. Vol. 4.Pp. 42-46.

### **REFERENCES**

- 1. Dincer I., Rosen M. A. Thermal energy storage. Systems and applications. John Wiley & Sons: Chich-ester (England). 2002. 599 p.
- 2. Abhat A. Low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage materials. Solar Energy. 1983. Vol. 3. No. 4. Pp. 313-332.
- 3. Lane G. A. Low temperature heat storage with phase change materials. International Journal of Ambi-ent Energy. 2011. Vol. 1. No. 3. Pp. 155-168. Doi: 10.1080/01430750.1980.9675731
- 4. Farid M. M., Hamad F. A., Abu-Arabi M. Phase change cool using dimethyl-sulfoxide. Energy Conversion and Management. 1998. Vol. 39. No. 8. Pp. 819-826.
- 5. Michael J. A. Experimental Investigations of the Combination of a Heat Pipe with Metal Foam or Foils for Enhancing Heat Transfer during the Melting and Solidification of a Phase Change Material (PCM) for Latent Heat Thermal Energy Storage Applications. [Master of Science Thesis 570]. Connecticut: University of Connecticut Graduate School. 2014. Pp. 1-196. http://digitalcommons.uconn.edu/gs\_theses/570
- 6. Hawes D. W., Feldman D., Banu D. Latent heat storage in building materials. Energy Buildings. 1993. Vol. 20. No.1. Pp. 77-86.

- 7. Sasaguchi K., Viskanta R. Phase change heat transfer during Melting and resolidification of melt aroung cylindrical heat source(s)/sink(s). Energy Resources Technology. 1989. Vol. 111. Pp. 43-49. doi.org/10.1115/1.3231400
- 8. Kakiuchi H., Yamayaki M., Yabe M., Chihara S., Terunuma Y., Sakata Y., Usami T. A study of erythri-tol as phase change material. [II Workshop of the IEA ECES IA Annex 10]. Sofia (Bulgaria). 1998. Pp. 11-13.
- 9. Royon L., Guiffant G., Flaud P. Investigation of heat transfer in a polymeric phase change material for low level heat storage. Energy Convers Manag. 1997. Vol. 38. No. 6. Pp. 517-524.
- 10. Toku?a A., Yes?geya S. C., Ba?aranb T. An evaluation methodology proposal for building envelopes containing phase change materials: the case of a flat roof in Turkey's climate zones. ARCHITECTURAL SCIENCE RE-VIEW. 2017. Vol. 60. No. 5. Pp.408-423. https://doi.org/10.1080/00038628.2017.1343179
- 11. Naumann R., Emons H. H. Results of thermal analysis for investigation of salt hydrates as latent heat-storage materials. Journal of Thermal Analysis. 1989. Vol. 35. No 3. Pp. 1009-1031. Doi.org/10.1007/BF02057256.
- 12. Telkes M. Thermal storage for solar heating and cooling. [Proceedings of the Workshop on Solar Energy Storage Subsystems for the Heating and Cooling of Buildings]. Virginia, USA: Charlottesville. 1975. Pp. 17-23.
- 13. Zalba B., Marin 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. Pp. 251-283. Doi: 10.1016/S1359-4311(02)00192-8
- 14. Wada T., Kimura F. Yamamoto R. Studies on salt hydrate for latent heat storage. II. Eutectic mixture of pseudo-binary system CH3CO2Na·3H2O-CO(NH2)2. Bulletin of the Chemical Society of Japan. 1983. Vol. 56. No. 4. Pp. 1223-1226.
- 15. Li J. H., Zhang G. E., Wang J. Y. Investigation of a eutectic mixture of sodium acetate trihydrate and urea as latent heat storage. Solar Energy. 1991. Vol. 47. No. 6. Pp. 443-445. Doi: 10.1016/0038-092X(91)90112-A.
- 16. Kenisarin M. M. Short-term storage of solar energy. 1. Low temperature phase-change materials. Ap-plied Solar Energy. 1993. Vol. 29. No. 2. Pp. 48-65.
  - 17. Cabeza L., Heinz A., Streicher W. A Report of IEA Solar Heating and Cooling programme Task 32, [Advanced storage concepts for solar and low energy buildings]. Spain: IEA SHC. 2005. Pp. 1-33.
  - 18. Pure Temp [Elektronnyy resurs]. URL: https://www.puretemp.com/ (data obrashcheniya 19.08.2019).
  - 19. Pluss [Elektronnyy resurs]. URL: https://www.pluss.co.in/ (data obrashcheniya 20.08.2019).
  - 20. PCM [Elektronnyy resurs]. URL: https://www.pcmproducts.net (data obrashcheniya 21.08.2019).
  - 21. Climator [Elektronnyy resurs]. URL: https://www.climator.com/ (data obrashcheniya 21.08.2019).
  - 22. Rubitherm GmbH [elektronnyy resurs] https://www.rubitherm.eu. (data obrashcheniya 23.08.2019).
  - 23. Feldman D., Shapiro M. M., Banu D. Organic phase change materials for thermal energy storage. Solar Energy Mater. 1986. Vol. 13. No. 1. Pp. 1-10. Doi.org/10.1016/0165-1633(86)90023-7
- 24. Dimaano M. N. R., Watanabe T. The capric-lauric acid and pentadecane combination as phase change material for cooling applications. Applied Thermal Engineering. 2002. Vol. 22. No. 4. Pp. 365-377. Doi.org/10.1016/S1359-4311(01)00095-3
- 25. Dimaano M. N. R., Watanabe T. The capric and lauric acid mixture with chemical additives as latent heat storage materials for cooling application. Energy. 2002. Vol. 27. No. 9. Pp. 869-888.
  - 26. Sari A., Kaygusuz K. Thermal performance of mystiric acid as a phase change material for energy storage application. Renewable Energy. 2001. Vol. 24. No. 2. Pp. 303-317.
  - 27. Sari A., Kaygusuz K. Thermal performance of palmitic acid as a phase change energy storage material. Energy Conversion and Management. 2002. Vol. 43. No. 6. Pp. 863-876.
  - 28. Sari A., Kaygusuz K. Thermal energy storage system using some fatty acids as latent heat energy storage materials. Energy Sources. 2001. Vol. 23. No. 3. Pp. 275-285.
- 29. Sari A., Kaygusuz K.Thermal energy storage system using stearic acid as a phase change material. So-lar Energy. 2001. Vol. 71. No. 6. Pp. 365-376. Doi: 10.1016/S0038-092X(01)00075-5.
- 30. Prokhorov A.M., Alekseev D.M., Bonch-Bruevich A.M. i dr. Fizicheskiy entsiklopedicheskiy slo-var`. M.: Sov. Entsiklopediya, 1983. 928 s.
- 31. Knunyants I.L., Vonskiy E.V., Gusev A.A. i dr. Himicheskiy entsiklopedicheskiy slovar`. M.: Sov. entsiklopediya, 1983. 792 s.
- 32. Teplofizicheskie svoystva fazoperekhodnykh teploakkumuliruyushchikh materialov v stroitel`stve / I.O. Aymbetova, U.S. Suleymenov, M.A. Kambarov, E.N. Kalshabekova, R.A. Ristavletov // Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya. 2018. №. 12. S. 9-13. Doi 10.17513/use.36966.
  - 33. Pasupathy A., Velraj R. Phase Change Material Based Thermal Storage for Energy Conservation in Building Architecture. International Energy Journal. 2006. Vol. 7. No. 2. Pp. 147-159.
  - 34. Micronal PCM [elektronnyy resurs]. URL: https://www.micronal.de (data obrashcheniya 14.07.2019).
- 35. Jaworski M., Abeid S. Thermal conductivity of gypsum with incorporated phase change material (PCM) for building applications. Journal of Power Technologies. 2011. Vol. 91. No. 2. Pp. 49-53.
- 36. Alvaro de Gracia, Cabeza L. F. Phase change materials and thermal energy storage for buildings. Ener-gy and Buildings. 2015. Vol. 103. Pp. 414-419.
- 37. Anusha A. S. Phase Change Materials. International Journal of Engineering Research and General Science. 2016. Vol. 4. No. 2. Pp. 332-338.

- 38. Silva T., Vicente R., Rodrigues F. Literature review on the use of phase change materials in glazing and shading solutions, Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. Vol. 53. No. C. Pp. 515-535. Doi: 10.1016/j.rser.2015.07.201.
- 39. Primenenie mikrokapsulirovannykh teploakkumuliruyushchikh materialov s fazovym perekhodom v stroitel`stve / F. Riossner, O.B. Rudakov, YU.S. Al`binskaya, E.A. Ivanova, V.T. Pertsev // UDK 541.11. Nauchnyy Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel`nogo universiteta. 2012. No. 5. S. 64-70.
- 40. Nazirov R. A., Taranenko D. V., Vede P. YU. Primenenie materialov s izmenyayushchimsya fazovym sostoyaniem v ograzhdayushchikh konstruktsiyakh // Stroitel`stvo i rekonstruktsiya. 2019 №2 (82). S. 90-105. Doi: 10.33979/2073-7416-2019-82-2-90-105.
- 41. Heimrath R., Haller M. Advanced storage concepts for solar and low energy buildings. [A Report of IEA Solar Heating and Cooling programme Task 32]. Austria: IWT TU Graz. 2005. Pp. 1-47.
- 42. Cao S., Gustavsen A., Uvsl?kk S., Jelle B. P., Gilbert J., Maunuksela J. The Effect of Wall-Integrated Phase Change Material Panels on the Indoor Air and Wall Temperature Hot box Experiments. [Zero emission buildings proceedings of Renewable Energy Conference]. Norway: Trondheim. 2010. Pp. 15-26.
- 43. Alkilani M. M., Sopian K., Alghoul M.A., Sohif M., Ruslan M. H. Review of solar collectors with thermal storage units. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2011. Vol. 15. No.3. Pp. 1476-1490. Doi: 10.1016/j.rser.2010.10.019.
- 44. Jesumathy S.P., Udayakumar M. and Suresh S. Heat transfer characteristics in latent heat storage sys-tem using paraffin wax. Journal of Mechanical Science and Technology. 2012. Vol. 26. No. 3. Pp. 959-965. Doi: 10.1007/s12206-011-1017-4.
- 45. Kousksou T., Mahdaoui M., Hlimi M., El Alaiji R., El Rhafiki T. Latent energy storage: Melting process around heating cylinders. Case Studies in Thermal Engineering. 2016. Vol. 8. Pp. 128-140. Doi: 10.1016/j.csite.2016.06.010.
- 46. Ravikumar M., Srinivasan S. Phase change material as a thermal energy storage material for cooling of building. Journal of Theoretical and Applied Information Technology. 2008. Vol. 15. Pp. 503-511.
  - 47. Mehling H., Cabeza L. F. Heat and cold storage with PCM: An Up to Date Introduction into Basics and Applications. Springer editions. 2008. Pp. 6-9, 15-40, 218-250, 274-280. Doi: 10.1007/978-3-540-68557-9.
- 48. Tyagi V. V., Kaushik S. C., Tyagi S. K., Akiyama T. Development of phase change materials based microencapsulated technology for buildings: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2011. Vol. 15. No. 2. Pp. 1373-1391.
- 49. Sharma A., Tyagi V.V., Chen C.R., Buddhi D. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2009. Vol. 13. No. 2. Pp. 318-345. Doi.org/10.1016/j.rser.2007.10.005.
- 50. Pendyala S. Macroencapsulation of Phase Change Materials for Thermal Energy Storage. [Graduate Theses and Dissertations]. Florida: Mechanical Engineering College of Engineering University of South. 2012. Pp. 1-96. http://scholarcommons.usf.edu/etd/4200.
- 51. Rai A. K., Kumar A. A review on phase change materials and their applications. International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology. 2012. Vol. 3. No. 2. Pp. 214-225.
- 52. Del Coz D??az J. J., Garc??a Nieto P. J., Betego?n Biempica C., Prendes Gero M. B. Analysis and optimization of the heat-insulating light concrete hollow brick walls design by the finite element method. Applied Thermal Engineering. 2007. Vol. 27. Pp. 1445-1456. Doi:10.1016/j.applthermaleng.2006.10.010.
- 53. Socaciu L. G. Thermal Energy Storage with Phase Change Materia. Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies. 2012. Vol. 11. No. 20. Pp. 75-98.
- 54. Stevens V., Craven C., Grunau B. Thermal Storage Technology Assessment, An introductory assess-ment of thermal storage in residential cold climate construction. Cold Climate Housing Research Center. 2013. February. Pp. 1-54.
- 55. Cui Y., Xie J., Liu J., Pan S. Review of Phase Change Materials Integrated in Building Walls for Energy Saving. Procedia Engineering. 2015. Vol. 121. Pp. 763-770. Doi: 10.1016/j.proeng.2015.09.027.
- 56. Zhang Y., Zhou G., Lin K., Zhang Q., Lin K., Zhang Q., Di. H. Application of latent heat thermal energy storage in buildings: State-of-the-art and outlook. Building and Environment. 2007. Vol. 42. Pp. 2197-2209. Doi: 10.1016/j.buildenv.2006.07.023.
- 57. Tan L., Kwok Y., Date A., Akbarzadeh A. Numerical Study of Natural Convection Effects in Latent Heat Storage using Aluminum Fins and Spiral Fillers. International Journal of Mechanical and Aerospace Engineering. 2012. Vol. 6. Pp. 238-245.
- 58. Haghshenaskashani S., Pasdarshahri H. Simulation of Thermal Storage Phase Change Material in Buildings. World Academy of Science, Engineering and Technology. 2009. Vol. 3. No 10. Pp. 356-360.
- 59. Bhatt V. D., Gohil K., Mishra A. Thermal Energy Storage Capacity of some Phase changing Materials and Ionic Liquids. International Journal of ChemTech Research. 2010. Vol. 2. No.3. Pp. 1771-1779.
- 60. Zhou D., Eames P. A study of a eutectic salt of lithium nitrate and sodium chloride (87-13%) for latent heat storage. Solar Energy Materials and Solar Cells. 2017. Vol. 167. Pp. 157-161. http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2017.04.016.

#### Строительные материалы и технологии

- 61. Nayak A.O., Ramkumar G., Manoj T., and Vinod R. Comparative Study between Experimental Analy-sis and CFD Software Analysis of PCM material in Thermal Energy Storage System. International Journal of Chemical Engineering and Applications. 2011. Vol. 2. No. 6. Pp. 400-407.
- 62. Ostry M., Dostalova D., Klubal T., Prikryl R., Charvat P. Micro-encapsulated phase-change materials for Latent-heat storage: thermal characteristics. Materials and technology. 2015.Vol. 49. No. 5. Pp. 813-816. Doi: 10.17222/mit.2013.210.
- 63. Chavan S., Panwar V., Rathod R. Review on Thermal Energy Storage Techniques. International Journal of Engineering Development and Research. 2015. Vol.3. No. 4. Pp. 944-948.
- 64. Lassandro P., Turi S. D. Energy efficiency and resilience against increasing temperatures in summer: the use of PCM and cool materials in buildings. International journal of heat and technology. 2017. Vol. 35. No. 1. Pp. 307-315. Doi: 10.18280/ijht.35Sp0142.
- 65. Silva T., Vicente R., Soares N., Ferreira V. Experimental testing and numerical modelling of masonry wall solution with PCM incorporation: a passive construction solution. Energy Build. 2012. Vol. 49. Pp. 235-245. Doi: 10.1016/j.enbuild.2012.02.010.
- 66. Kant K., Shukla A., Sharma A., Kumar A., Jain A. Thermal energy storage based solar drying systems: A review. Innovative Food Science and Emerging Technologies. 2016. Vol. 34. Pp. 86-99. Doi.org/10.1016/j.ifset.2016.01.007.
- 67. Abedin A. H., Rosen M. A. A Critical Review of Thermochemical Energy Storage Systems. The Open Renewable Energy Journal. 2011. Vol. 4.Pp. 42-46.

#### Информация об авторах:

#### Назиров Рашит Анварович

 $\Phi \Gamma AOУ$  ВО «Сибирский Федеральный Университет», г. Красноярск, Россия, доктор технических наук, профессор,

заведующий кафедрой «Проектирование зданий и экспертиза недвижимости».

E-mail: nazirovra@gmail.com

#### Тахтобин Анатолий Владимирович

 $\Phi \Gamma AOУ$  BO «Сибирский Федеральный Университет», г. Красноярск, Россия, аспирант кафедры «Строительные конструкции и управляемые системы».

E-mail: tahtobin@mail.ru

# **Information about authors:**

## Nazirov Rashit A.

Siberian Federal University, Krasnovarsk, Russia,

doctor of Engineering Science, professor, head of the department "Building design and property survey".

E-mail: nazirovra@gmail.com

#### Tahtobin Anatoly V.

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia,

phD student at the department «Building structures and controlled systems».

E-mail: tahtobin@mail.ru