

БОРТОВЫЕ АККУМУЛЯТОРЫ

ON-BOARD ENERGY ACCUMULATORS

Статья поступила в редакцию 19.07.19. Ред. рег. № 1723-3596-1

The article has entered in publishing office 19.07.19. Ed. reg. No. 1723-3596-1

УДК: 544.3.01

КРИТЕРИИ ВЫБОРА И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТЕПЛОАККУМУЛИРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СИСТЕМ ХРАНЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ (ОБЗОР)*

А.М. Моржухин, Д.С. Тестов, С.В. Моржухина, В.Ж. Корокин

Государственный университет «Дубна»
д. 19, ул. Университетская, г. Дубна, 141980, Россия
тел.: +7(905)509-17-10; e-mail: morzhukhin92@yandex.ru

doi: 10.15518/isjaee.2019.22-27.092-106

Заключение совета рецензентов: 25.07.19 Заключение совета экспертов: 31.07.19 Принято к публикации: 07.08.19

Проблема энергоэффективности и энергосбережения является одной из центральных для развития современной цивилизации. В Российской Федерации, как и во всем мире, разрабатываются технологии для перехода к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, а также ведется поиск новых источников и способов транспортировки и хранения энергии, что в перспективе позволит снизить затраты на использование электроэнергии и экономическую нагрузку на потребителя. В России главные проблемы применения систем аккумулирования тепла заключаются в их низкой конкурентоспособности и эффективности по сравнению с традиционными источниками тепла. Решить эти проблемы можно за счет новых композитных теплоаккумулирующих материалов краткосрочного и долгосрочного действия, с различными рабочими температурами, временем передачи тепла, различной плотностью аккумулирования тепла и т.д. в зависимости от климатических условий регионов России. Несмотря на значительное количество исследований характеристик теплоаккумулирующих материалов и попыток их систематизации, до сих пор нет количественно достоверных данных, тогда как рекомендации по выбору лежат в основе разработки оптимальных теплоаккумулирующих материалов для конкретных приложений. В настоящее время не существует достаточно эффективных тепловых аккумуляторов для хранения тепловой энергии для отопления и горячего водоснабжения зданий в сложных климатических условиях. В работе рассмотрены основные принципы накопления тепла, основные виды и свойства теплоаккумулирующих материалов, а также критерии, обуславливающие их применение в системах хранения тепловой энергии для отопления и горячего водоснабжения. Проведен предварительный выбор кристаллогидратов солей в качестве потенциальных материалов для отопительных систем. На основе факторного анализа систематизированной из доступных литературных источников количественной информации, проведена обработка данных и предложена схема выбора теплоаккумулирующих материалов для отопительных систем в сложных климатических условиях России.

Ключевые слова: теплоэнергетика; возобновляемые источники энергии; теплоаккумулирующие материалы; кристаллогидраты.

SELECTION CRITERIA AND THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF LOW-TEMPERATURE HEAT STORAGE MATERIALS FOR THERMAL ENERGY STORAGE SYSTEMS (REVIEW)

*Моржухин А.М., Тестов Д.С., Моржухина С.В., Корокин В.Ж. Критерии выбора и теплофизические свойства низкотемпературных теплоаккумулирующих материалов для систем хранения тепловой энергии (обзор) // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE), 2019;22-27:92-106.



A.M. Morzhukhin, D.S. Testov, S.V. Morzhukhina, V.Z. Korokin

Dubna State University
19 Universitetskaya Str., Dubna, 141980, Russia
tel.: +7(905)509 17 10, e-mail: morzhukhin92@yandex.ru

doi: 10.15518/isjaee.2019.22-27.092-106

Referred 25 July 2019 Received in revised form 31 July 2019 Accepted 7 August 2019

The problem of energy efficiency and energy saving is one of the central for the development of modern civilization. In the Russian Federation and all over the world, scientists develop technologies for transition to environmentally friendly and resource-saving energy, search for new sources and ways of transporting and storing energy that will eventually reduce the use of electricity and reduce economic burden on the consumer. Low economic competitiveness and efficiency in comparison with traditional heat sources is the main problem of heat storage systems application in Russia. This problem can be solved by means of new short-term and long-term composite heat storage materials with different operating temperatures, heat transfer time, different heat storage density, etc., depending on the climatic conditions of the Russia regions. Despite a significant number of studies on the characteristics of heat-accumulating materials and attempts to systematize them, there are still no quantitatively reliable data, at the same time recommendations for selection are the basis for the development of optimal heat storage materials for specific applications. Thus the effective heat accumulators for storage of thermal energy for heating and hot water supply of buildings in difficult climatic conditions have not been created. The paper considers the basic principles of heat accumulation, the main types and properties of heat-accumulating materials, and also the criteria for their use in thermal energy storage systems for heating and hot water supply. We have preliminary carried out the selection of hydrated salts as potential materials for heating systems. On the basis of the factor analysis of the quantitative information systematized from available literary sources, we have carried out the data processing and proposed the scheme of the choice of the heat-accumulating materials for heating systems in difficult climatic conditions of Russia.

Keywords: heat power energy; renewable energy sources; heating storage materials; crystalline hydrates.



Артём Маркович Моржухин
Artem Morzhukhin

Сведения об авторе: аспирант, старший преподаватель кафедры химии, новых технологий и материалов, Государственный университет «Дубна».

Образование: МАИ (2015 г.).
Область научных интересов: теплоаккумулирующие материалы; теплоэнергетика.

Публикации: 2.
h-index 1; ORCID 0000-0002-4584-347X

Information about the author: Ph.D. student, Senior Lecturer of the Chemistry Department, Dubna State University.

Education: MAI, 2015.
Research interests: heat storage materials; heat power engineering.

Publications: 2.



Дмитрий Сергеевич Тестов
Dmitriy Testov

Сведения об авторе: аспирант, ассистент кафедры химии, новых технологий и материалов.

Образование: Государственный университет «Дубна» (2019 г.).

Область научных интересов: теплоаккумулирующие материалы; теплоэнергетика.

Information about the author: Ph.D. student, Senior Lecturer of the Chemistry Department, Dubna State University

Education: Dubna State University, 2019.

Research interests: heat storage materials; heat power engineering.



Светлана Владимировна Моржухина
Svetlana Morzhukhina

Сведения об авторе: канд. хим. наук, доцент, заведующий кафедрой химии, новых технологий и материалов, Государственный университет «Дубна».

Образование: Ленинградский технологический институт (1991 г.).

Область научных интересов: теплоаккумулирующие материалы; теплоэнергетика.

Публикации: 25.
h-index 4; ORCID 0000-0001-8395-136X

Information about the author: Ph.D. in Chemistry, Assistant Professor at the Heat of the Chemistry Department, Dubna State University.

Education: Leningrad Institute of Technology, 1991.

Research interests: heat storage materials; heat power engineering.

Publications: 25.



Виталий Жанович Корокин
Vitaliy Korokin

Сведения об авторе: канд. хим. наук, доцент кафедры химии, новых технологий и материалов, Государственный университет «Дубна».

Образование: Государственный университет «Дубна» (2012 г.).

Область научных интересов: теплоаккумулирующие материалы; теплоэнергетика.

Публикации: 31.

h-index 3

Information about the author: Ph.D. in Chemistry, Assistant Professor at the Chemistry Department Dubna State University.

Education: Dubna State University, 2012.

Research interests: heat storage materials; heat power engineering.

Publications: 31.

1. Введение

В России, как и во всем мире [1], в качестве приоритетных поставлены задачи перехода к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике и формированию новых способов транспортировки и хранения энергии.

Значительная доля в потреблении энергии приходится на тепловую энергию для отопления и горячего водоснабжения зданий. Среди различных систем аккумулирования энергии, технология накопления тепла имеет самую низкую стоимость [2], при этом за аккумулированием скрытой тепловой энергии признано колоссальное будущее для энергосбережения и повышения энергоэффективности [3, 4].

Ядром системы хранения тепловой энергии (СХТЭ) является теплоаккумулирующий материал (ТАМ). В последние годы вопросы подготовки и применения высокоэффективных ТАМ широко обсуждаются и исследуются для того, чтобы преодолеть несоответствие между спросом и предложением энергии, а также снизить потребление невозобновляемых источников энергии [2, 5, 6]. Следует отметить, что СХТЭ способна снизить потребление энергии для обогрева помещений в зимнее время почти на 32 % [7].

К настоящему времени в качестве ТАМ апробировано большое количество веществ для различных температурных уровней, при этом поиски ТАМ, удовлетворяющего всему комплексу требований, продолжаются [8]. Об этом свидетельствует возрастающая публикационная активность (по данным Science Direct). Так, в обзоре [3] содержится описание и характеристика более 150, а в работе [4] более 300 материалов, предлагаемых в качестве ТАМ для регионов с мягким климатом. Однако только 45 из них являются коммерчески доступными. Кроме того, до сих пор не синтезировано оптимальных ТАМ для целей отопления и горячего водоснабжения [9]. Важно отметить, что по свойствам разработанных к настоящему времени ТАМ в литературе накоплен большой объем информации, но, как правило, не в систематизированном виде.

В связи с этим, для того чтобы сделать правильный выбор среди огромного числа изученных в качестве потенциальных ТАМ веществ для отопления и горячего водоснабжения в сложных климатических условиях России, сначала необходимо определить наиболее важные критерии отбора данных материалов.

Список обозначений	
<i>Буквы латинского алфавита</i>	
C_p	Теплоемкость, Дж/кг·°С
ΔH	Энтальпия, Дж/кг
N	Теплопроводность, Вт/м·°С
n	Стоимость 1 кг ТАМ, руб/кг
ρ	Плотность, кг/м ³
T	Температура, °С
S	Количество запасенной теплоты в единице объема ТАМ, кВт·ч/м ³
<i>Индексы нижние</i>	
пл	Плавление
<i>Аббревиатуры</i>	
ДСК	Дифференциальная сканирующая калориметрия
СХТЭ	Системы хранения тепловой энергии
ТАМ	Теплоаккумулирующие материалы
ТГ	Температурный гистерезис
ФТАМ	Фазопереходные теплоаккумулирующие материалы



2. Методы аккумулирования тепла

Принято выделять [10–12] три метода аккумулирования тепловой энергии за счет: теплоемкости твердой и жидкой среды; скрытой теплоты фазовых переходов; тепловых эффектов химических реакций.

Наиболее распространенными и простыми в применении являются тепловые аккумуляторы, в которых используется теплоемкость вещества [6]. Другие методы, такие как накопление скрытой теплоты фазовых переходов и накопление термохимической энергии, появились недавно и подразумевают большую емкость накопления тепла [2]. Хранение тепловой энергии с помощью фазопереходных теплоаккумулирующих материалов (ФТАМ) – это наиболее подходящая и перспективная технология, основанная на принципе поглощения или выделения больших количеств энергии при определенной температуре во время фазового перехода [12, 13] и способная обеспечить высокую плотность аккумулирования тепловой энергии [3].

ФТАМ имеют множество преимуществ, таких как распространенность в природе, широкий диапазон рабочих температур и низкая стоимость [14], поэтому ФТАМ широко применяются в солнечных энергетических системах для аккумулирования тепла, тем самым повышая эффективность использования солнечной энергии [15, 16] от 26 % до 66 %, в зависимости от конкретных условий. Так, например, применение $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ в водонагревательных системах (до $T = 60^\circ\text{C}$) уменьшает объем аккумулятора на 32 % по сравнению с водяным (емкостным ТАМ), а в системах отопления (до $T = 90^\circ\text{C}$) – на 55 % [17]. В [18] показано, что ФТАМ торговой марки РТ-48 аккумулируется в 5,22 раза больше тепловой энергии, чем водой – самым эффективным емкостным ТАМ.

Таким образом, для климатических условий России наиболее перспективными видами ТАМ являются фазопереходные, поэтому далее будут рассматриваться свойства и характеристики ФТАМ в целях

обоснования критериев их выбора для отопления и горячего водоснабжения зданий.

3. Виды ФТАМ

Несмотря на очевидное преимущество ФТАМ, выбор конкретных материалов для аккумулирования тепла является сложной задачей и в настоящее время осуществляется скорее методом проб и ошибок, а не в результате систематических целенаправленных исследований [19]. При этом выбор осложняется тем, что существуют сотни ФТАМ, которые могут использоваться при различных температурах в соответствии с требованиями конкретного приложения [20].

Проблемы создания СХТЭ на основе органических ФТАМ начали привлекать внимание с 1970-х гг., и на этом направлении были достигнуты некоторые успехи [21]. Тем не менее доведение таких систем до практического применения было ограничено их низкой термостабильностью, теплопроводностью и высокими пожароопасностью и стоимостью [22]. Коммерчески доступные органические ФТАМ достаточно изучены, но базы данных ФТАМ, подходящих для конкретного применения, не сформировано [23].

По сравнению с органическими ФТАМ, кристаллогидраты солей имеют огромные преимущества в скрытом накоплении тепловой энергии, например, более высокую теплопроводность и теплоту фазового перехода, более низкую цену, доступность и негорючесть [24–26]. Кроме того, в последние годы активно исследуются и разрабатываются высокоэффективные композитные и инкапсулированные материалы для СХТЭ [4, 27], что для российского рынка сильно удорожает производство ФТАМ и делает его менее доступным и неконкурентоспособным по сравнению с традиционными источниками энергии.

По температурному интервалу ФТАМ можно разделить на четыре группы (табл. 1).

Классификация ФТАМ по диапазону рабочих температур

Таблица 1

Classification PCM on temperature range

Table 1

Поток	Низкотемпературные	Среднетемпературные	Высокотемпературные	Источник
1	$20^\circ\text{C} < T < 200^\circ\text{C}$	$200^\circ\text{C} < T < 500^\circ\text{C}$	$T > 500^\circ\text{C}$	[6]
2	$20^\circ\text{C} < T < 120^\circ\text{C}$	$120^\circ\text{C} < T < 300^\circ\text{C}$	$T > 300^\circ\text{C}$	[28]
3	$5^\circ\text{C} < T < 40^\circ\text{C}$ для отопления и охлаждения зданий	$40^\circ\text{C} < T < 80^\circ\text{C}$ для солнечного отопления, горячей воды	$80^\circ\text{C} < T < 200^\circ\text{C}$ для выработки электроэнергии	[12]
4	$T < 200^\circ\text{C}$	$200^\circ\text{C} < T < 500^\circ\text{C}$	$T > 500^\circ\text{C}$	[29]

Как показано в табл. 1, исследователи имеют разные взгляды на данную классификацию.

Потребность в среднетемпературном диапазоне составляет 30 % от общей потребности тепла в различных отраслях промышленности [30] и в жилом секторе. В [31] приложения разделены по темпера-

туре фазового перехода: до 21°C для охлаждения, $22\div 28^\circ\text{C}$ для отопления и $29\div 60^\circ\text{C}$ для горячего водоснабжения. В связи с этим далее будут анализироваться критерии выбора низкотемпературных ТАМ для $20^\circ\text{C} < T < 120^\circ\text{C}$ согласно [28].

При характеристике большинства ФТАМ, которые могут использоваться в этом температурном диапазоне, исследователи чаще всего ограничиваются температурой и теплотой фазового перехода с эпизодическим предоставлением данных с точки зрения затрат, оценки воздействия на окружающую среду и других аналогичных вопросов. На основании таких скудных данных выбор оптимальных ФТАМ осуществить невозможно.

Полный процесс хранения тепловой энергии включает в себя как минимум три этапа: зарядка, хранение и разрядка. При указанной практически во всех исследованиях $T_{пл}$ для ФТАМ, происходит зарядка системы теплового аккумулирования, а разрядка – при сильно отличающихся температурах, соответствующих началу процесса кристаллизации, который большинством исследователей количественно не характеризуется. Поэтому для окончательного выбора ФТАМ необходим учет температуры кристаллизации и температурного гистерезиса ФТАМ, иначе существует риск, что тепловой аккумулятор будет иметь диапазон рабочей температуры за пределами температуры кристаллизации материала.

4. Критерии выбора теплоаккумулирующих материалов

Критерии выбора:

1. Термические свойства:
 - 1) температура плавления ($T_{пл}$) [8, 32–35];
 - 2) диапазон рабочей температуры разрабатываемого приложения [36–38];
 - 3) удельная (на единицу массы или объема) энтальпия плавления [34, 36, 39, 40];
 - 4) удельная теплоемкость в жидкой и твердой фазах [34–36, 38, 40];
 - 5) высокая плотность аккумулирования тепловой энергии [35, 41, 42] (количество запасенной теплоты в единице объема ТАМ; такая формулировка точнее отражает заложенные в нее функции);
 - 6) теплопроводность [34, 36, 40, 43–47];
 - 7) коэффициент теплообмена [47];
 - 8) конгруэнтное плавление [34, 47, 48];
 - 9) отсутствие сегрегации [34, 47, 48];
 - 10) стабильность теплофизических свойств [34].
2. Кинетические свойства:
 - 1) высокая скорость кристаллизации [37, 48];
 - 2) минимальный перегрев (переохлаждение) при фазовом переходе [34, 39, 45].
3. Физические свойства:
 - 1) плотность [34, 40, 50];
 - 2) вязкость в жидкой фазе [27];
 - 3) упругость паров [33, 36, 40];
 - 4) коэффициент теплового расширения [27, 36];
 - 5) скорость потока теплоносителя [49].
4. Химические свойства:
 - 1) химическая, термохимическая и термодинамическая стабильность в рабочем диапазоне температу-

ры, отсутствие химических превращений [34, 36, 40, 43, 51];

2) коррозионная неактивность, неагрессивность к конструкционным материалам [34, 36, 51];

3) экологическая безопасность [38, 40];

4) вещество должно быть безвредным (нетоксичным, негорючим) [34, 40].

5. Экономические:

1) распространенность в природе и его доступность в промышленных масштабах [34, 48, 40];

2) низкая стоимость [48, 38, 40];

3) количество аккумулированной энергии, приходящейся на 1 руб. ТАМ [41].

Разработка ФТАМ без учета этих критериев приводит к низкой эффективности тепловых аккумуляторов. Например, в работе [52] приведен выбор ТАМ для СХТЭ на основании теплоты и температуры фазового перехода, плотности, теплопроводности, но при этом не учитываются такие важные свойства, как стоимость, пожароопасность, токсичность, теплоемкость, термическая устойчивость, конгруэнтность плавления.

Во многих исследованиях, например [8, 45], показано, что одними из преимуществ органических ФТАМ являются низкая стоимость и коррозионная неактивность. На российском же рынке стоимость данных веществ достаточно высока, а доступность низкая. Кроме того, последние исследования показали коррозионную активность и пожароопасность этих веществ [53]. Несмотря на большой объем информации о свойствах солевых систем, применяемых в качестве ФТАМ [4, 54], некоторые исследования частично не подтверждают эти данные [56]. При этом крайне мало число комплексных и систематических исследований таких ТАМ [41, 56], а многие теплофизические свойства приводятся с большим разбросом значений [27]. Так, температура фазового перехода $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ варьируется от 35 °С до 40 °С [57–59].

На практике при выборе ТАМ для конкретного приложения трудно выполнить все условия по анализу соответствия свойств материала всем двадцати четырем критериям выбора одновременно. Несмотря на систему взаимосвязи свойств ТАМ и системы хранения тепловой энергии [60], систематизация и выбор материала для конкретного приложения пока основываются только на двух обязательных критериях – температуре и теплоте фазового перехода.

Ввиду большого количества энергии, которая аккумулируется в ФТАМ, количество запасенной в единице объема теплоты в них больше, чем в теплоемкостных ТАМ, поэтому можно уменьшить вес и снизить стоимость теплового аккумулятора [61, 62]. Однако у ФТАМ существуют и недостатки, препятствующие их применению в СХТЭ: низкая скорость теплопередачи [63]; переохлаждение; разделение фаз; утечка в расплавленном состоянии; нестабильность производительности [64]; высокая стоимость. Органические соединения имеют высокую стоимость, являются пожароопасными. И те, и другие



соединения имеют в принципе низкую для СХТЭ теплопроводность и скорость теплопередачи. Инкапсулирование может значительно улучшить скорость теплопередачи [4]. Но выявлен ряд проблем [58], которые пока не позволяют масштабно применять такие ТАМ.

4.1. Влияние характеристик ТАМ на эффективность работы теплового аккумулятора

Для понимания, какие из двадцати четырех критериев выбора ТАМ являются определяющими для эффективной работы тепловых аккумуляторов, необходимо провести анализ степени их изученности и влияния на работу СХТЭ.

4.1.1. Температура плавления

Температура плавления обязательно должна быть в пределах диапазона рабочих температур разрабатываемого приложения. Если $T_{пл}$ ФТАМ ниже или выше температурного диапазона приложения, то запрещается использование материалов в качестве ФТАМ [52]. Методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) можно точно измерить $T_{пл}$ и кристаллизации материалов, а также определить температурный гистерезис (ТГ) (рис. 1). ТГ пропорционален потерям энергии системы. Кроме того, ТАМ не могут быть использованы, если ТГ находится за пределами диапазона рабочих температур системы аккумулирования тепла [65].

Одним из способов устранения недостатков применения кристаллогидратов солей в качестве ФТАМ является получение бинарных или многокомпонентных смесей на их основе [13]. С целью оптимизации длительных и трудоемких экспериментов по исследованию бинарных и многокомпонентных смесей, предлагается ряд подходов для моделирования и расчета температуры плавления, но абсолютные ошибки велики [13, 66–69].

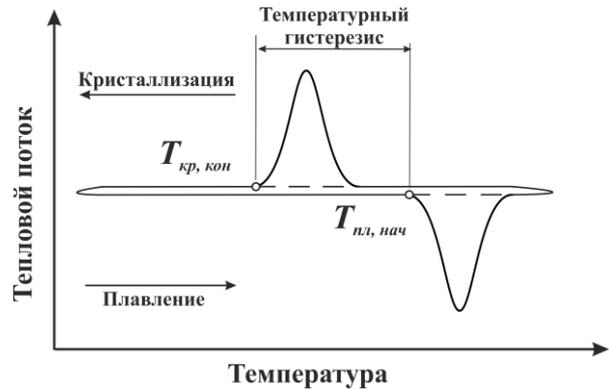


Рис. 1 – Схема определения температуры фазовых переходов и температурного гистерезиса методом ДСК [65]
Fig. 1 – The scheme for determining of the phase transitions temperature and hysteresis temperature by DSC [65]

Многочисленные программы, такие как Factsage™, Thermo-Calc™ и OpenCalphad™ широко применяются для прогнозирования теплофизических свойств смесей. Однако недавние исследования [15, 71–72] описывают случаи, когда смоделированные свойства значительно отличаются от экспериментальных результатов.

4.1.2. Скрытая теплота фазового перехода

Значения скрытой теплоты фазового перехода могут быть рассчитаны из области, включенной в эндотерму плавления ДСК (см. рис. 1). Фазовые переходы ФТАМ должны происходить в узком диапазоне температур [52]. Проблемой является отсутствие надежных экспериментальных данных по теплоте плавления [19, 60]. Даже для индивидуальных ТАМ имеются противоречивые данные [41]. На рис. 2 представлены температура и теплота фазовых переходов некоторых ФТАМ, потенциально пригодных для СХТЭ.

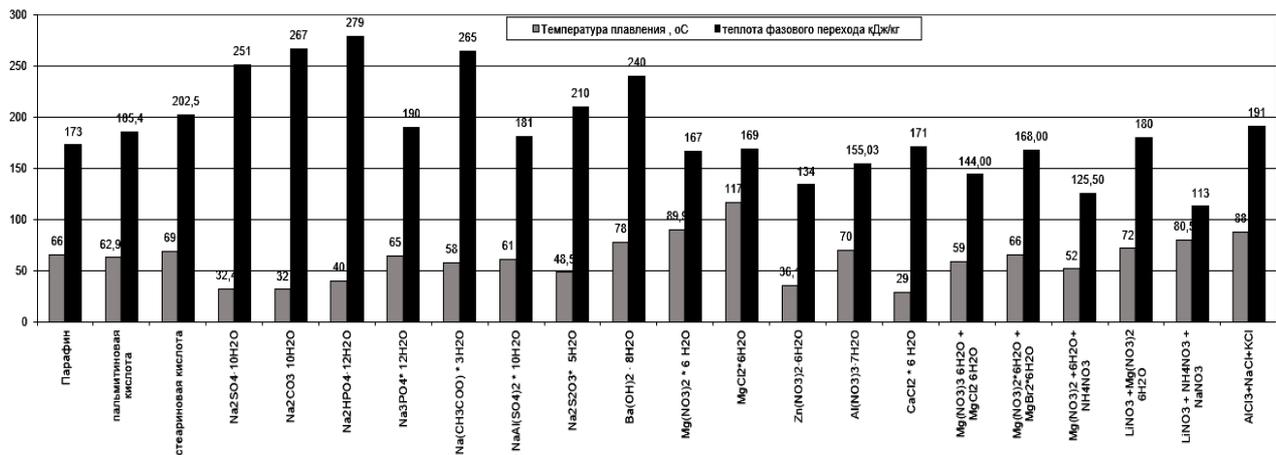


Рис. 2 – Температура плавления и теплота плавления ФТАМ для СХТЭ [3, 22, 41, 48, 52, 72–74]
Fig. 2 – Melting point and melting heat of PCM for storage systems [3, 22, 41, 48, 52, 72–74]



4.1.3. Количество запасенной теплоты объемом материала

До сих пор в обзоре употреблялся термин «плотность аккумулирования энергии», взятый из работ [35, 41, 42], но с точки зрения понимания данной характеристики и ее важности при оценке эффективности ТАМ больше подходит другой термин – «количество запасенной теплоты в единице объема материала». Количество запасенной теплоты в объеме материала S коррелирует с энтальпией фазового перехода, определяется энтальпией и плотностью вещества. Этот показатель имеет большое значение для

определения количества аккумулирования тепла приходящегося на 1 рубль стоимости ТАМ.

4.1.4. Теплоемкость

Высокая удельная теплоемкость уменьшает массу и объем теплового аккумулятора, плотность аккумулирования энергии, приводит к повышению рентабельности системы аккумулирования тепла [46, 38, 40]. На рис. 3 приведены значения удельной теплоемкости некоторых ФТАМ, потенциально пригодных для систем хранения тепловой энергии, из числа представленных на рис. 2.

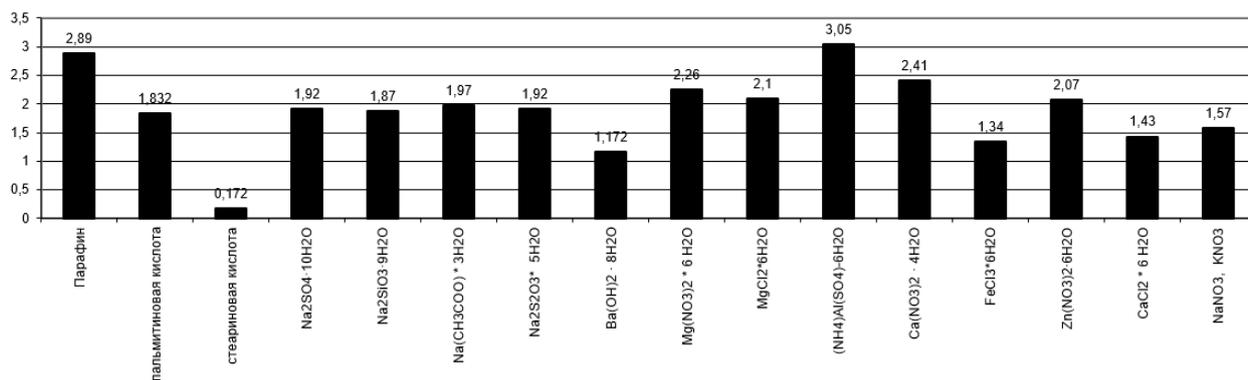


Рис. 3 – Удельная теплоемкость потенциальных ФТАМ для СХТЭ [3, 22, 41, 48, 52, 72–74]
 Fig. 3 – Specific heat of potential PCM for storage systems [3, 22, 41, 48, 52, 72–74]

Рис. 2 и 3 ярко иллюстрируют отсутствие данных по удельной теплоемкости для большинства исследованных ТАМ. Удельная теплоемкость органических ФТАМ, которые в настоящее время наиболее часто применяются при аккумулировании тепловой энергии, наименьшая.

4.1.5. Переохлаждение

Переохлаждение – это метастабильное состояние ФТАМ, в котором остается жидкая фаза при охлаждении ниже температуры плавления. Переохлажденная жидкость требует дополнительной энергии для высвобождения хранимой скрытой теплоты (рис. 4, 5).

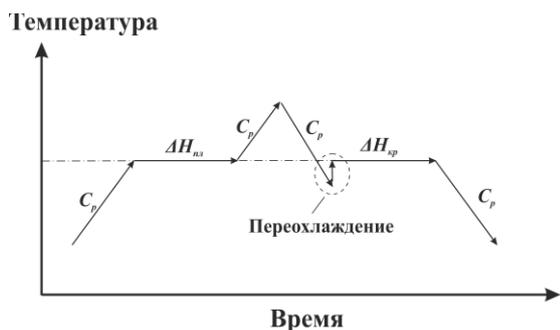


Рис. 4. – Схема накопления и высвобождения теплоты [75]
 Fig. 4. – Scheme of accumulation and release heat [75]

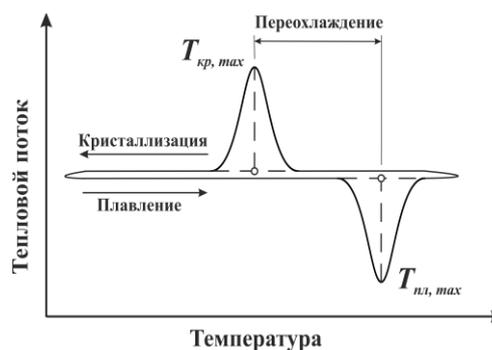


Рис. 5 – Определение переохлаждения методом ДСК [76]
 Fig. 5 – DSC determination of supercooling [76]

Кристаллогидраты солей долгое время считались трудной темой в области ТАМ [77], поскольку проблемы разделения фаз, высокая степень переохлаждения являются общими недостатками для гидратированных солей и, таким образом, критически ограничивают их применение для накопления энергии [5]. Возможные подходы к снижению степени переохлаждения кри-

сталлогидратов солей могут быть следующими: добавление зародышеобразователя, который имеет сходную кристаллическую структуру; использование подходящего загустителя для предотвращения неконгруэнтного плавления; использование контейнеров и теплообменников с шероховатой поверхностью [78]. Загуститель также способствует предотвращению фазовой сегрега-

ции [79], но снижает теплопроводность смеси, скорость кристаллизации и теплопередачи [76].

4.1.6. Теплопроводность

Все ФТАМ – как органические, так и неорганические – обладают очень низкой теплопроводностью, что приводит к медленной зарядке и разрядке теплового аккумулятора [80]. Несмотря на то что разработанные ФТАМ могут иметь высокую объемную плотность аккумулирования тепла, медленные темпы фазовых переходов снижают их эффективность и увеличивают стоимость применения [4, 71, 80]. При этом теплопроводность органических веществ существенно ниже, чем у ряда кристаллогидратов. Поиск ФТАМ с более высокой теплопроводностью привел к разработке компози- тов, которые могут увеличить этот показатель [75, 81–82].

Методы улучшения теплофизических свойств ФТАМ, разработанные в течение последнего десятилетия, согласно обзору [81] могут быть разделены на три категории с использованием: добавок с высокой теплопроводностью и пористых сред для улучшения теплопроводности ФТАМ (высокопроницаемые металлические и углеродные наночастицы, углеродные материалы, металлические пены, вспененный графит и др.) и инкапсулирование материалов [80, 82–83]; оребренных труб для расширения поверхности теплопередачи; многоступенчатых или каскадных систем хранения тепловой энергии.

4.1.7. Плотность

Материалы с высокой плотностью привлекательны в качестве ФТАМ [52]. На рис. 6 показаны плотности некоторых ФТАМ и то, что плотность органических ФТАМ гораздо меньше, чем неорганических.

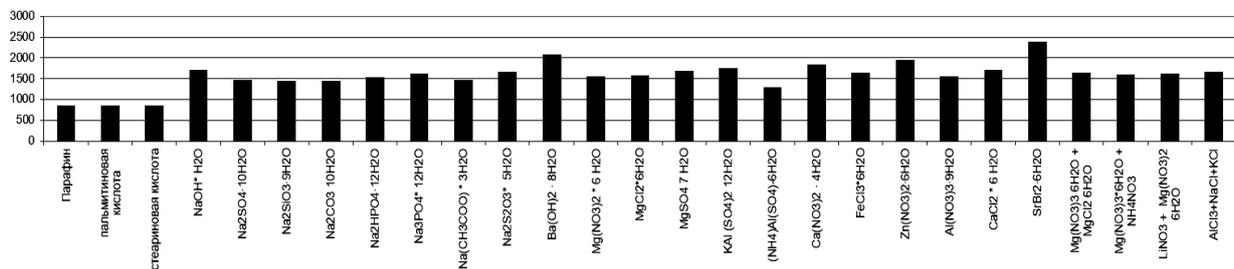


Рис. 6 – Плотность ФТАМ [3, 22, 41, 48, 52, 72–74]
Fig. 6 – Phase change materials density [3, 22, 41, 48, 52, 72–74]

4.1.8. Факторный анализ

При таком большом количестве противоречивых и недостаточно изученных критериев выбора ТАМ, а также отсутствия систематизированной количественной информации встает задача или создания базы данных по всем критериям выбора, или выявления наиболее значимых критериев с целью их сокращения и оптимизации процесса выбора ФТАМ для конкретного приложения. Первый путь требует от разработчиков потенциальных ТАМ расширенного перечня экспериментальных исследований и согласования условий проведения этих экспериментов с целью получения воспроизводимых данных, что в настоящее время представляется нереальной задачей.

В качестве значимых параметров рассматривались теплота ΔH и температура фазового перехода, плотность ρ , теплоемкость C_p , коэффициент теплопроводности N , переохлаждение, количество запасенной теплоты в единице объема материала S , стоимость 1 кг ТАМ n , количество аккумулированной энергии, приходящейся на 1 руб. ТАМ. Факторный анализ позволил оценить перспективность наиболее часто упоминаемых в литературе ФТАМ. Анализ мощности, являющийся неотъемлемой частью факторного анализа, позволяет оценить объем выборки критериев для дальнейшего исследования отобранных веществ. Поскольку свойства материала (здесь параметры) взаимосвязаны, их взаимоотношения определяют важ-

ность того или иного свойства при выборе материалов. Мощность является численной оценкой значимости рассматриваемых параметров, которые ранжируются по степени их влияния на пригодность использования материала в качестве ТАМ [84].

Следует учитывать, что факторный анализ в общем и анализ мощности в частности опирается на численную оценку свойств материалов. Тем не менее результаты факторного анализа коррелируют с литературными данными по наиболее эффективным ФТАМ, что позволяет использовать их для оценки значимости физико-химических и экономических параметров в контексте выбора перспективных материалов.

На рис. 7 видно, что существенную роль на свойства системы оказывают такие физико-химические параметры (перечислены в порядке уменьшения степени влияния), как энтальпия фазового перехода ΔH , количество запасенной теплоты единицей объема ТАМ S , плотность ρ материала, теплопроводность N , теплоемкость C_p и стоимость n .

Таким образом, предлагается схема, позволяющая поэтапно рассмотреть все критерии при выборе ТАМ для конкретного приложения, поскольку на практике трудно выполнить все условия одновременно. Убедившись, что материал соответствует, по крайней мере, основному критерию (подходящая температура фазового перехода), можно переходить к рассмотрению остальных критериев.



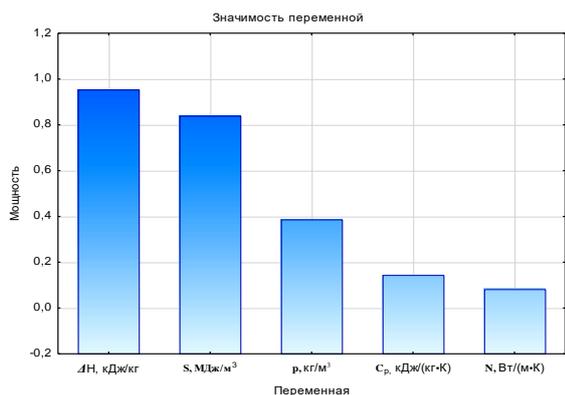


Рис. 7 – Анализ мощности рассматриваемых переменных
Fig. 7 – Analysis of the power of the variables under consideration

Для этого предлагается разделить все критерии на три группы:

1. Критерии безопасности (экологическая, химическая, пожарная, коррозионная и т.д.), рассматриваемые в первую очередь.

2. Критерии, от которых в большей мере зависит применение ТАМ в конкретном приложении; выбор предлагается осуществить на основе факторного анализа свойств потенциальных ТАМ для конкретного приложения.

3. Критерии, которые, являясь недостатками ТАМ, тем не менее, могут быть улучшены или устранены при помощи различных методов, в частности, при получении композитных материалов на основе выбранных ТАМ (теплоемкость, теплопроводность, фазовая сегрегация, переохлаждение и т.д.).

5. Заключение

Наиболее перспективными для создания эффективных систем хранения тепловой энергии для климатических условий России являются кристаллогидраты, которые относятся к фазопереходным теплоаккумулирующим материалам. По сравнению с наиболее часто применяемыми органическими ФТАМ, кристаллогидраты обладают более высокой энтальпией фазовых переходов, температурой фазовых переходов, максимально соответствующей диапазону рабочих температур СХТЭ, они доступны, имеют низкую стоимость. При этом и кристаллогидраты, и органические ФТАМ имеют в целом низкие теплоемкость и теплопроводность. К основным недостаткам, которые пока не позволяют применять кристаллогидраты в качестве ФТАМ, относятся их инконгруэнтное плавление, фазовая сегрегация и переохлаждение.

В перечень многочисленных критериев выбора ФТАМ многими исследователями не вносятся такие важные для проектирования СХТЭ показатели, как температура кристаллизации и температурный гистерезис. При этом из 24 необходимых свойств ФТАМ в основном определяются температура и энтальпия плавления, которых недостаточно для про-

ектирования эффективной СХТЭ. Более того, данные, полученные исследователями, не согласуются и часто не подтверждаются

Предложенная схема выбора ТАМ на базе факторного анализа свойств кристаллогидратов показала свою эффективность. После выбора перспективных ФТАМ необходимо принять меры по устранению основных недостатков (инконгруэнтное плавление, фазовая сегрегация, переохлаждение), увеличению теплоемкости и теплопроводности.

Список литературы

[1] Lin, Y. Review on thermal conductivity enhancement, thermal properties and applications of phase change materials in thermal energy storage / Y. Lin [et al.] // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2018. – Vol. 82. – P. 2730–2742.

[2] Le Pierres, B.S.N. Storage of thermal solar energy / B.S.N. Le Pierres [et al.] // *C. R. Physique*. – 2017. – Vol. 18. – P. 401–414.

[3] Barreneche, C. New database to select phase change materials: Chemical nature, properties, and applications / C. Barreneche [et al.] // *Journal of Energy Storage*. – 2015. – Vol. 3. – P. 18–24.

[4] Pielichowska, K. Phase change materials for thermal energy storage / K. Pielichowska [et al.] // *Progress Mater. Sci.* – 2014. – Vol. 65. – P. 67–123.

[5] Li, T.X. Experimental investigation on copper foam/hydrated salt composite phase change material for thermal energy storage / T.X. Li [et al.] // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2017. – Vol. 115. – P. 148–157.

[6] Белименко, С.С. Разработка критериев эффективности заряда и разряда твердотельного теплового аккумулятора / С.С. Белименко [и др.] // *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту*. – 2014. – Т. 53. – № 5. – С. 7–17.

[7] Hammou, Z.A. A new PCM storage system for managing simultaneously solar and electric energy / Z.A. Hammou [et al.] // *Energy Build.* – 2006. – Vol. 38. – P. 258–65.

[8] Гаматаева, Г.Ю. Технично-експлуатационные свойства теплоаккумулирующих материалов / Г.Ю. Гаматаева [и др.] // *Материалы X Всероссийской научной конференции. Издательство: Северо-Осетинский государственный университет им. К.Л. Хетагурова (Владикавказ)*. – 2016. – С. 187–190.

[9] Nkwetta, D.N. Thermal energy storage with phase change material—A state-of-the art review / D.N. Nkwetta, F. Haghghat // *Sustainable Cities and Society*. – 2014. – Vol. 10. – P. 87–100.

[10] Sögütöglu, L.C. In-depth investigation of thermochemical performance in a heat battery: Cyclic analysis of K_2CO_3 , MgCl_2 and Na_2S / L.C. Sögütöglu [et al.] // *Applied Energy*. – 2018. – Vol. 215. – P. 159–173.

[11] Jaguemont, J. Phase-change materials (PCM) for automotive applications: A review / J. Jaguemont [et al.]



- al.] // *Applied Thermal Engineering*. – 2018. – Vol. 132. – P. 308–320.
- [12] Du, K. A review of the applications of phase change materials in cooling, heating and power generation in different temperature range / K. Du [et al.] // *Applied Energy*. – 2018. – Vol. 220. – P. 242–273.
- [13] Nazir, H. Recent developments in phase change materials for energy storage applications: A review / H. Nazir [et al.] // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2019. – Vol. 129. – P. 491–523.
- [14] Bouhal, T. Numerical modeling and optimization of thermal stratification in solar hot water storage tanks for domestic applications: CFD study / T. Bouhal [et al.] // *Sol. Energy*. – 2017. – Vol. 157. – P. 441–455.
- [15] Huang, H. An experimental investigation on thermal stratification characteristics with PCMs in solar water tank / H. Huang [et al.] // *Solar Energy*. – 2019. – Vol. 177. – P. 8–21.
- [16] Burak, K. Effect of rectangular hot water tank position and aspect ratio on thermal stratification enhancement / K. Burak [et al.] // *Renew. Energy*. – 2018. – Vol. 16. – P. 639–646.
- [17] Аблаев, Р.Р. Аккумуляция тепла в системах солнечного теплоснабжения домов индивидуального пользования (обзор) / Р.Р. Аблаев [и др.] // *Вісник СевНТУ: зб. наук. пр. Вип. 153. Серія: Механіка, енергетика, екологія*. – Севастополь, 2014.
- [18] Yoram, L. Compact hot water storage systems combining copper tube with high conductivity graphite and phase change materials / L. Yoram [et al.] // *Energy Procedia*. – 2014. – Vol. 48. – P. 423–430.
- [19] Александров, В.Д. Использование теплоаккумулирующих материалов на основе кристаллогидратов солей натрия в транспортных средствах / В.Д. Александров [и др.] // *Вісник Донецької академії автомобільного транспорту*. – 2015. – № 1. – С. 34–41.
- [20] Venkateswara, V. PCM-mortar based construction materials for energy efficient buildings: A review on research trends / V. Venkateswara [et al.] // *Energy and Buildings*. – 2018. – Vol. 158. – P. 95–122.
- [21] Xiao, Q. Fabrication and characteristics of composite phase change material based on $Ba(OH)_2 \cdot 8H_2O$ for thermal energy storage / Q. Xiao [et al.] // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. – 2018. – Vol. 179. – P. 339–345.
- [22] Kee, S.Y. Review of solar water heaters incorporating solid-liquid organic phase change materials as thermal storage / S.Y. Kee [et al.] // *Applied Thermal Engineering*. – 2018. – Vol. 131. – P. 455–471.
- [23] Mumtaz, M. A review for phase change materials (PCMs) in solar absorption refrigeration systems / M. Mumtaz [et al.] // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2017. – Vol. 76. – P. 105–137.
- [24] Liu, Y.S. Use of nano-alpha- Al_2O_3 to improve binary eutectic hydrated salt as phase change material / Y.S. Liu, Y.Z. Yang // *Sol. Energy Mater. Sol.* – 2017. – Vol. 160. – P. 18–25.
- [25] Быстров, В.П. Теплоаккумуляторы с использованием фазового перехода / В.П. Быстров, А.В. Ливчак // *Вопросы экономии теплоэнергетических ресурсов в системах вентиляции и теплоснабжения: сб. науч. трудов*. – М.: Изд-во ЦНИИЭПИО, 1984. – С. 75–90.
- [26] Bal, L.M. Solar dryer with thermal energy storage systems for drying agricultural food products: a review / L.M. Bal [et al.] // *Renew. Sustain. Energy Rev.* – 2014. – Vol. 14. – P. 2298–2314.
- [27] Risti, A. Engineering and processing of PCMs, TCMs and sorption materials / A. Risti [et al.] // *Energy Procedia*. – 2016. – Vol. 91. – P. 207–217.
- [28] Zhou, D. Thermal characterisation of binary sodium/lithium nitrate salts for latent heat storage at medium temperatures / D. Zhou [et al.] // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. – 2016. – Vol. 157. – P. 1019–1025.
- [29] Morofsky, E. History of thermal energy storage / E. Morofsky // *Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption*. – 2007. – P. 377–391.
- [30] Crespo, A. Latent thermal energy storage for solar process heat applications at medium-high temperatures – A review / A. Crespo [et al.] // *Solar Energy*. – 2018. – DOI: 10.1016/j.solener.2018.06.101
- [31] Putra, N. Preparation of beeswax/multi-walled carbon nanotubes as novel shapestable nanocomposite phase-change material for thermal energy storage / N. Putra [et al.] // *Journal of Energy Storage*. – 2019. – Vol. 21. – P. 32–39.
- [32] Parameshwaran, R. Applications of Thermal Analysis to the Study of Phase-Change Materials / R. Parameshwaran [et al.] // *Chapter 13 Handbook of Thermal Analysis and Calorimetry*. – 2018. – Vol. 6. – P. 519.
- [33] Leong, K.Y. Nano-enhanced phase change materials: A review of thermo-physical properties, applications and challenges / K.Y. Leong [and al.] // *Journal of Energy Storage*. – 2019. – Vol. 21. – P. 18–31.
- [34] Гасаналиев, А.М. Теплоаккумулирующие свойства расплавов / А.М. Гасаналиев, Б.Ю. Гамагаева. // *Успехи химии*. – 2000. – Т. 69. – № 2. – С. 192–200.
- [35] Vitorino, N. Quality criteria for phase change materials selection / N. Vitorino [et al.] // *Energy Conversion and Management*. – 2016. – Vol. 124. – P. 598–606; 10.1016/j.enconman.2016.07.063.
- [36] Lin, Y. Review on thermal performances and applications of thermal energy storage systems with inorganic phase change materials / Y. Lin [et al.] // *Energy*. – 2018. – Vol. 165. – P. 685–708.
- [37] Liu, L. Thermal conductivity enhancement of phase change materials for thermal energy storage: a review / L. Liu [et al.] // *Renewable Sustainable Energy Rev.* – 2016. – Vol. 62. – P. 305–317.
- [38] Conroy, T. Thermohydraulic analysis of single phase heat transfer fluids in CSP solar receivers / T.



Conroy [et al.] // *Renewable Energy*. – 2018. – Vol. 129. – P. 150–167.

[39] Боровская, Л.В. Исследование термодинамических свойств карбоновых кислот методом ДСК / Л.В. Боровская // *Фундаментальные исследования. Химические науки*. – 2013. – № 6. – С. 1120–1123.

[40] Alva, G. Thermal energy storage materials and systems for solar energy applications / G. Alva [et al.] // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2017. – Vol. 68. – P. 693–706.

[41] Мозговой, А.Г. Теплофизические свойства теплоаккумулирующих материалов. Кристаллогидраты: Обзоры по теплофизическим свойствам веществ / А.Г. Мозговой [и др.] // *ТФЦ*. – М.: ИВТАН. – 1990. – Т. 82. – № 2. – С. 3–105.

[42] Wei, G. Selection principles and thermophysical properties of high temperature phase change materials for thermal energy storage: A review / G. Wei [et al.] // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2018. – Vol. 81. – P. 1771–1786.

[43] Ibrahim, N.I. Heat transfer enhancement of phase change materials for thermal energy storage applications: a critical review / N.I. Ibrahim [et al.] // *Renew. Sustain. Energy Rev.* – 2017. – Vol. 74. – P. 26–50.

[44] Qureshi, Z.A. Recent advances on thermal conductivity enhancement of phase change materials for energy storage system: A review / Z.A. Qureshi [et al.] // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2018. – Vol. 127. – P. 838–856.

[45] Vadhera, J. Study of Phase Change materials and its domestic application / J. Vadhera [et al.] // *Materials Today Proceedings*. – 2018. – Vol. 5. – P. 3411–3417.

[46] Lin, Y. Review on thermal conductivity enhancement, thermal properties and applications of phase change materials in thermal energy storage / Y. Lin [et al.] // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2018. – Vol. 82. – P. 2730–2742.

[47] Dannemand, M. Laboratory test of a cylindrical heat storage module with water and sodium acetate trihydrate / M. Dannemand [et al.] // *Energy Procedia*. – 2016. – Vol. 91. – P. 122–127.

[48] Dong, O. A novel eutectic phase-change material: $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + \text{NH}_4\text{Cl} + \text{KCl}$ / O. Dong [et al.] // *Calphad*. – 2018. – Vol. 63. – P. 92–99.

[49] Wang, W.W. Parameter effect of a phase change thermal energy storage unit with one shell and one finned tube on its energy efficiency ratio and heat storage rate / W.W. Wang [et al.] // *Applied Thermal Engineering*. – 2016. – Vol. 93. – P. 50–60.

[50] Chaudhary, F.G.G. Modelling and experimental validation of an algorithm for simulation of hysteresis effects in phase change materials for building components / F.G.G. Chaudhary, S. Fantucci // *Energy & Buildings*. – 2018. – Vol. 174. – P. 54–67.

[51] Koukou, M.K. Experimental and computational investigation of a latent heat energy storage system with a staggered heat exchanger for various phase change materials / M.K. Koukou [et al.] // *Thermal Science and Engineering Progress*. – 2018. – Vol. 7. – P. 87–98.

[52] Bhatt, V.D. Thermal Energy Storage Capacity of some Phase changing Materials and Ionic Liquids / V.D. Bhatt [et al.] // *International Journal of ChemTech Research*. – 2010. – Vol. 2. – No. 3. – P. 1771–1779.

[53] Browne, C. Investigation of the corrosive properties of phase change materials in contact with metals and plastic / C. Browne [et al.] // *Renewable Energy*. – 2017. – Vol. 108. – P. 555–568.

[54] Judith, C.G. High-Temperature Phase Change Materials (PCM) Candidates for Thermal Energy Storage (TES) Applications High-Temperature Phase Change Materials (PCM) Candidates for Thermal Energy Storage (TES) // *Applications*. – 2011; doi:10.2172/1024524.

[55] Liu, M. Determination of thermo-physical properties and stability testing of high-temperature phase-change materials for csp applications technologies / M. Liu [et al.] // *Sol. Energy Mat. Sol. Cells*. – 2015. – Vol. 139. – P. 81–87.

[56] Taylor, R.A. Experimental characterisation of sub-cooling in hydrated salt phase change materials / R.A. Taylor [et al.] // *Applied Thermal Engineering*. – 2016. – Vol. 93. – P. 935–938.

[57] Souayfane, F. Phase change materials (PCM) for cooling applications in buildings: a review / F. Souayfane [et al.] // *Energy Build.* – 2016. – Vol. 129. – P. 396–431.

[58] Zhang, S. Thermodynamics behavior of phase change latent heat materials in micro-/nanoconfined spaces for thermal storage and applications / S. Zhang, Z. Wang // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2018. – Vol. 82. – P. 2319–2331.

[59] Li, T.X. Experimental investigation on copper foam/hydrated salt composite phase change material for thermal energy storage / T.X. Li [et al.] // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2017. – Vol. 115. – P. 148–157.

[60] Wei, G. Selection principles and thermophysical properties of high temperature phase change materials for thermal energy storage: A review / G. Wei [et al.] // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2018. – Vol. 81. – P. 1771–1786.

[61] Khan, Z. A review of performance enhancement of PCM based latent heat storage system within the context of materials, thermal stability and compatibility / Z. Khan [et al.] // *Energy Convers Manag.* – 2016. – Vol. 115. – P. 132–158.

[62] Meng, Z.N. Experimental and numerical investigation of a tube-in-tank latent thermal energy storage unit using composite PCM / Z.N. Meng, P. Zhang // *Appl. Energy*. – 2017. – Vol. 190. – P. 524–539

[63] Giro-Paloma, J. Types, methods, techniques, and applications for microencapsulated phase change materials (MPCM): a review / J. Giro-Paloma [et al.] // *Renew. Sustain. Energy Rev.* – 2016. – Vol. 53. – P. 1059–1075.

[64] Jamekhorshid, A. A review of microencapsulation methods of phase change materials (PCMs) as a thermal energy storage (TES) medium / A. Jamekhorshid



[et al.] // *Renew. Sustain. Energy Rev.* – 2014. – Vol. 31. – P. 531–542.

[65] Hsua, T. Thermal hysteresis in phase-change materials: Encapsulated metal alloy core-shell microparticles / T. Hsua [et al.] // *Nano Energy.* – 2018. – Vol. 51. – P. 563–570.

[66] Trunin, A. S. Computer Modeling of the Eutectic Parameters for the Li,Na,Ca||F and K,Li,Sr||F Three-Component Systems / A. S. Trunin [et al.] // *Russian Journal of Inorganic Chemistry.* – 2006. – Vol. 51. – No. 2. – P. 337–341.

[67] Игнатъева, Е.О. Прогнозирование и экспериментальное подтверждение характеристик эвтектик рядов двухкомпонентных систем $K_2NO_4 - KCl$ (Г – F, Cl, Br, I; Э – Cr, Mo, W) / Е.О. Игнатъева [и др.] // *Вектор науки ТГУ.* – 2011. – Т. 16 – № 2. – С. 31–35.

[68] Моргунова, О.Е. Метод моделирования эвтектических характеристик многокомпонентных сплавов / О.Е. Моргунова [и др.] // *Материаловедение.* – 2014. – Т. 202. – № 1. С. 50–56.

[69] Бабаев, Б.Д. Принципы теплового аккумулирования и используемые теплоаккумулирующие материалы / Б.Д. Бабаев // *Теплофизика высоких температур.* – 2014. – Т. 52. – № 5. – С. 760–776.

[70] Jiang, Y. Eutectic Na_2CO_3-NaCl salt: A new phase change material for high temperature thermal storage / Y. Jiang [et al.]. – 2016. – Vol. 152. – P. 155–60.

[71] Raud, R. A critical review of eutectic salt property prediction for latent heat energy storage systems / R. Raud [et al.] // *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* – 2017. – Vol. 70. – P. 936–944.

[72] Kenisarin, M. Salt hydrates as latent heat storage materials: Thermophysical properties and costs / M. Kenisarin, K. Mahkamov // *Solar Energy Materials Solar Cells.* – 2016. – Vol. 145. – P. 255–286.

[73] Trausel, F. A review on the properties of salt hydrates for thermochemical storage / F. Trausel [et al.] // *Energy Procedia.* – 2014. – Vol. 48. – P. 447–452.

[74] Fopah-Lelea, A. A review on the use of $SrBr_2 \cdot 6H_2O$ as a potential material for low temperature energy storage systems and building applications / A. Fopah-Lelea, J. Tamba // *Solar Energy Materials Solar Cells.* – 2017. – Vol. 164. – P. 175–187.

[75] Kenfack, F. Innovative Phase Change Material (PCM) for heat storage for industrial applications / F. Kenfack, M. Bauer // *Energy Procedia.* – 2014. – Vol. 46. – P. 310 – 316.

[76] Veerakumar, C. Phase change material based cold thermal energy storage: Materials, techniques and applications – A review / C. Veerakumar, A. Sreekumar // *International Journal of Refrigeration.* – 2016. – Vol. 67. – P. 271–289.

[77] Safari, A. A review on supercooling of Phase Change Materials in thermal energy storage systems / A. Safari [et al.] // *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* – 2017. – Vol. 70. – P. 905–91.

[78] Zhou, S. Modification of expanded graphite and its adsorption with hydrated salt to prepare composite

PCMs / S. Zhou [et al.] // *Applied Thermal Engineering.* – 2018. – Vol. 133. – P. 446–451.

[79] Sandnes, B. Supercooling salt hydrates: stored enthalpy as a function of temperature / B. Sandnes, J. Rekstad // *Sol. Energy.* – 2006. – Vol. 80. – No. 5. – P. 616–625.

[80] Karaipekli, A. Thermal characteristics of expanded perlite/paraffin composite phase change material with enhanced thermal conductivity using carbon nanotubes / A. Karaipekli [et al.] // *Energy Convers Manag.* – 2017. – Vol. 134. – P. 373–381.

[81] Tao, Y.B. A review of phase change material and performance enhancement method for latent heat storage system / Y.B. Tao, Ya-Ling He // *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* – 2018. – Vol. 93. – P. 245–259.

[82] Shah, K.W. A review on enhancement of phase change materials – A nanomaterials perspective / K.W. Shah // *Energy & Buildings.* – 2018. – Vol. 175. – P. 57–68.

[83] Ibrahim, N.I. Heat transfer enhancement of phase change materials for thermal energy storage applications: a critical review / N.I. Ibrahim [et al.] // *Renew. Sustain. Energy Rev.* – 2017. – Vol. 74. – P. 26–50.

[84] Castelleo, J.M. Sample Size Computations and Power Analysis with the SAS System / J.M. Castelleo // *Statistics and Data Analysis.* – 2000. – Vol. 25. – P. 8.

References

[1] Lin Y., Jia Y, Raghuram Alva G, Fang G. Review on thermal conductivity enhancement, thermal properties and applications of phase change materials in thermal energy storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018;82:2730–2742.

[2] Le Pierres B.S.N., Stutz B, Kuznik F, Johannes K, Palomo del Barrio E, Bedecarrats J, Gibout S, Marty P, Zalewski L, Soto J, Mazet N, Olives R, Bezin J, Pham Minh D. Storage of thermal solar energy. *C. R. Physique*, 2017;18:401–414.

[3] Barreneche C., Navarro H., Cabeza L., Fernandez A. New database to select phase change materials: Chemical nature, properties, and applications. *Journal of Energy Storage*, 2015;3:18–24.

[4] Pielichowska K., Pielichowski K. Phase change materials for thermal energy. *Progress Mater. Sci.* 2014;65:67–123.

[5] Li T.X., Wu F., Wang R.Z. Experimental investigation on copper foam/hydrated salt composite phase change material for thermal energy storage. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017;115:148–157.

[6] Belimenko S.S., Ishenko V. Development of criteria of efficiency of charge and discharge of the solid heat storage (Razrabotka kriteriev effektivnosti zaryada i razryada tverdotel'nogo teplovogo akkumulyatora). *Nauka ta progres transportu. Visnik Dnipropetrovs'kogo natsional'nogo universitetu zaliznichnogo transportu*, 2014;53(5):7–17 (in Russ).



- [7] Hammou Z.A., Lacroix M. A new PCM storage system for managing simultaneously solar and electric energy. *Energy Build*, 2006;38:258–65.
- [8] Gamataeva G.Yu., Gamataev T., Omarova M., Shangerava M., Gasanaliev A., Maglaev D. Technical and operational properties of heating storage materials (Tekhniko-ekspluatatsionnye svoistva teploakkumuliruyushchih materialov). *Materialy X vserossiiskoi nauchnoi konferentsii. Izdatel'stvo: Severo-Osetinskii gosudarstvennyi universitet im. K.L. Khetagurova (Vladikavkaz)*, 2016; pp. 187–190 (in Russ).
- [9] Nkwetta D.N., Hanhighat F. Thermal energy storage with phase change material—A state-of-the art review. *Sustainable Cities and Society*, 2014;10:87–100.
- [10] Sögütöglü L.C., Donkers P., Fischer H., Huinik H., Adan O. In-depth investigation of thermochemical performance in a heat battery: Cyclic analysis of K_2CO_3 , $MgCl_2$ and Na_2S . *Applied Energy*. 2018;215:159–173.
- [11] Jaguemont J., Omar N., Van de Bossche P., Van Mierlo J. Phase-change materials (PCM) for automotive applications: A review. *Applied Thermal Engineering*, 2018;132:308–320.
- [12] Du K., Calautit J., Wang Z., Wu Y., Liu H. A review of the applications of phase change materials in cooling, heating and power generation in different temperature range. *Applied Energy*, 2018;220:242–273.
- [13] Nazir H., Batool M., Bolivar Osorio F., Isaza-Ruiz M., Xu X., Vignarooban K., Phelan P., Inamuddin, Mada Kannan A. Recent developments in phase change materials for energy storage applications: A review. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019;129:491–523.
- [14] Bouhal T., Saif ed-Din F., Agrouaz Y., El Rhafiki T., Kouskou T., Jamil A. Numerical modeling and optimization of thermal stratification in solar hot water storage tanks for domestic applications: CFD study. *Solar Energy*, 2017;157:441–455.
- [15] Huang H., Wang Z., Zhang H., Duo B., Huang X., Liang H.A., Goula M. An experimental investigation on thermal stratification characteristics with PCMs in solar water tank. *Solar Energy*, 2019;177:8–21.
- [16] Burak K., Okten K. Effect of rectangular hot water tank position and aspect ratio on thermal stratification enhancement. *Renew. Energy*, 2018;16:639–646.
- [17] Ablav R.R., Makarov B.B., Ablav A.R. Heating storage in solar heat supply systems of single houses (review) (Akkumulirovanie tepla v sistemakh solnechnogo teplosnabzheniya domov individual'nogo pol'zovaniya (obzor)). *Visnik SevNTU: zb. nauk. pr. Vip. 153. Seriya: Mekhanika, energetika, ekologiya. Sevastopol'*, 2014 (in Russ).
- [18] Yoram L., Shabtay Y., Black J. Compact hot water storage systems combining copper tube with high conductivity graphite and phase change materials. *Energy Procedia*, 2014;48:423–430.
- [19] Aleksandrov V.D., Sobol O.V., Sobolev A.Y., Marchenkova Y.A. Use of heating storage materials based on sodium salt crystalline hydrates in vehicles (Ispol'zovanie teploakkumuliruyushchikh materialov na osnove kristallogidratov solei natriya v transportnykh sredstvakh). *Visnik Donets'koi akademii avtomobil'nogo transportu*, 2015;1:34–41 (in Russ).
- [20] Venkateswara V., Parameshwaran R., Ram V. PCM-mortar based construction materials for energy efficient buildings: A review on research trends. *Energy and Buildings*, 2018;158:95–122.
- [21] Xiao Q., Yuan W, Li L, Xu T. Fabrication and characteristics of composite phase change material based on $Ba(OH)_2 \cdot 8H_2O$ for thermal energy storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2018;179:339–345.
- [22] Kee S.Y., Munusamy Y., Seng Ong K. Review of solar water heaters incorporating solid-liquid organic phase change materials as thermal storage. *Applied Thermal Engineering*, 2018;131:455–471.
- [23] Mumtaz M., Rahman S., Al-Sulaiman F. A review for phase change materials (PCMs) in solar absorption refrigeration systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017;76:105–137.
- [24] Liu Y.S., Yang Y. Use of nano-alpha- Al_2O_3 to improve binary eutectic hydrated salt as phase change material. *Solar Energy Mater. Sol.*, 2017;160:18–25.
- [25] Bystrov V.P., Livchak A.V. Heating storage using phase change (Teploakkumulirovaniye fazovogo perekhoda). *Voprosy ekonomii teploenergeticheskikh resursov v sistemakh ventilyatsii i teplosnabzheniya: sb. nauch. trudov. Moscow: Izd-vo TsNIIPIPO*, 1984; pp. 75–90 (in Russ).
- [26] Bal L.M., Satya S., Narayan Naik S. Solar dryer with thermal energy storage systems for drying agricultural food products: a review. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2014;14:2298–2314.
- [27] Risti A., Furbo S., Schranzhofer H., Lazaro A., Kemik, Delgrado M., Zalewski L., Diarce G., Alkan C., Gunasekara S.N., et al. Engineering and processing of PCMs, TCms and sorption material. *Energy Procedia*, 2016;91:207–217.
- [28] Zhou D., Eames P. Thermal characterisation of binary sodium/lithium nitrate salts for latent heat storage at medium temperatures. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2016;157:1019–1025.
- [29] Morofsky E. History of thermal energy storage. *Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption*, 2007;377–391.
- [30] Crespo A., Barreneche C., Ibara M., J. Platzer W. Latent thermal energy storage for solar process heat applications at medium-high temperatures – A review. *Solar Energy*, 2018; DOI: 10.1016/j.solener.2018.06.101
- [31] Putra N., Rawi S., Amin M., Kusriani E., Kosasih E., Indra Mahlia T. Preparation of beeswax/multi-walled carbon nanotubes as novel shapestable nanocomposite phase-change material for thermal energy storage. *Journal of Energy Storage*, 2019;21:32–39.
- [32] Parameshwaran R., Sari A., Nandanavanam J., Karunakaran R. Applications of Thermal Analysis to the Study of Phase-Change Materials. *Chapter 13 Handbook of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2018;6:519.
- [33] Leong K.Y., Mohd Rosdzimin A., Gurunathan B. Nano-enhanced phase change materials: A review of

thermo-physical properties, applications and challenges. *Journal of Energy Storage*, 2019;21:18–31.

[34] Gasanaliev A.M., Gamataeva B.Y. Heating storage properties of melts (Teploakkumuliruyushchie svoystva rasplavov). *Uspekhi khimii*, 2000;69(2):192–200 (in Russ).

[35] Vitorino N., Abrantes J., Frade J. Quality criteria for phase change materials selection. *Energy Conversion and Management*, 2016;124:598–606; 10.1016/j.enconman.2016.07.063.

[36] Lin Y., Raghuram Alva G., Fang G. Review on thermal performances and applications of thermal energy storage systems with inorganic phase change materials. *Energy*, 2018;165:685–708.

[37] Liu L., Su D., Tang Y., Fang G. Thermal conductivity enhancement of phase change materials for thermal energy storage: a review. *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 2016;62:305–317.

[38] Conroy T., Collins M., Fisher J., Grimes R. Thermohydraulic analysis of single phase heat transfer fluids in CSP solar receivers. *Renewable Energy*, 2018;129:150–167.

[39] Borovskaya L.V. Investigation of thermodynamic properties of carboxylic acids by DSC method (Issledovanie termodinamicheskikh svoystv karbonovykh kislot metodom DSC). *Fundamental'nye issledovaniya. Khimicheskie nauki*, 2013;6:1120–1123 (in Russ).

[40] Alva G., Liu L., Huang X., Fang G. Thermal energy storage materials and systems for solar energy applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017;68:693–706.

[41] Mozgovoi A.G., Schpilrain E.E., Dibirov M.A., Bochkov M.M., Levina L.N., Kenisarin M.M. Thermo-physical properties of heating storage materials. Crystalline hydrates: reviews of thermophysical properties of substances (Teplofizicheskie svoystva teploakkumuliruyushchikh materialov. Kristallogidraty: Obzory po teplofizicheskim svoystvam veshchestv). *TFTs. Moscow: IVTAN*. 1990;82(2):3–105 (in Russ).

[42] Wei G., Wang G., Xu C., Ju X., Xing L., Du X., Yang Y. Selection principles and thermophysical properties of high temperature phase change materials for thermal energy storage: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018;81:1771–1786.

[43] Ibrahim N.I., Al-Sulaiman F., Rahman S., Sami Yilbas B., Sahin A. Heat transfer enhancement of phase change materials for thermal energy storage applications: a critical review. *Renew Sustain Energy Rev.*, 2017;74:26–50.

[44] Qureshi Z.A., Ali H., Khushnood S. Recent advances on thermal conductivity enhancement of phase change materials for energy storage system: A review. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018;127:838–856.

[45] Vadhera J., Sura A., Nandan G., Dwivedi G. Study of Phase Change materials and its domestic application. *Materials Today Proceedings*, 2018;5:3411–3417.

[46] Lin Y., Jia Y., Raghuram Alva G., Fang G. Review on thermal conductivity enhancement, thermal

properties and applications of phase change materials in thermal energy storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018;82:2730–2742.

[47] Dannemand M. Laboratory test of a cylindrical heat storage module with water and sodium acetate trihydrate. *Energy Procedia*, 2016;91:122–127.

[48] Dong O., Kong W., Brinko Berg J., Furbo S. A novel eutectic phase-change material: $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + \text{NH}_4\text{Cl} + \text{KCl}$. *Calphad*, 2018;63:92–99.

[49] Wang W.W., Wang L., He Y. Parameter effect of a phase change thermal energy storage unit with one shell and one finned tube on its energy efficiency ratio and heat storage rate. *Applied Thermal Engineering*, 2016;93:50–60.

[50] Chaudhary F.G.G., Goia F., Fantucci S. Modeling and experimental validation of an algorithm for simulation of hysteresis effects in phase change materials for building components. *Energy & Building*, 2018;174:54–67.

[51] Koukou M.K.M., Michail V., Tachos N., Dogkas G., Lymperis K., Stathopoulos V. Experimental and computational investigation of a latent heat energy storage system with a staggered heat exchanger for various phase change materials. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2018;7:87–98.

[52] 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;2(3):1771–1779.

[53] Browne C., Boyd E., McCormack S. Investigation of the corrosive properties of phase change materials in contact with metals and plastic. *Renewable Energy*, 2017;108:555–568.

[54] Judith C.G. High-Temperature Phase Change Materials (PCM) Candidates for Thermal Energy Storage (TES) Applications High-Temperature Phase Change Materials (PCM). *Applications*, 2011; doi:10.2172/1024524

[55] Liu M., Gomez J., Turhi C., Tay N., Saman W., Bruno F. Determination of thermo-physical properties and stability testing of high-temperature phase-change materials for csp applications technologies. *Solar Energy Mat. Sol. Cells*, 2015;139:81–87.

[56] Taylor R.A., Tsafnat N., Washer A. Experimental characterisation of sub-cooling in hydrated salt phase change materials. *Applied Thermal Engineering*, 2016;93:935–938.

[57] Souayfane F., Fardoun F., Biwole P. Phase change materials (PCM) for cooling applications in buildings: a review. *Energy Build*, 2016;129:396–431.

[58] Zhang S., Wang Z. Thermodynamics behavior of phase change latent heat materials in micro-/nanoconfined spaces for thermal storage and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018;82:2319–2331.

[59] Li T.X., Wu D., Wang R. Experimental investigation on copper foam/hydrated salt composite phase change material for thermal energy storage. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017;115:148–157.



- [60] Wei G., Wang G., Xu C., Ju X., Xing L., Du X., Yang Y. Selection principles and thermophysical properties of high temperature phase change materials for thermal energy storage: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018;81:1771–1786.
- [61] Khan Z., A Khan Z., Ghafoor A. A review of performance enhancement of PCM based latent heat storage system within the context of materials, thermal stability and compatibility. *Energy Convers Manag.*, 2016;115:132–158.
- [62] Meng Z.N., Zhang P. Experimental and numerical investigation of a tube-in-tank latent thermal energy storage unit using composite PCM. *Appl. Energy*, 2017;190:524–539.
- [63] Giro-Paloma J., Martinez M., Gabeza L., Fernandez A. Types, methods, techniques, and applications for microencapsulated phase change materials (MPCM): a review. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2016;53:1059–1075.
- [64] Jamekhorshid A., Sadrameli S., Farid M. A review of microencapsulation methods of phase change materials (PCMs) as a thermal energy storage (TES) medium / A. Jamekhorshid [et al.]. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2014;31:531–542.
- [65] Hsua T., Chung C., Chung F., Chang C., Lu M., Chueh Y. Thermal hysteresis in phase-change materials: Encapsulated metal alloy core-shell microparticles. *Nano Energy*, 2018;51:563–570.
- [66] Trunin A.S., Morguniva O.E., Klimova M.V., Budkin A.V. Computer Modeling of the Eutectic Parameters for the Li,Na,Ca||F and K,Li,Sr||F Three-Component Systems. *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, 2006;51(2):337–341.
- [67] Ignat'eva E.O., Dvoryanova E.M., Garkushin I.K., Kondratuk I.M. Prediction and experimental confirmation of characteristics of eutectic series of double component systems $K_2NO_4 - KG$ (G – F, Cl, Br, I; E – Cr, Mo, W) (Prognozirovanie i eksperimental'noe podtverzhdenie kharakteristik evtektik ryadov dvukhkomponentnykh sistem $K_2NO_4 - KG$ (G – F, Cl, Br, I; E – Cr, Mo, W)). *Vektor nauki TGU*, 2011;16(2):31–35 (in Russ).
- [68] Morgunova O.E. A method of modeling the characteristics of eutectic alloys (Metod modelirovaniya evtekticheskikh kharakteristik mnogokomponentnykh splavov). *Materialovedenie*, 2014;202(1):50–56 (in Russ).
- [69] Babaev B.D. Principles of thermal storage and heating storage used (Printsipy teplovogo akumulirovaniya i ispol'zuemye teploakkumuliruyushchie materialy). *Teplofizika vysokikh temperatur*, 2014;52(5):760–776 (in Russ).
- [70] Jiang Y., Sun Y., Bruno F., Li S. Eutectic Na_2CO_3-NaCl salt: A new phase change material for high temperature thermal storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2016;152:155–60.
- [71] Raud R., Jacob R., Bruno F., Will G., Steinberg T. A critical review of eutectic salt property prediction for latent heat energy storage systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017;70:936–944.
- [72] Kenisarin M., Mahkmov K. Salt hydrates as latent heat storage materials: Thermophysical properties and costs. *Solar Energy Materials Solar Cells*, 2016;145:255–286.
- [73] Trausel F., Jong A., Cuypers R. A review on the properties of salt hydrates for thermochemical storage. *Energy Procedia*, 2014;48:447–452.
- [74] Fopah-Lelea A., Gaston Tamba J. A review on the use of $SrBr_2 \cdot 6H_2O$ as a potential material for low temperature energy storage systems and building applications. *Solar Energy Materials Solar Cells*, 2017;164:175–187.
- [75] Kenfack F., Bauer M. Innovative Phase Change Material (PCM) for heat storage for industrial applications. *Energy Procedia*, 2014;46:310 – 316.
- [76] 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.
- [77] Safari A., Rahman S., Sulaiman F., Xu Y., Dong J. A review on supercooling of Phase Change Materials in thermal energy storage systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017;70:905–91.
- [78] Zhou S., Zhou Y., Ling Z., Zhang Z., Fang X. Modification of expanded graphite and its adsorption for hydrated salt to prepare composite PCMs. *Applied Thermal Engineering*, 2018;133:446–451.
- [79] Sandnes B., Rekstad J. Supercooling salt hydrates: stored enthalpy as a function of temperature. *Solar Energy*, 2006;80(5):616–625.
- [80] Karaipekli A., Bicer A., Sari A., Tyagi V. Thermal characteristics of expanded perlite/paraffin composite phase change material with enhanced thermal conductivity using carbon nanotubes, *Energy Convers Manag.*, 2017;134:373–381.
- [81] Tao Y.B., He Y. A review of phase change material and performance enhancement method for latent heat storage system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018;93:245–259.
- [82] Shah K.W. A review on enhancement of phase change materials – A nanomaterials perspective. *Energy & Buildings*, 2018;175:57–68.
- [83] Ibrahim N.I., Al-Sulaiman F., Rahman S., Yilbas B., Sahin A. Heat transfer enhancement of phase change materials for thermal energy storage applications: a critical review. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2017;74:26–50.
- [84] Castlloe J.M. Sample Size Computations and Power Analysis with the SAS System. *Statistics and Data Analysis*, 2000;25:8.

Транслитерация по BSI

