
**ТЕПЛО- И МАССООБМЕН,
СВОЙСТВА РАБОЧИХ ТЕЛ И МАТЕРИАЛОВ**

**ФАЗОИЗМЕНЯЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В КАЧЕСТВЕ
АККУМУЛЯТОРОВ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ В ЗДАНИЯХ
И СООРУЖЕНИЯХ (ОБЗОР)****© 2024 г. Md Ahsan Habib^{a, *}, Muhammad Mustafizur Rahman^{a, **}**^a*Wichita State University, Wichita, Kansas, 67260 USA*^{*}*e-mail: mxhabib1@shockers.wichita.edu*^{**}*e-mail: muhammad.rahman@us.af.mil*

Поступила в редакцию 26.06.2022 г.

После доработки 03.03.2023 г.

Принята к публикации 29.03.2023 г.

Фазоизменяемый материал (ФИМ) — это уникальное вещество (или материал), выделяющее или накапливающее энергию при фазовом переходе. Обычно во время этого процесса вещество, пребывая в одном из двух фундаментальных состояний — твердом или жидком — переходит в другое. Фазоизменяемые материалы, применяемые в качестве аккумуляторов тепловой энергии, идеально подходят для создания и поддержания комфортного теплового режима в зданиях при одновременном сокращении потребления энергии на отопление и кондиционирование. Скрытая теплота фазового перехода обеспечивает высокую плотность энергии, аккумулируемой в ФИМ. Эти материалы используются главным образом для поддержания комфортных условий в помещениях, контроля температуры строительных материалов, в солнечных водонагревательных установках, а также для утилизации сбросного тепла на объектах с большими тепловыми потерями. Показано, что ФИМ, применяемые для аккумулирования тепловой энергии (АТЭ), позволяют сгладить пики энергопотребления и повысить энергоэффективность систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха. Главные преимущества системы АТЭ на основе ФИМ при эксплуатации электросети — перераспределение и уменьшение нагрузки путем подзарядки системы аккумулирования во время неполной нагрузки сети и замещение системы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха при пиковой нагрузке. В исследовании рассматривается эксплуатация системы АТЭ на основе ФИМ, размещенная в зданиях, причем особое внимание уделяется анализу ограничений, связанных с их применением. Разработаны рекомендации по дальнейшему совершенствованию таких систем.

Ключевые слова: аккумулирование тепловой энергии, фазоизменяемые материалы, комфортный тепловой режим в зданиях, отопление, кондиционирование, парафины, гидраты солей, энергоэффективность, совершенствование конструкции систем АТЭ

DOI: 10.56304/S0040363624700115

В связи с увеличением численности населения на планете [1, 2] возрастают потребности в энергии. Исследователи ведут поиск “экологически чистого” решения проблемы энергоснабжения, обусловленной непрерывным повышением энергопотребления и объемов выбросов парниковых газов, представляющих опасность для окружающей среды [1, 3]. Фазоизменяемые материалы для АТЭ обладают одним существенным преимуществом — могут хранить энергию, используя для этого физическое тепло и скрытую теплоту фазового перехода. Такая особенность ФИМ сделала их необходимым элементом систем управления энергопотреблением. Применение аккумуляторов тепловой энергии на основе этих материалов — сложный, но рациональный способ повышения эффективности хранения и потребления энергии в области жилищно-коммунального хо-

зяйства и промышленности [4–9]. При использовании систем аккумулирования тепловой энергии на основе ФИМ можно уменьшить невязку энергетического баланса (несоответствие между спросом на энергию и ее предложением), повысить надежность распределительных электросетей, улучшить их эксплуатационные характеристики, что в итоге будет способствовать энергосбережению [5, 10, 11].

Так как фазоизменяемый материал обладает высокой энтальпией плавления (теплотой плавления), он может аккумулировать значительное количество энергии в виде скрытой теплоты фазового перехода при относительно небольшом объеме материала, участвующего в плавлении и затвердевании при практически постоянной температуре. Этот материал также характеризуется высокой теплопроводностью, обеспечивающей



Рис. 1. Классификация систем АТЭ

эффективную теплопередачу, и конгруэнтностью в процессе фазового перехода (одинаковым составом в твердой и жидкой фазах), исключающей необратимое разделение компонентов [4, 12]. В недавно опубликованной работе [13] были исследованы два промышленно выпускаемых экологически чистых ФИМ (BioPCM и DuPont Energain), применяемых в конструкции наружных стен и крыши, с разными диапазонами изменения температуры плавления. Установлено, что эти материалы могут аккумулировать тепловую энергию солнечного излучения, а затем отдавать ее, снижая таким образом потребление энергии для отопления и охлаждения [13].

МЕТОДЫ АККУМУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

Фазоизменяемые материалы могут хранить выработанную тепловую энергию, высвобождая ее в виде тепла при изменении направления процесса. Классификация систем аккумулирования такой энергии представлена на рис. 1.

Аккумуляирование тепловой энергии благодаря теплоемкости материалов

Аккумуляирование тепловой энергии осуществляется посредством поглощения тепла при увеличении температуры твердого материала или жидкости. Количество тепла Q , запасенного рабочим телом, зависит от удельной теплоемкости, а также от изменения температуры и массы рабочего тела [4, 6]:

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} mc_p dT = mc_{\text{pay}} (T_f - T_i), \quad (1)$$

где m — масса материала, аккумулирующего тепло, кг; c_p — удельная теплоемкость, Дж/(кг · К); T_i , T_f — начальная и конечная температура материала, К; c_{pay} — средняя удельная теплоемкость в диапазоне от T_i до T_f , Дж/(кг · К).

Данный метод аккумуляирования тепла имеет два преимущества: низкую стоимость и возможность реализации с помощью нетоксичных материалов. Наиболее существенным недостатком применения такого метода в строительстве является расходование большого объема рабочего материала, который зависит от того, активно или пассивно сохраняется тепло [14].

Аккумуляирование тепловой энергии благодаря скрытой теплоте

Оптимальный метод накопления тепловой энергии заключается в использовании скрытой теплоты фазового перехода. Общую аккумулирующую способность системы, затрачивающей для этого скрытую теплоту фазового перехода, можно рассчитать по следующей формуле [4, 6]:

$$Q = \int_{T_i}^{T_m} mc_p dT + ma_m \Delta H_m + \int_{T_m}^{T_f} mc_p dT, \quad (2)$$

где a_m — доля расплавленного материала; ΔH_m — удельная теплота плавления, Дж/кг [4, 10].

По сравнению с системами аккумуляирования, использующими теплоемкость материала, в системах, основанных на скрытой теплоте фазового перехода, плотность аккумулируемой энергии более высокая и более узкий диапазон рабочих температур [4, 8, 15]. Для накопления энергии мо-

Таблица 1. Характеристики материалов с фазовым переходом в твердой фазе и твердое тело—жидкость [17]

Критерий	Фазовый переход	
	в твердой фазе	твердое тело—жидкость
Способ сохранения тепла	Изменение кристаллической структуры	Изменение фазового состояния
Изменение объема	Незначительное	Небольшое
Капсулирование	Не требуется	Требуется
Плотность аккумулированной энергии	Низкая (относительно материалов с фазовым переходом твердое тело—жидкость)	Высокая (относительно материалов с фазовым переходом твердое тело—твердое тело)
Требования к герметизации системы	Менее жесткие	Более жесткие
Универсальность	Высокая	Умеренная
Промышленное производство	Нет	Да
Стоимость	Высокая	Относительно низкая

гут применяться фазовые переходы в твердой фазе, твердое тело — жидкость, твердое тело — газ и жидкость — газ. Фазовые переходы в твердой фазе часто занимают много времени, что делает их малопригодными для аккумулирования энергии. Фазовый переход жидкость — газ также плохо подходит для аккумулирования, хотя он имеет большую теплоту фазового перехода, чем фазовый переход твердое тело — жидкость. Для хранения теплоаккумулирующих материалов в газовой фазе требуются большие объемы или высокие давления, что делает соответствующую систему сложной и неудобной. В результате единственным вариантом фазового перехода для аккумулирования тепла остается фазовый переход твердое тело — жидкость [16].

Характеристики материалов с фазовым переходом твердое тело — твердое тело и твердое тело — жидкость приведены в табл. 1.

Термохимическое аккумулирование энергии

Материалы, используемые для термохимического аккумулирования энергии, поглощают и выделяют тепло вследствие обратимых эндотермических и экзотермических реакций. При зарядке тепло подводится к материалу А, разделяя его на две части — В и С, которые затем довольно просто хранить по отдельности до тех пор, пока не потребуется разрядка аккумулятора для получения энергии. При соединении частей В и С при регулируемом давлении происходит выделение энергии и повышение их температуры. Несмотря на то что это самая энергоэффективная технология из существующих, она все еще находится в стадии исследований и пока не применяется в строительстве [18, 19]. Для ее внедрения необходимо решить проблемы, связанные с ограниченным объемом материалов, используемых для ак-

кумулирования тепла, их защитой от коррозии и интенсификацией тепломассообмена [18, 20].

**ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ
РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ НАКОПЛЕНИЯ
ЭНЕРГИИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЗДАНИЯМ**

Благодаря преимуществу прямого использования тепловой энергии для кондиционирования помещений, АТЭ является рациональным решением задачи хранения тепловой энергии на объекте. В настоящее время промышленностью выпускается большое количество апробированных химических аккумуляторов и других систем, которые могут применяться для термохимического аккумулирования энергии.

Технология АТЭ относится к проверенным. Она выбирается в зависимости от объема резервуара. Система аккумулирования с холодной водой при наличии свободного места для ее размещения предпочтительнее остальных систем ввиду высокой эффективности охладителя. Из-за большей разности температур или более низкой температуры охлажденной воды эффективность охладителя, вероятно, будет ниже, если придется задействовать хранилище льда ввиду недостатка свободного места.

Одна из современных технологий АТЭ — применение ФИМ в качестве строительных материалов. Преимущество этого метода состоит в том, что для его реализации не требуется резервуар для материалов и, следовательно, дополнительное свободное место для его установки. Аккумуляторы тепловой энергии на основе ФИМ можно использовать для уменьшения энергопотребления как во время отопительного сезона, так и для кондиционирования в теплое время года.

В большинстве случаев аккумуляторные батареи применяют в зданиях для выполнения ответ-

ственных задач или в источниках бесперебойного питания центров обработки данных. Такие источники питания запускают только при прекращении сетевого электроснабжения. Аккумуляторные батареи обычно не задействованы в схемах сглаживания графика нагрузки, так как для этого потребовалась бы разработка дорогостоящих проектов по техническому заданию заказчика.

В коммерческих и торговых зданиях системы аккумуляторных батарей используют главным образом в качестве источников бесперебойного питания специального назначения и очень редко в других целях. Несмотря на отсутствие ограничений по применению аккумуляторных батарей для интеграции технологий возобновляемых источников энергии периодического действия и/или выравнивания графика нагрузки в здании, стоимость этих батарей довольно высока, что делает их размещение нерентабельным.

СВОЙСТВА ФАЗОИЗМЕНЯЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ

Теплофизические, кинетические и химические свойства идеального теплоаккумулирующего ФИМ должны отвечать нескольким требованиям [4, 10, 16, 21].

Термические свойства:

температура плавления соответствует определенному рабочему диапазону температур;

высокая удельная (на единицу объема) скрытая теплота фазового перехода;

большая удельная теплоемкость, существенно увеличивающая емкость аккумулирования (хранения) явного тепла;

высокая теплопроводность обеих фаз (твердой и жидкой).

Физические свойства:

небольшое изменение объема при фазовом переходе;

низкое давление паров при рабочей температуре;

приемлемые условия фазового равновесия;

конгруэнтное плавление материала с изменяемым фазовым состоянием;

высокая плотность.

Кинетические свойства:

отсутствие переохлаждения;

приемлемая скорость кристаллизации;

высокая скорость образования центров кристаллизации.

Химические свойства:

полностью обратимый цикл затвердевания и плавления;

длительная химическая стабильность;

совместимость ФИМ со строительными материалами;

неагрессивность к строительным материалам (эти материалы не должны быть подвержены коррозии);

не должен быть взрывоопасным, горючим, токсичным.

КЛАССИФИКАЦИЯ ФАЗОИЗМЕНЯЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ

Фазоизменяемые материалы классифицируют по их способности поглощать и выделять энергию (тепло) при физических превращениях (рис. 2).

Органические ФИМ

Органические ФИМ делятся на две основные группы: парафины и непарафиновые материалы.

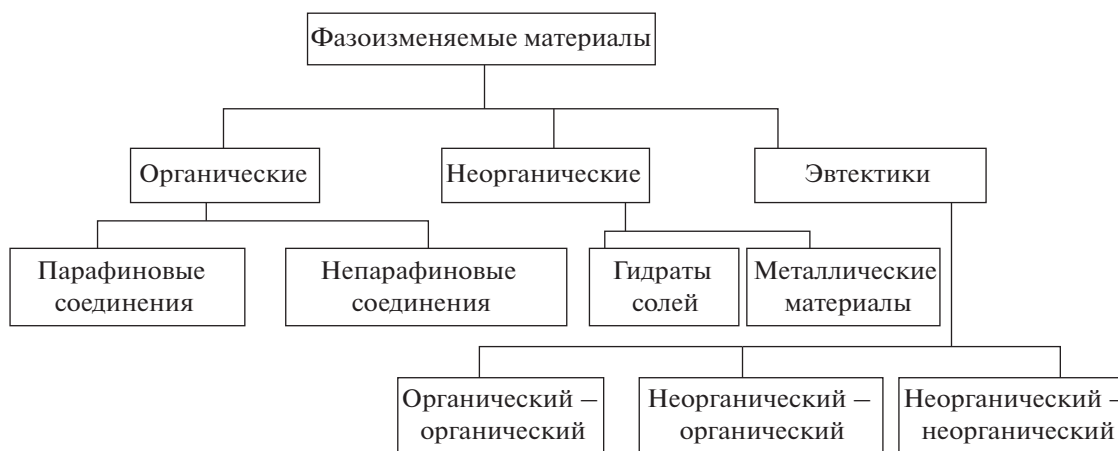


Рис. 2. Классификация фазоизменяемых материалов

Таблица 2. Температура плавления и скрытая теплота плавления парафиновых фазоизменяемых материалов

Материал	Температура плавления, °C	Скрытая теплота плавления, кДж/кг
<i>n</i> -Тетрадекан [4, 22, 23]	5.8–6.0	227–229
<i>n</i> -Пентадекан [4, 22, 23]	9.9–10.0	206
<i>n</i> -Гексадекан [4, 22–25]	18.0–20.0	216–236
<i>n</i> -Гептадекан [5, 22, 24, 25]	22.0–22.6	164–214
<i>n</i> -Октадекан [4, 22, 24, 25]	28.0–28.4	200–244
<i>n</i> -Нонадекан [4, 24]	32.0	222
<i>n</i> -Эйкозан [4, 24]	36.58	247
<i>n</i> -Генеэйкозан [4, 24]	40.18	213

Парафины. Большинство твердых парафинов образовано нормальными неразветвленными *n*-алкенами $\text{CH}_3-(\text{CH}_2)-\text{CH}_3$. Значительное количество скрытой теплоты выделяется при кристаллизации (CH_2) -цепочки, причем скрытая теплота и температура плавления возрастают при увеличении длины цепочки. Только марки технических парафинов, ввиду их низкой стоимости, пригодны к использованию в качестве ФИМ для аккумулирования тепловой энергии посредством скрытой теплоты фазовых переходов. Парафин – неагрессивное вещество с известными свойствами, его можно безопасно применять в широком диапазоне температур (5–80°C) [10, 15]. В табл. 2 перечислены органические парафинсодержащие ФИМ, которые подходят для АТЭ.

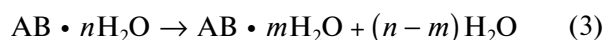
Непарафиновые материалы. Установлено, что к органическим ФИМ, которые не содержат парафинов и способны аккумулировать тепловую энергию в процессе фазового перехода, относятся разнообразные эфиры, спирты, жирные кислоты и гликоли [26, 27]. Основные характеристики таких теплоаккумулирующих органических ФИМ следующие: воспламеняемость, очень высокая теплота плавления, низкая температура вспышки, относительно низкая теплопроводность и нестабильность при высоких температурах. В табл. 3 приведены жирные кислоты, способные изменять фазовое состояние, которые можно использовать для аккумулирования тепловой энергии.

Неорганические ФИМ

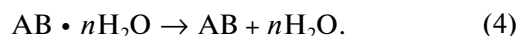
При высоких температурах обычно применяются теплоаккумулирующие неорганические ФИМ, которые подразделяются на два основных типа: гидраты солей и металлические материалы.

Гидраты солей. Получение конгруэнтных, неконгруэнтных и полуконгруэнтных гидратов солей зависит от способа их плавления [10, 26]. Они состоят из *n* киломолей воды и неорганических солей (AB) и имеют общую формулу $\text{AB} \cdot n\text{H}_2\text{O}$. Гидрати-

рование и дегидратирование соли происходит в результате фазового перехода твердое тело – жидкость для *n* киломолей H_2O . При плавлении гидрата соли образуется гидрат соли с меньшим или большим количеством молей воды



либо соль в безводной форме



При температуре плавления кристаллы гидрата превращаются в безводную соль и воду или гидрат более низкого порядка и воду. Так как вода, появляющаяся при кристаллизации, не способна полностью растворить твердую фазу гидрата соли, часто происходит неконгруэнтное плавление. Из-за разности плотностей гидрат более низкого порядка оседает в нижней части контейнера.

Гидраты солей всесторонне рассматривались в задачах аккумулирования тепловой энергии из-за их положительных характеристик, в частности относительно большой теплопроводности (почти в 2 раза выше, чем у парафина), высокой скрытой теплоты плавления на единицу объема, минимальной коррозионной активности и совместимости с полимерами. Переохлаждение и неконгруэнтное плавление – два недостатка, которые могут быть устранены различными способами (механическим перемешиванием, добавлением загустителей, капсулированием ФИМ для уменьшения разделения и т.д.).

Многочисленные исследования показали, что гидраты солей пригодны для АТЭ [26, 34]. Под воздействием тепла они распадаются на безводные соли, выделяют водяной пар и вырабатывают энергию для дегидратации при нагревании. Были проведены расчеты для оценки эффективности трех разных гидратов солей при аккумулировании термохимической энергии, а именно: сульфата магния ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), сульфата меди ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) и гипса ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Уста-

Таблица 3. Температура плавления и скрытая теплота плавления теплоаккумулирующих жирных кислот

Кислота	Температура плавления, °С	Скрытая теплота плавления, кДж/кг
Каприловая [4, 28]	16.3	148
Лауриновая [4, 29]	41–44	183–212
Миристиновая [4, 28, 29]	51.5–53.6	190–204.5
Пальмитиновая [4, 30–33]	61–63	203.4–212
Стеариновая [4, 30–32]	70.0	222
Арахидиновая [4, 28]	74.0	227
Ундециленовая [4, 25]	24.6	141

Таблица 4. Температура плавления и скрытая теплота плавления теплоаккумулирующих гидратов солей с изменением фазового состояния

Материал	Температура плавления, °С	Скрытая теплота плавления, кДж/кг
$\text{LiClO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ [4, 34]	8	253
$\text{KF} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ [4, 24, 26]	18.5–19.0	231
$\text{Mn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ [4, 22]	25.3	125.9
$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ [4, 24, 26]	28.0–30.0	190–200
$\text{LiNO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ [4, 22]	30	256
$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ [4, 22]	34	256
$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ [4, 34]	33	247
$\text{NaCH}_3\text{COO} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ [4, 35]	55.6–56.5	237–243
$\text{CaBr}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ [4, 24]	34	115.5
$\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ [4, 24]	35–45	279.6
$\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ [4, 7]	36	146.9
$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ [4, 24]	48–55	201
$\text{Na}(\text{CH}_3\text{COO}) \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ [4, 36]	58	226
$\text{Na}_2\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ [4, 36]	70	184
$\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ [4, 7, 34]	78	266
$(\text{NH}_4)\text{Al}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ [4, 36]	95	269
$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ [4, 7, 36]	117	169
$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ [4, 34]	89.3	150

новлено, что химическая реакция начинается быстрее всего и протекает наиболее эффективно с сульфатом меди, для нагревания которого требуется наименьшее количество тепла [26]. В табл. 4 приведены характеристики некоторых теплоаккумулирующих неорганических гидратов с изменением фазового состояния.

Для аккумуляции тепловой энергии некоторые исследователи применяли неорганические соли с изменением фазового состояния (табл. 5).

Металлические материалы. Эта группа материалов включает в себя металлы и сплавы с низкой температурой плавления. Несмотря на высокую теплопроводность, металлические материалы

редко используют в аккумуляторах тепловой энергии из-за низкой удельной энтальпии плавления [26, 40]. Также эти материалы имеют небольшую удельную теплоту плавления и относительно низкое давление паров (по сравнению с другими ФИМ). Некоторые теплоаккумулирующие металлические материалы указаны в табл. 6.

Эвтектики

Температуру плавления эвтектической смеси можно изменить, регулируя массовое содержание каждого компонента, поскольку эвтектические материалы редко расслаиваются (разделяются на компоненты) при плавлении и замерзании [10, 26].

Таблица 5. Температура плавления и скрытая теплота плавления теплоаккумулирующих солей с изменением фазового состояния

Материал	Температура плавления, °С	Скрытая теплота плавления, кДж/кг
AlCl ₃ [4, 37]	192	280
LiNO ₃ [4, 37]	250	370
NaNO ₃ [4, 38, 39]	307	172
KNO ₃ [4, 39]	333	266
Na ₂ O ₂ [4, 37]	360	314
KOH [4, 39]	380	150
KClO ₄ [4, 37]	527	1253
LiH [4, 37]	699	2678
MgCl ₂ [4, 38]	714	452
NaCl [4, 38, 39]	800	492

Таблица 6. Температура плавления и скрытая теплота плавления теплоаккумулирующих металлических ФИМ [26, 40]

Материал	Температура плавления, °С	Скрытая теплота плавления, кДж/кг
Эвтектический сплав галлий – антимонид галлия	29.8	–
Эвтектический сплав Bi – Pb	125.0	–
Галлий	30.0	80.3
Эвтектический сплав Сеггоlow (сплав висмута)	58.0	90.9
Эвтектический сплав Bi – In	72.0	25.0
Эвтектический сплав Bi – Cd – In	61.0	25.0

Таблица 7. Температура плавления и скрытая теплота плавления выбранных теплоаккумулирующих эвтектических смесей с изменением фазового состояния

Материал	Температура плавления, °С	Скрытая теплота плавления, кДж/кг
45% CaCl ₂ • 6H ₂ O + 55% CaBr ₂ • 6H ₂ O	14.7	140
66.7% CaCl ₂ • 6H ₂ O + 33.3% MgCl ₂ • 6H ₂ O	25	127
50% CaCl ₂ + 50% MgCl ₂ • 6H ₂ O	25	95
48% CaCl ₂ + 4.3% NaCl + 0.4% KCl + 47.3% H ₂ O	27	188
47% Ca(NO ₃) ₂ • 4H ₂ O + 53% Mg(NO ₃) ₂ • 6H ₂ O	30	136
40% CH ₃ COONa • 3H ₂ O + 60% NH ₂ CONH ₂	30	200.5
61.5% Mg(NO ₃) ₂ • 6H ₂ O + 38.5% NH ₄ NO ₃	52	125
58.7% Mg(NO ₃) ₂ • 6H ₂ O + 41.3% MgCl ₂ • 6H ₂ O	59	132
53% Mg(NO ₃) ₂ • 6H ₂ O + 47% Al(NO ₃) ₂ • 9H ₂ O	61	148
59% Mg(NO ₃) ₂ • 6H ₂ O + 41% MgBr ₂ • 6H ₂ O	66	168

Поэтому, несмотря на то что эвтектические смеси менее распространены по сравнению с другими материалами и имеют более низкую теплопроводность, их можно считать вполне приемлемыми для аккумулирования тепла посредством фазового перехода [26, 41]. В табл. 7 приведены некоторые неорганические эвтектические смеси с изменением фазового состояния, которые могут использоваться для аккумулирования тепла.

Температурный диапазон – один из наиболее важных факторов, который необходимо учитывать при выборе ФИМ для любой системы АТЭ. На рис. 3 показана схема классификации теплоаккумулирующих ФИМ, основанная на температурах плавления, которая может помочь с выбором подходящего материала [26, 40].
Преимущества и недостатки различных типов ФИМ кратко представлены в табл. 8.

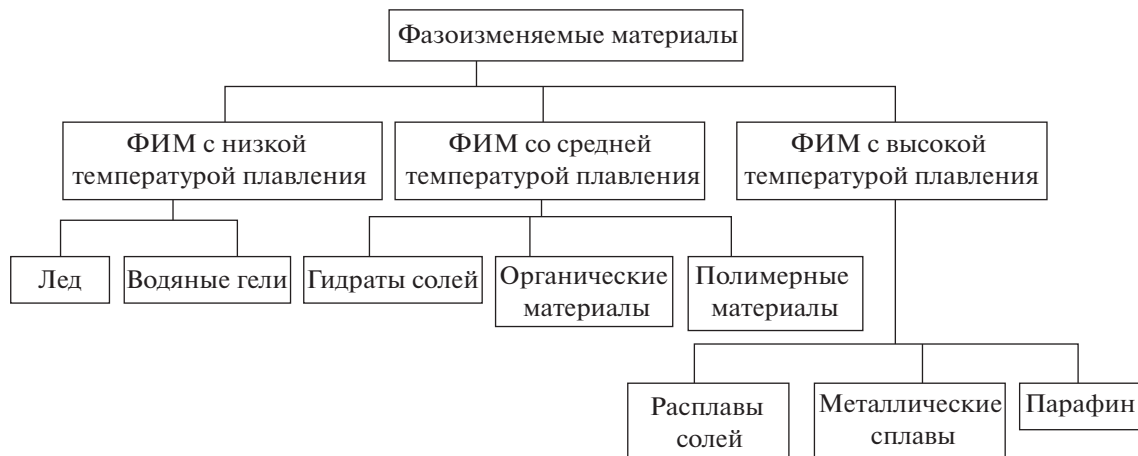


Рис. 3. Классификация теплоаккумулирующих ФИМ на основе температуры плавления [26, 40]

ПРИМЕНЕНИЕ ФИМ В АККУМУЛЯТОРАХ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ В ЗДАНИЯХ

Далее описано применение фазоизменяемых материалов для систем аккумулирования тепловой энергии в зданиях.

Солнечная водонагревательная система

Нагрев воды с помощью солнечного излучения относится к наиболее распространенным

технологиям. В такой системе вода, подогретая в солнечном коллекторе, используется для повышения температуры жидкости в баке-аккумуляторе. Затем нагретая жидкость направляется в здание через теплообменник [43].

Исследования ФИМ, используемых в солнечных водонагревателях [44], показали, что эффективность таких систем и температура воды на выходе из них возрастают в вечернее время. Кроме

Таблица 8. Преимущества и недостатки различных типов ФИМ [17, 42]

Фазоизменяемые материалы	Преимущества	Недостатки
Органические вещества	Широкий диапазон рабочих температур; высокая скрытая теплота плавления; отсутствие переохлаждения при застывании; пригодны для вторичной переработки, а также термически и химически стабильны; совместимы с другими материалами; неагрессивны и безопасны	Низкая теплопроводность; относительно большое изменение объема; низкая энтальпия фазового перехода; огнеопасны
Неорганические вещества	Высокая теплота плавления; очень высокая теплопроводность; незначительное изменение объема; небольшая длительность фазового перехода; низкая стоимость; относится к негорючим веществам	Переохлаждение; агрессивность; сегрегация; снижение эффективности после повторного использования
Эвтектические смеси	Широкий диапазон изменения температур фазового перехода; высокая теплоемкость; отсутствие переохлаждения или незначительное переохлаждение; высокая термическая и химическая стабильность	Низкая теплопроводность; утечка во время фазового перехода

того, если водяные трубопроводы находятся рядом с поверхностью ФИМ, горячую воду можно получать непрерывно в течение дня. В комплексном исследовании ФИМ для водоподогревателей [45] рассматривалось влияние расхода воды через плоский канал на границе раздела твердое тело — жидкость. В этой работе водонагревательная система имела подвижную изоляцию на части поверхности, которая способствовала сокращению ночных потерь тепла с открытой поверхности. Установлено, что температура горячей воды может оставаться постоянной в течение дня и ночи (на 15–20°C выше температуры окружающего воздуха), и колебания температуры воды становятся меньше при увеличении расплавленной части ФИМ.

Отопление и охлаждение помещений

Фазоизменяемые материалы могут применяться как в активных, так и в пассивных системах отопления и охлаждения [46]. В пассивных системах используется тепловая энергия, полученная от солнечного излучения или при естественной конвекции. Фазоизменяемые материалы, например входящие в состав строительных панелей потолков, перекрытий, бетонных конструкций и гипсокартонных плит, могут считаться частью пассивной системы [47]. Система отопления и охлаждения лучше аккумулирует тепловую энергию при включении ФИМ в число ее материалов. Из-за меньших колебаний температуры и увеличения времени, в течение которого поддерживается требуемая температура, длительность периодов обеспечения комфортных условий в помещениях с помощью пассивных систем увеличилась на 32% [48].

Фазоизменяемые материалы, аккумулирующие тепло посредством скрытой теплоты фазового перехода, используются в солнечных коллекторах активных систем отопления и охлаждения для улавливания солнечной энергии в течение дня и ее последующего хранения [21]. Дополнительная электроэнергия, затрачиваемая в периоды повышенного энергопотребления, частично замещается накопленным теплом. Активные системы повышают тепловую эффективность здания, одновременно уменьшая расход электроэнергии на системы отопления и охлаждения [46]. Результаты различных исследований по данной проблеме обобщены в табл. 9.

Утилизация уходящего тепла

Система, в которой используется тепло, выделяемое другим оборудованием, обычно называется системой утилизации уходящего тепла [65]. В частности, такие системы аккумулируют уходящее тепло электроприборов, установленных

внутри зданий [66]. Системы АТЭ на основе низкотемпературных ФИМ были исследованы в [67]. Для поглощения и аккумулирования тепла уходящего потока нагретого воздуха гидрат соли помещали в цилиндрические капсулы. Установлено, что повышение эффективного массового расхода воздуха приводит к росту объемов аккумулированного тепла. Результаты [67] показывают, что эксплуатационные характеристики системы утилизации уходящего тепла на основе ФИМ улучшаются при увеличении количества аккумулированного тепла, что делает ее применение более рентабельным в зонах с большими потерями тепла, например в кухне.

Применение ФИМ в холодильных системах

Для постоянного поддержания низкой температуры внутри холодильника можно использовать ФИМ в торговом холодильном оборудовании с целью уменьшить или перераспределить нагрузку на охлаждение. При этом продукты будут находиться при стабильно низкой температуре до момента их продажи. Фазоизменяемые материалы позволяют снизить потребление электроэнергии, повысить эффективность холодильной системы, продлить срок службы оборудования и сократить затраты на его техническое обслуживание. При применении ФИМ для поддержания охлаждения уменьшаются амплитуды и частоты температурных колебаний. При этом не снижается качество еды, медицинских препаратов и других продуктов, находящихся в холодильных установках.

Так как ФИМ является источником холода, предварительное охлаждение холодильной системы с помощью этого материала перед выходом на максимальную нагрузку или отключением подачи электроэнергии позволяет обеспечить гибкое управление энергетической нагрузкой [68].

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ОГРАНИЧЕНИЯ И ОПТИМИЗАЦИЯ ФИМ ДЛЯ СИСТЕМ АКУМУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛА В ЗДАНИЯХ

В этом разделе обсуждаются ограничения к применению и оптимизация фазоизменяемых материалов для систем АТЭ в зданиях.

Переохлаждение

Переохлаждение — это затвердевание жидкости при температуре выше обычной температуры замерзания, приводящее к увеличению длительности процесса застывания [69, 70]. Для большинства гидратов солей при их длительном использовании характерно переохлаждение перед замерзанием вследствие выделения аккумулированного тепла [71]. В результате характеристики

Таблица 9. Сводные данные по энергосбережению и снижению пиковых нагрузок, заимствованные из обзорных статей за 2008–2015 гг.

Литературный источник	Место проведения исследования	Результаты исследования
Chen и др. [49]	Пекин (Китай)	Объемы энергопотребления в течение всего зимнего отопительного сезона сократились на 10%
Evers и др. [50]	Лоренс (США)	Среднесуточный и пиковый тепловые потоки снизились на 9.2 и 1.2% соответственно
Kuznik и Virgone [51]	Виллербан (Франция)	При использовании ФИМ температура воздуха в помещении уменьшилась на 4.2°C
Lai и др. [52]	Лоренс (США)	Средняя максимальная теплопередача снизилась на 29.1%, а средняя общая теплопередача – на 16.3%
Sharma и др. [10]	Лиссабон (Португалия)	Максимальная нагрузка на охлаждение упала на 35.4%, а полная нагрузка – на 1% (сокращение энергопотребления системой кондиционирования), среднегодовое энергопотребление на отопление сократилось на 12.8%
Kara и Kurnuç [53]	Эрзерум (Турция)	Стены с ФИМ в исследуемом помещении уменьшили годовую отопительную нагрузку на 14%
Ahmed и др. [54]	Лион (Франция)	Максимальная температура в помещении упала на 2.2°C
Kuznik и др. [55]	Амфилохия (Греция)	Задержка по времени увеличилась примерно на 100 мин
Hichem и др. [56]	Уарлга (Алжир)	Температура внутренней поверхности стенки понизилась на 3.8°C, а тепловой поток, поступающий в помещение, – на 82.1%
Lee и др. [57]	Лоренс (США)	Максимальный тепловой поток на южной и западной стенах уменьшился на 51.3 и 29.7% соответственно
Kong и др. [58]	Тяньцзинь (Китай)	По сравнению с контрольным помещением со стенами без ФИМ, максимальная температура снизилась на 1°C в помещении со стенами с внешними панелями с ФИМ и более чем на 2°C в помещении со стенами с внутренними панелями с ФИМ
Mandilaras и др. [59]	Гонконг (Китай)	Максимальная температура упала на 4°C (в модели с бетонными стенами, в которые были заделаны ФИМ). Относительная влажность уменьшилась на 16% по сравнению с контрольной моделью (панели с ФИМ установлены на внутренней поверхности бетонных стен)
Castell и др. [60]	Льейда (Испания)	Максимальная температура уменьшилась на 1°C, потребления электроэнергии – на 15%, что способствовало сокращению выбросов CO ₂ на 1.0–1.5 кг/м ² в год
Shi и др. [61]	Пекин (Китай)	В течение всего зимнего периода объемы энергопотребления снизились не менее чем на 10%
Tiago и др. [62]	Авейру (Португалия)	Колебания температуры уменьшились с 10 до 5°C, а задержка времени между изменениями наружных и внутренних условий составила приблизительно 3 ч
Principi и Fioretti [63]	Анкона (Италия)	Максимальный тепловой поток сократился на 25%, а задержка времени между изменениями наружных и внутренних условий равнялась 6 ч
Diaconu [64]	Лиссабон (Португалия)	Максимальное уменьшение энергопотребления – примерно 10 кВт · ч (температура плавления ФИМ составила примерно 19°C)

ФИМ ухудшаются из-за отсутствия центров кристаллизации в небольшом объеме капсул [72] и процесс утилизации тепла затягивается. Такое явление чаще наблюдается в неорганических ФИМ.

Результаты исследования [73] показывают, что ввод присадки (нуклеирующего агента), образующей дополнительные центры первичной кристаллизации, может сократить процесс переохлаждения. Однако авторы работы [1] пришли к выводу, что ввод присадки в довольно большом количестве приводит к уменьшению скрытой теплоты плавления, что оказывает негативное влияние на термические характеристики ФИМ.

Далее перечислены некоторые нуклеирующие агенты с частицами разных размеров, мкм:

Углерод	1.5–6.7
TiO ₂	2–200
Боракс (тетраборат натрия)	20 × 50 – 200 × 250
Медь	1.5–2.5
Алюминий	8.5–20.0

Низкая теплопроводность

Интенсивность теплопередачи в системах АТЭ за счет теплоты фазового перехода падает при снижении теплопроводности [74]. Из-за низкой теплопроводности скорость выделения/поглощения тепла во время фазового перехода твердое тело – жидкость уменьшается, поэтому способность ФИМ аккумулировать тепловую энергию может быть ограничена [75]. Большое количество исследований было посвящено повышению теплопроводности ФИМ с помощью композитов [76]. Например, нанокompозит стеариновой кислоты можно применять для получения углеродсодержащих соединений [77]. В данной работе было показано, что увеличение массового содержания графита до 5% позволяет повысить теплопроводность ФИМ до 12 раз. Однако при этом уменьшаются скрытая теплота плавления материала и интенсивность естественной конвекции в жидкой стеариновой кислоте. Низкая теплопроводность ФИМ в системах аккумулирования тепла может оказать большое влияние на эксплуатационные параметры жилых зданий.

Перед установкой системы аккумулирования тепла на основе ФИМ в строительных конструкциях необходимо обратить внимание на интенсивность теплообмена, так как именно от нее существенно зависят общие характеристики и эффективность системы. В соответствии с результатами [78] установка ребер могла бы повысить тепловую эффективность системы АТЭ за счет скрытой теплоты фазового перехода.

В работе [79] показано, что низкая теплопроводность нитрата натрия, составляющая 0.57 Вт/(м · К) в твердом состоянии, является серьезным недостатком этого материала при применении его в качестве ФИМ для аккумулирования тепла, особенно во время циклов выделения тепла, когда теплопередача через твердый слой осуществляется только теплопроводностью. В нескольких исследованиях было подтверждено, что теплопроводность ФИМ на основе нитрата натрия с добавкой наночастиц оксида алюминия (alumina nanoparticles – NPA) выше теплопроводности основной соли – нитрата натрия. Чем выше концентрация таких наночастиц, тем интенсивнее увеличивается теплопроводность ФИМ. Таким образом, нанокapsулированные ФИМ обеспечивают более высокий коэффициент теплопередачи по сравнению с ФИМ такой же массы, но без наночастиц. Тем не менее, вязкость ФИМ на основе нитрата натрия с NPA возрастает при увеличении их массового содержания. В то же время, значительное повышение динамической вязкости наножидкостей, содержащих NPA, ухудшит конвективную теплоотдачу. Теплоемкость наножидкостей на основе нитрата натрия с добавкой наночастиц уменьшается при росте их концентрации. Кроме того, добавление NPA незначительно сокращает длительность циклов зарядки и разрядки теплового аккумулятора. Это обусловлено, главным образом, ростом теплопроводности при увеличении содержания наночастиц, несмотря на ухудшение конвективной теплоотдачи, вызванное повышением динамической вязкости наножидкостей с добавкой наночастиц. Циклы разрядки обычно имеют большую длительность, чем циклы зарядки, из-за образования твердого слоя с низкой теплопроводностью, который затрудняет передачу тепла.

Анализ результатов исследований [80] показал, что одним из перспективных методов улучшения теплофизических свойств ФИМ и функциональных характеристик систем АТЭ за счет скрытой теплоты фазового перехода является дисперсия наночастиц. Кроме того, установлено, что добавление графена к ФИМ увеличивает теплопроводность материала в 14 раз.

Согласно информации, представленной в [81], ФИМ не будут широко применяться в качестве основы для хранения тепловой энергии ввиду их чрезвычайно низкой теплопроводности [менее 1 Вт/(м · К)]. Однако теплопроводность исходного материала можно увеличить, если добавить в него некоторое количество углеродных нанотрубок, теплопроводность которых на четыре-пять порядков выше. Согласно исследованию [81] и численному моделированию, при легировании ФИМ углеродными нанотрубками (они составляют примерно 20% ФИМ) его теплопроводность можно увеличить в 2–4 раза.

Сегрегация фаз

Фазовая сегрегация — одно из наиболее серьезных негативных последствий нарушения термической стабильности ФИМ в циклических процессах [82]. Если в условиях циклической нагрузки ФИМ одновременно находится в разных фазах, может произойти сегрегация фаз [83]. Это явление характерно для многокомпонентных ФИМ, составляющие которых имеют разную плотность. Разделение фаз на свои компоненты под действием силы тяжести приводит к изменению температуры плавления исходного материала [82]. Другая причина сегрегации фаз — неконгруэнтное плавление ФИМ на основе гидратов солей [84] (вызванное неравномерным плавлением твердого компонента ФИМ). Сегрегация фаз препятствует длительному поддержанию стабильного состояния ФИМ.

В работе [85] рассмотрена возможность применения загустителей для предотвращения или уменьшения сегрегации ФИМ на основе гидратов неорганических солей. Эффективным загустителем, предотвращающим разделение фаз, является сверхпоглощающий полимер декагидрат сульфата натрия ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$). Согласно полученным данным, подавляющую часть гидратов солей с большим количеством молекул воды можно стабилизировать при массовом содержании загустителя 3–5%. Разделение фаз низкогидратированных солей, например пентагидрата тиосульфата натрия ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), также удалось предотвратить при массовом содержании загустителя карбоксиметилцеллюлозы от 2 до 4%.

Пожарная безопасность ФИМ

Материалы, используемые в ограждающих конструкциях жилых зданий, могут оказывать серьезное влияние на развитие пожара в здании [86]. Гипсокартонные листы, широко применяемые при отделке жилых помещений, оказались довольно надежным и безопасным материалом [87]. Гипсовые панели для стен с капсулированным ФИМ на основе парафина (его содержание составляло примерно 24%) менее огнестойкие, чем обычные гипсовые панели, что не отвечает требованиям безопасности к строительным материалам зданий [88]. При нагреве парафин превращается в пар, который уходит из оболочки капсул ФИМ и проникает в пористую структуру гипсокартона [89]. Пары парафина воспламеняются при высоких температурах, увеличивая пожарную нагрузку на здание и ухудшая его противопожарные характеристики. В нескольких исследованиях обсуждалось применение огнестойких материалов, не распространяющих горение, с целью уменьшить негативное влияние органических ФИМ в ограждающих конструкциях на пожарную безопасность.

Коррозия

Совместимость материалов имеет важнейшее значение при проектировании систем АТЭ для зданий. Если контейнер (капсулы), в котором находится ФИМ, будет несовместим с ним, то возникшая коррозия капсул может привести к изменению характеристик ФИМ. В результате ухудшатся эксплуатационные параметры системы аккумулирования тепла. Перед началом разработки систем АТЭ при использовании скрытой теплоты фазового перехода для зданий необходимо рассмотреть совместимость используемого ФИМ с капсулами для его хранения [17].

Стоимость

Как было указано ранее, для улучшения характеристик теплоаккумулирующего ФИМ в него должна быть введена присадка. Ожидается, это приведет к резкому увеличению стоимости таких материалов. Потребитель должен решить, стоит ли идти на такие затраты. Однако следует отметить, что основная масса населения ничего не знает о теплоаккумулирующих ФИМ и пользе их применения. Именно поэтому все больше компаний вынуждены продавать населению продукцию, акцентируя особое внимание на ее преимуществах [1].

Известно, что использование аккумуляторов тепловой энергии с ФИМ позволяет эффективно задействовать экологически чистые источники энергии, снизить энергопотребление и улучшить эксплуатационные показатели энергосистемы. Согласно недавней работе [90], в последние 20 лет большое число исследователей обращали свое внимание на АТЭ, что привело к появлению обширных научных трудов, объем которых постоянно увеличивается. Несмотря на значительное количество публикаций, данную тему все еще необходимо изучать в целях всесторонней оценки целесообразности использования АТЭ на конкретных строительных объектах. В [90] намечены пути развития современных АТЭ, включая основные направления исследований и научные проблемы некоторых технологий АТЭ, которые ждут своего решения. Наиболее важные и актуальные задачи этого исследования в области социологии, экологии и экономики были определены с помощью подходов библиометрического анализа.

По результатам проведенной оценки [91] предложены рекомендации по дальнейшему совершенствованию технологии АТЭ с использованием ФИМ. В связи с недостаточным объемом имеющейся информации рекомендуется уделить внимание вопросу изучения стабильности ФИМ. Отмечено, что для реализации потенциальных преимуществ ФИМ в полной мере необходимо задействовать многочисленные фазоизменяемые

материалы в связанных или комплексных системах, включающих в себя дополнительное оборудование.

В обзоре [92], посвященном анализу свойств ФИМ, применяемых в системах аккумулирования тепла в зданиях, предназначенных для отопления или отопления/охлаждения (гибридные системы), сделан вывод о необходимости проведения дальнейших исследований использования АТЭ в коммерческих зданиях, разработки и оптимизации гибридных систем. И последнее, но не менее важное: выделены определенные сочетания активных и пассивных методов отопления, обеспечивающие повышение энергоэффективности системы.

МЕТОДЫ УТИЛИЗАЦИИ ФИМ

Далее описаны некоторые методы утилизации фазоизменяемых материалов.

Система отбора и откачки ФИМ

В работе [1] предложена система (ее схема показана на рис. 4) для установки фазоизменяемого материала в строительные конструкции здания и удаления его из них. Принцип действия заключается в перекачке жидкого ФИМ в макрокапсулы внутри стены здания. Такая схема позволяет извлекать отработавший ФИМ из стен, так как большинство фазоизменяемых материалов имеют расчетный срок службы, составляющий примерно 1000 циклов аккумулирования и выделения тепла. Для удаления из капсул ФИМ, ставшего неэффективным, его сначала ожижают с помощью нагревательных змеевиков, а затем откачивают реверсивным насосом и сливают в дренаж. После этого можно закачать в систему новый ФИМ для восстановления ее нормальной работы. Для предотвращения утечки жидкого ФИМ предусмотрены клапаны, которые остаются закрытыми во время эксплуатации системы. Для извлечения ФИМ необходимо открыть клапаны. Эту процедуру, вероятнее всего, будет выполнять инженер, прошедший необходимую подготовку, который также будет отвечать за удаление старого и уже неэффективного ФИМ.

Преимущество такой технологии заключается в том, что она позволяет заменить отработавший ФИМ новым без проведения каких-либо работ со строительными материалами. Энергопотребление насоса и нагревательных змеевиков будет незначительным, так как их предполагается использовать только 1 раз в 3–4 года. Однако весьма важным недостатком данной технологии является то, что эту систему вряд ли удастся внедрить во многие уже существующие конструкции зданий, т.е. такая система может применяться главным образом в новых сооружениях. Из-за очень высо-

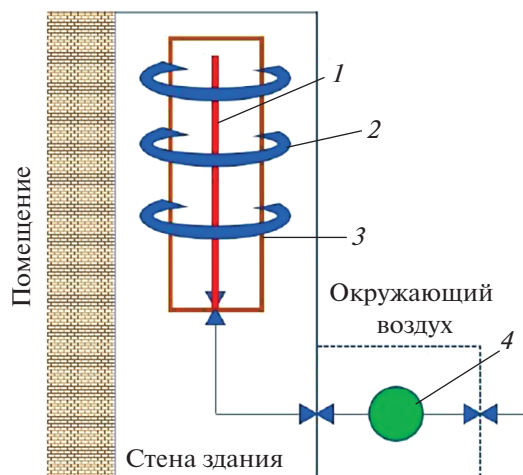


Рис. 4. Схема насосной системы для подачи и удаления ФИМ [1].

1 – фазоизменяемый материал; 2 – нагревательный змеевик; 3 – макрокапсула (контейнер) для хранения ФИМ; 4 – реверсивный насос

кой стоимости системы ее, скорее всего, можно будет установить только на одной стороне дома. Более того, операция по удалению отработавшего ФИМ и закачке нового может оказаться опасной для неподготовленного персонала, поэтому для ее проведения потребуется привлечь специалистов, имеющих необходимую квалификацию и подготовку.

Система стеновых панелей

Другой, более простой подход к утилизации ФИМ, рассмотрен в [1] и отражен на рис. 5. Предлагается помещать ФИМ в съемные модули и устанавливать их в стене здания. Основная идея предлагаемой конструкции заключается в обеспечении возможности замены ФИМ пользователем, причем модули можно безопасно хранить внутри стены, имеющей специальную конструкцию. Доступ к этим малогабаритным модулям будет осуществляться с помощью сдвижной роликовой панели (при открытии модули выдвигаются из стены) или системы с распашной шкафной дверью (она позволяет вынуть модули из стены вручную). Для обеспечения безопасности людей, находящихся в здании, и предотвращения намеренного повреждения системы можно задействовать запорный механизм, открываемый специальным ключом. Фазоизменяемые материалы могут поставляться в модулях, для замены которых не требуется специальная подготовка персонала, что можно считать ожидаемым преимуществом этой системы по сравнению с заменой жидких ФИМ с помощью насоса. Такой метод больше подходит для модернизации оборудования, чем насосная система. Поскольку доступ к

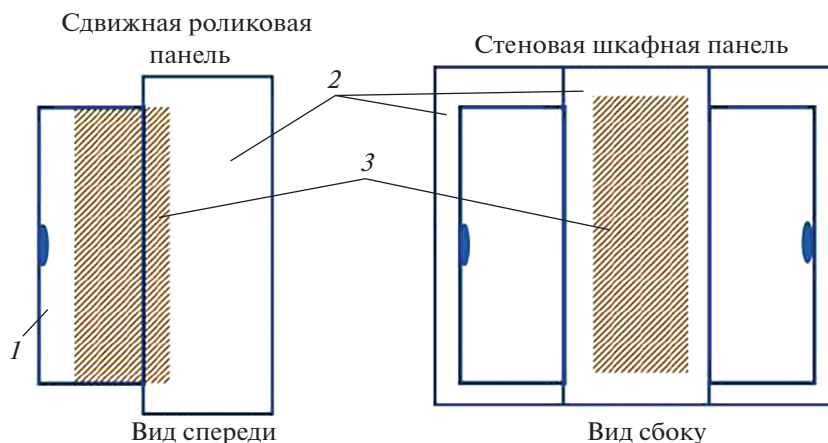


Рис. 5. Схемы сдвижной стеновой роликовой панели, закрывающей модули с ФИМ, и распашной шкафной панели [1].
1 — сдвижная дверь; 2 — панель стены; 3 — модули с капсулированным ФИМ

этой системе возможен только изнутри, используемые стеновые панели вряд ли стоит оклеивать обоями. Из-за того что съемные внутренние стеновые панели применяются довольно редко, это, в конечном итоге, может сделать рассматриваемое конструктивное решение менее привлекательным. Также не ясно, как выполнить изоляцию в данной системе. В связи с этим необходимы дополнительные исследования, чтобы усовершенствовать систему и сделать ее более удобной для пользователей.

Для обоих описанных систем заказчики могут выбрать более дешевые низкосортные ФИМ. Можно отказаться от использования дорогих ФИМ с добавками для улучшения их эксплуатационных характеристик, так как материалы можно легко заменить. Это позволит сократить расходы. Стабильность характеристик системы АТЭ за счет скрытой теплоты фазового перехода обеспечивается в течение всего срока службы также путем извлечения старого ФИМ и установки нового, что является основным преимуществом такой системы.

ВЫВОДЫ

1. Хотя использование ФИМ в зданиях может повысить энергоэффективность системы отопления и создать благоприятные условия в помещениях, существенные недостатки могут ограничить возможность применения данных материалов.

2. Многие материалы имеют низкую теплопроводность, которая увеличивает длительность фазового перехода, негативно сказывается на общем комфорте людей, находящихся в здании, и снижает энергоэффективность системы отопления. К числу прочих недостатков ФИМ относят их переохлаждение, пожароопасность, высокую стоимость, а также сегрегацию фаз.

3. Фазоизменяемые материалы имеют некоторые особенности, которые могут оказывать неблагоприятное воздействие на потребителя (заинтересованного в приобретении ФИМ). Например, плохая информированность общественности о преимуществах использования ФИМ и высокие затраты на их установку. Требуется проведение дополнительных исследований для решения этих вопросов. Другие особенности ФИМ также нуждаются в дальнейшем изучении, поскольку это позволит повысить осведомленность населения о фазоизменяемых материалах.

4. Чтобы применение теплоаккумулирующих систем на основе ФИМ стало повсеместным для жилых зданий, необходимо разработать методы неинтрузивного (тщательного и полноценного) обслуживания этих систем, так как циклические воздействия на систему, связанные с выделением тепла, приводят к ухудшению термических характеристик большинства материалов в процессе эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. PCMs for residential building applications: A short review focused on disadvantages and proposals for future development / A. Bland, M. Khzouz, T. Statheros, E.I. Gkanas // *Buildings*. 2017. V. 7. Is. 3. P. 78. <https://doi.org/10.3390/buildings7030078>
2. Dwivedi V.K., Tiwari P., Tiwari S. Importance of phase change material (PCM) in solar thermal applications: A review // *Proc. of the Intern. Conf. on Emerging Trends in Electrical, Electronics and Sustainable Energy Systems (ICETEESES)*. Sultanpur, India, 11–12 March 2016. <https://doi.org/10.1109/ICETEESES.2016.7581349>
3. Gkanas E.I., Khzouz M. Numerical analysis of candidate materials for multi-stage metal hydride hydrogen compression processes // *Renewable Energy*.

2017. V. 111. P. 484–493.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.04.037>
4. **Pielichowska K., Pielichowski K.** Phase change materials for thermal energy storage // *Prog. Mater. Sci.* 2014. V. 65. P. 67–123.
<https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2014.03.005>
5. **Garg H.P., Mullick S.C., Bhargava A.K.** Solar thermal energy storage. Dordrecht, Holland: Reidel Publishing Company, 1985.
6. **Lane G.A.** Solar heat storage. V. II: Latent heat materials. Boca Raton, USA: CRC Press, 1986.
<https://doi.org/10.1201/9781351076746>
7. **Dincer I., Rosen M.A.** Thermal energy storage: systems and applications. Chichester, England: Wiley, 2002.
8. **A review on phase change energy storage: materials and applications** / M.M. Farid, A.M. Khudhair, S.A.K. Razack, S. Al-Hallaj // *Energy Convers. Manage.* 2004. V. 45. Is. 9–10. P. 1597–1615.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2003.09.015>
9. **Thermal energy storage: How previous findings determine current research priorities** / D. Fernandes, F. Pitié, G. Cáceres, J. Baeyens // *Energy.* 2012. V. 39. Is. 1. P. 246–257.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.01.024>
10. **Review on thermal energy storage with phase change materials and applications** / A. Sharma, V.V. Tyagi, C.R. Chen, D. Buddhi // *Renewable Sustainable Energy Rev.* 2009. V. 13. Is. 2. P. 318–345.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.10.005>
11. **Thermal energy storage system using phase change materials: Constant heat source** / M.R. Reddy, N. Nallusamy, A.B. Prasad, H.K. Reddy // *Therm. Sci.* 2012. V. 16. Is. 4. P. 1097–1104.
<https://doi.org/10.2298/TSCI100520078R>
12. **Lane G.A.** Low temperature heat storage with phase change materials // *Int. J. Ambient Energy.* 1980. V. 1. Is. 3. P. 155–168.
<https://doi.org/10.1080/01430750.1980.9675731>
13. **Habib M.A., Rahman M.M.** Phase change materials for applications in building thermal energy storage. *Tech-Connect Briefs.* 2021. P. 97–100.
14. **Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review** / L.F. Cabeza, A. Castell, C. Barreneche, A. de Gracia, A.I. Fernández // *Renewable Sustainable Energy Rev.* 2011. V. 15. Is. 3. P. 1675–1695.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.018>
15. **Khudhair A.M., Farid M.M.** A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials // *Energy Convers. Manage.* 2004. V. 45. Is. 2. P. 263–275.
[https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(03\)00131-6](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(03)00131-6)
16. **Mishra A., Shukla A., Sharma A.** Latent heat storage through phase change materials // *Resonance.* 2015. V. 20. P. 532–541.
<https://doi.org/10.1007/s12045-015-0212-5>
17. **Thakare K.A., Bhawe A.G.** Review on latent heat storage and problems associated with phase change materials // *Int. J. Res. Eng. Technol.* 2015. V. 4. Is. 10. P. 176–182.
<https://ijret.org/volumes/2015v04/i10/IJRET20150410030.pdf>
18. **Gracia A.D., Cabeza L.F.** Phase change materials and thermal energy storage for buildings // *Energy Build.* 2015. V. 103. P. 414–419.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.007>
19. **A review on long-term sorption solar energy storage** / K.E. N'Tsoukpoe, H. Liu, N.L. Pierrès, L. Luo // *Renewable Sustainable Energy Rev.* 2009. V. 13. Is. 9. P. 2385–2396.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.05.008>
20. **Aydin D., Casey S.P., Riffa S.** The latest advancements on thermochemical heat storage systems // *Renewable Sustainable Energy Rev.* 2015. V. 41. P. 356–367.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.054>
21. **Tyagi V.V., Buddhi D.** PCM thermal storage in buildings: A state of art // *Renewable Sustainable Energy Rev.* 2007. V. 11. Is. 6. P. 1146–1166.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.10.002>
22. **Thermal characteristics of manganese (II) nitrate hexahydrate as a phase change material for cooling systems** / K. Nagano, T. Mochida, S. Takeda, R. Domański, M. Rebow // *Appl. Therm. Eng.* 2003. V. 23. Is. 2. P. 229–241.
[https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(02\)00161-8](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(02)00161-8)
23. **Bo H., Gustafsson E.M., Setterwall F.** Tetradecane and hexadecane binary mixtures as phase change materials (PCMs) for cool storage in district cooling system // *Energy.* 1999. V. 24. Is. 12. P. 1015–1028.
[https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(99\)00055-9](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(99)00055-9)
24. **Paris J., Falardeau M., Villeneuve C.** Thermal storage by latent heat: A viable option for energy conservation in buildings // *Energy Sources.* 1993. V. 15. Is. 1. P. 85–93.
<https://doi.org/10.1080/00908319308909014>
25. **Babich M.W., Benrashed R., Mounts R.D.** DSC studies of new energy storage materials. Part 3. Thermal and flammability studies // *Thermochim. Acta.* 1994. V. 243. Is. 2. P. 193–200.
[https://doi.org/10.1016/0040-6031\(94\)85054-2](https://doi.org/10.1016/0040-6031(94)85054-2)
26. **Sarbu I., Sebarchievici C.** A comprehensive review of thermal energy storage // *Sustainability.* 2018. V. 10. Is. 1. P. 191.
<https://doi.org/10.3390/su10010191>
27. **Development of a modular heat exchanger with integrated latent heat storage: Final Rep.** / A. Abhat, D. Heine, M. Heinisch, N.A. Malatidis, G. Neuer. Stuttgart, Germany: Institut fuer Kemtechnik und Energiewandlung e.V., 1981.
28. **Bailey A.E.** Melting and solidification of fats. N.Y.: Interscience, 1950.
29. **Keleş S., Kaygusuz K., Sari A.** Lauric and myristic acids eutectic mixture as phase change material for low-temperature heating applications // *Int. J. Energy Res.* 2005. V. 29. Is. 9. P. 857–870.
<https://doi.org/10.1002/er.1111>
30. **Fatty acids, and their mixtures as phase-change materials for thermal energy storage** / D. Feldman, M.M. Shapiro, D. Banu, C.J. Fuks // *Sol. Energy Mater.* 1989. V. 18. Is. 3–4. P. 201–216.
[https://doi.org/10.1016/0165-1633\(89\)90054-3](https://doi.org/10.1016/0165-1633(89)90054-3)
31. **Kaygusuz K., Sari A.** Thermal energy storage performance of fatty acids as a phase change material // *Energy Source. Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects.* 2006. V. 28. Is. 2. P. 105–116.
<https://doi.org/10.1080/009083190913971>

32. **Hasan A., Sayigh A.A.** Some fatty acids as phase change thermal energy storage materials // *Renewable Energy*. 1994. V. 4. Is. 1. P. 69–76.
[https://doi.org/10.1016/0960-1481\(94\)90066-3](https://doi.org/10.1016/0960-1481(94)90066-3)
33. **Sari A., Kaygusuz K.** Thermal performance of palmitic acid as a phase change energy storage material // *Energy Convers. Manage.* 2002. V. 43. Is. 6. P. 863–876.
[https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(01\)00071-1](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(01)00071-1)
34. **Naumann R., Emons H.-H.** Results of thermal analysis for investigation of salt hydrates as latent heat-storage materials // *J. Therm. Anal.* 1989. V. 35. P. 1009–1031.
<https://doi.org/10.1007/BF02057256>
35. **Thermal performance of sodium acetate trihydrate thickened with different materials as phase change energy storage material** / L.F. Cabeza, G. Svensson, S. Hiebler, H. Mehling // *Appl. Therm. Eng.* 2003. V. 23. Is. 13. P. 1697–1704.
[https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(03\)00107-8](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(03)00107-8)
36. **Heckenkamp J., Baumann H.** Latentwärmespeicher // *Sonderdruck aus Nachrichten, Nachrichten aus der Chemie*. 1997. Bd. 45. Nr. 11. S. 1075–1081.
<https://doi.org/10.1002/nadc.199700023>
37. **Hasanain S.M.** Review on sustainable thermal energy storage technologies. Part I: Heat storage materials and technologies // *Energy Convers. Manage.* 1998. V. 39. Is. 11. P. 1127–1138.
[https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(98\)00025-9](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(98)00025-9)
38. **Heine D., Heess M.F.** Chemische und physikalische Eigenschaften von latentwärmespeichermaterialien für solarkraftwerke // *Proc. of the 3rd Intern. Solarforum*. Hamburg, Germany, 24–26 June 1980.
39. **Survey of thermal storage for parabolic trough power plants: Report NREL1EC24** / National Renewable Energy Laboratory; Pilkington Solar International GmbH. Cologne, Germany, 13 Sept. 1999–12 June 2000.
40. **Low melting point liquid metal as a new class of phase change material: An emerging frontier in energy area** / H. Ge, H. Li, S. Mei, J. Liu // *Renewable Sustainable Energy Rev.* 2013. V. 21. P. 331–346.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.01.008>
41. **Su W., Darkwa J., Kokogiannakis G.** Review of solid-liquid phase change materials and their encapsulation technologies // *Renewable Sustainable Energy Rev.* 2015. V. 48. P. 373–391.
42. **Obitayo O.A.** Simulation, and analysis of phase change materials for building temperature control: thesis submitted in partial fulfilment for the requirement of the degree master of science / Department of Mechanical Engineering, University of Strathclyde Engineering, 2011.
43. **Sharma A., Chen C.R.** Solar water heating system with phase change materials // *Int. Rev. Chem. Eng.* 2009. V. 1. No. 4. P. 297–307.
44. **Bhargava A.K.** Solar water heater based on phase changing material // *Appl. Energy*. 1983. V. 14. Is. 3. P. 197–209.
[https://doi.org/10.1016/0306-2619\(83\)90063-6](https://doi.org/10.1016/0306-2619(83)90063-6)
45. **Performance prediction of PCCM collection cum-storage water heater: Quasi-steady state solution** / G.N. Tiwari, S.N. Rai, S. Ram, M. Singh // *Energy Convers. Manage.* 1988. V. 28. Is. 3. P. 219–223.
[https://doi.org/10.1016/0196-8904\(88\)90025-8](https://doi.org/10.1016/0196-8904(88)90025-8)
46. **Bruno F.** Using phase change materials (PCMs) for space heating and cooling in buildings. 2004. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfefindmkaj/<https://www.eurogypsum.org/wp-content/uploads/2015/05/N0912.pdf>
47. **Kenisarin M., Mahkamov K.** Passive thermal control in residential buildings using phase change materials // *Renewable Sustainable Energy Rev.* 2016. V. 55. P. 371–398.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.128>
48. **Thermal performance of buildings integrated with phase change materials to reduce heat stress risks during extreme heatwave events** / S. Ramakrishnan, X. Wang, J. Sanjayan, J. Wilson // *Appl. Energy*. 2017. V. 194. P. 410–421.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.04.084>
49. **A new kind of phase change material (PCM) for energy-storing wallboard** / C. Chen, H. Guo, Y. Liu, H. Yue, C. Wang // *Energy Build.* 2008. V. 40. Is. 5. P. 882–890.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.07.002>
50. **Evers A.C., Medina M.A., Fang Y.** Evaluation of the thermal performance of frame walls enhanced with paraffin and hydrated salt phase change materials using a dynamic wall simulator // *Build. Environ.* 2010. V. 45. Is. 8. P. 1762–1768.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.02.002>
51. **Kuznik F., Virgone J.** Experimental assessment of a phase change material for wall building use // *Appl. Energy*. 2009. V. 86. Is. 10. P. 2038–2046.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.01.004>
52. **Lai C.-M., Chen R.H., Lin C.-Y.** Heat transfer and thermal storage behavior of gypsum boards incorporating micro-encapsulated PCM // *Energy Build.* 2010. V. 42. Is. 8. P. 1259–1266.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.02.018>
53. **Kara Y.A., Kurnuç A.** Performance of coupled novel triple glass and phase change material wall in the heating season: an experimental study // *Sol. Energy*. 2012. V. 86. Is. 9. P. 2432–2442.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.05.012>
54. **Ahmed M., Meade O., Medina M.A.** Reducing heat transfer across the insulated walls of refrigerated truck trailers by the application of phase change materials // *Energy Convers. Manage.* 2010. V. 51. Is. 3. P. 383–392.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.09.003>
55. **Kuznik F., Virgone J., Johannes K.** In-situ study of thermal comfort enhancement in a renovated building equipped with phase change material wallboard // *Renewable Energy*. 2011. V. 36. Is. 5. P. 1458–1462.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.11.008>
56. **Experimental and numerical study of a usual brick filled with PCM to improve the thermal inertia of buildings** / N. Hichem, S. Nouredine, S. Nadia, D. Djamilia // *Energy Procedia*. 2013. V. 36. P. 766–775.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.07.089>
57. **Assessing the integration of a thin phase change material (PCM) layer in a residential building wall for heat transfer reduction and management** / K.O. Lee, M.A. Medina, E. Raith, X. Sun // *Appl. Energy*. 2015. V. 137. P. 699–706.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.003>

58. **Experimental** research on the use of phase change materials in perforated brick rooms for cooling storage / X. Kong, S. Lu, J. Huang, Z. Cai, S. Wei // *Energy Build.* 2013. V. 62. P. 597–604.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.03.048>
59. **Experimental** thermal characterization of a Mediterranean residential building with PCM gypsum board walls / I. Mandilaras, M. Stamatiadou, D. Katsourinis, G. Zannis, M. Founti // *Build. Environ.* 2013. V. 61. P. 93–103.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.12.007>
60. **Experimental** study of using PCM in brick constructive solutions for passive cooling / A. Castell, I. Martorell, M. Medrano, G. Pérez, L.F. Cabeza // *Energy Build.* 2010. V. 42. Is. 4. P. 534–540.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.10.022>
61. **Experimental** assessment of position of macro encapsulated phase change material in concrete walls on indoor temperatures and humidity levels / X. Shi, S.A. Memon, W. Tang, H. Cui, F. Xing // *Energy Build.* 2014. V. 71. P. 80–87.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.12.001>
62. **Experimental** testing, and numerical modelling of masonry wall solution with PCM incorporation: A passive construction solution / S. Tiago, R. Vicente, N. Soares, V. Ferreira // *Energy Build.* 2012. V. 49. P. 235–245.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.02.010>
63. **Principi P., Fioretti R.** Thermal analysis of the application of PCM and low emissivity coating in hollow bricks // *Energy Build.* 2012. V. 51. P. 131–142.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.04.022>
64. **Diaconu B.M.** Thermal energy savings in buildings with PCM-enhanced envelope: influence of occupancy pattern and ventilation // *Energy Build.* 2011. V. 43. Is. 1. P. 101–107.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.08.019>
65. **U.S. Patent 5548958 A.** Waste heat recovery system / W.S. Lewis. 27 Aug. 1996. <https://patents.justia.com/patent/5548958>
66. **Chen C.W., Russell N.** Thermal energy storage technologies: Literature review. 2011.
67. **Kabbara M.J., Abdallah N.B.** Experimental investigation on phase change material based thermal energy storage unit // *Procedia Comput. Sci.* 2013. V. 19. P. 694–701.
<https://doi.org/10.1016/j.procs.2013.06.092>
68. **Phase change materials** for domestic refrigerators to improve food quality and prolong compressor off time / C. Tulapurkar, P.R. Subramaniam, G. Thagamani, R. Thiagarajan // *Proc. of the Intern. Refrigeration and Air Conditioning Conf.* Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA, 12–15 July 2010.
69. **Supercooling** elimination of phase change materials (PCMs) microcapsules / R. Al-Shannaq, J. Kurdi, S. Al-Muhtaseb, M. Dickinson, M. Farid // *Energy.* 2015. V. 87. P. 654–662.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.05.033>
70. **A review** on supercooling of phase change materials in thermal energy storage systems / A. Safari, R. Saidur, F.A. Sulaiman, Y. Xu, J. Dong // *Renewable Sustainable Energy Rev.* 2017. V. 70. P. 905–919.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.272>
71. **Lane G.A.** Phase change materials for energy storage nucleation to prevent supercooling // *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 1992. V. 27. Is. 2. P. 135–160.
[https://doi.org/10.1016/0927-0248\(92\)90116-7](https://doi.org/10.1016/0927-0248(92)90116-7)
72. **Microencapsulated** n-alkane with p (n-butyl methacrylate-co-methacrylic acid) shell as phase change materials for thermal energy storage / X. Qiu, G. Song, X. Chu, X. Li, G. Tang // *Sol. Energy.* 2013. V. 91. P. 212–220.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.01.022>
73. **An evaluation** of microencapsulated PCM for use in cold energy transportation medium / Y. Yamagishi, T. Sugeno, T. Ishige, H. Takeuchi, A.T. Pyatenko // *Proc. of the 31st Intersociety Energy Conversion Engineering Conf.* Washington, DC, USA, 11–16 Aug. 1996.
<https://doi.org/10.1109/IECEC.1996.553442>
74. **Melting** of phase change materials in a cylindrical enclosure: Parameters influencing natural convection onset / M. Azad, D. Dineshan, D. Groulx, A. Donaldson // *Proc. of the 4th Intern. Forum on Heat Transfer.* Sendai, Japan, 2–4 Nov. 2016.
75. **Jin Y., Wan Q., Ding Y.** PCMs heat transfer performance enhancement with expanded graphite and its thermal stability // *Procedia Eng.* 2015. V. 102. P. 1877–1884.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.326>
76. **Fan L.W., Khodadadi J.M.** Thermal conductivity enhancement of phase change materials for thermal energy storage: A review // *Renewable Sustainable Energy Rev.* 2011. V. 15. Is. 1. P. 24–46.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.08.007>
77. **Heat transfer characteristics** of phase change nanocomposite materials for thermal energy storage application / T.X. Li, J.-H. Lee, R.Z. Wang, Y.T. Kang // *Int. J. Heat Mass Transfer.* 2014. V. 75. P. 1–11.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.03.054>
78. **Heat transfer enhancement** for PCM thermal energy storage in triplex tube heat exchanger / A. Al-Abidi, S. Mat, K. Sopian, Y. Sulaiman, A. Mohammad // *Heat Transfer. Eng.* 2016. V. 37. Is. 7–8. P. 705–712.
<https://doi.org/10.1080/01457632.2015.1067090>
79. **Auriemma M., Iazzetta A.** Heat transfer and storage of sodium nitrate with alumina nanoparticles – numerical analysis // *Int. J. Eng. Res. Appl.* 2019. V. 9. Is. 1. P. 48–53.
80. **Barthwal M., Dhar A., Power S.** Effect of nanomaterial inclusion in phase change materials for improving the thermal performance of heat storage: A review // *ACS Appl. Energy Mater.* 2021. V. 4. Is. 8. P. 7462–7480.
<https://doi.org/10.1021/acsaem.1c01268>
81. **Григорьев И.С., Дедов А.В., Елецкий А.В.** Фазоизменяемые материалы и энергетика // *Теплоэнергетика.* 2021. № 4. С. 3–17. <https://doi.org/10.1134/S0040363621040020>
82. **Mehling H., Cabeza L.F.** Heat and cold storage with PCM: An up-to-date introduction into basics and applications. Berlin; Heidelberg: Springer, 2008.
<https://doi.org/10.1007/978-3-540-68557-9>
83. **Mettawee E.S., Assassa G.M.R.** Thermal conductivity enhancement in a latent heat storage system // *Sol. Energy.* 2007. V. 81. Is. 7. P. 839–845.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.11.009>

84. **Review** on phase change materials (PCMs) for cold thermal energy storage applications / E. Oró, A. de Garcia, A. Castell, M.M. Farid, L.F. Cabeza // *Appl. Energy*. 2012. V. 99. P. 513–533.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.03.058>
85. **Prevention** of subcooling and stabilization of inorganic salt hydrates as latent heat storage materials / H.W. Ryu, S.W. Woo, B.C. Shin, S.D. Kim // *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*. 1992. V. 27. Is. 2. P. 161–172.
[https://doi.org/10.1016/0927-0248\(92\)90117-8](https://doi.org/10.1016/0927-0248(92)90117-8)
86. **Asimakopoulou E.K., Kolaitis D.I., Founti M.A.** Fire safety aspects of PCM-enhanced gypsum plasterboards: An experimental and numerical investigation // *Fire Safety J*. 2015. V. 72. P. 50–58.
<https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2015.02.004>
87. **Review** of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings energy efficiency / N. Soares, J.J. Costa, A.R. Gaspar, P. Santos // *Energy Build*. 2013. V. 59. P. 82–103.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.12.042>
88. **Energy-storing** wallboard: Flammability tests / D. Banu, D. Feldman, F. Haghighat, J. Paris, D. Hawes // *J. Mater. Civ. Eng*. 1998. V. 10. No. 2. P. 98–105.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(1998\)10:2\(98\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(1998)10:2(98))
89. **Flammability**, and thermal properties of high-density polyethylene/paraffin hybrid as a form-stable phase change material / Y. Cai, Y. Hu, L. Song, Y. Tang, R. Yang, Y. Zhang, Z. Chen, W. Fan // *J. Appl. Polym. Sci*. 2006. V. 99. Is. 4. P. 1320–1327.
<https://doi.org/10.1002/app.22065>
90. **Perspectives** on thermal energy storage research / L.F. Cabeza, A. de Gracia, G. Zsembinszki, E. Borri // *Energy*. 2021. V. 231. P. 120943.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120943>
91. **Lone M.I., Jilte R.** A review on phase change materials for different applications // *Mater. Today: Proc*. 2021. V. 46. Part 20. P. 10980–10986.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.050>
92. **A review** on phase change materials for thermal energy storage in buildings: Heating and hybrid applications / K. Faraj, M. Khaled, J. Faraj, F. Hachem, C. Castelain // *J. Energy Storage*. 2021. V. 33. P. 101913.
<https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101913>

Phase Change Materials for Applications in Building Thermal Energy Storage (Review)

Md Ahsan Habib^{a, *} and Muhammad Mustafizur Rahman^{a, **}

^a *Wichita State University, Wichita, Kansas, 67260 USA*

^{*}*e-mail: mxhabib1@shockers.wichita.edu*

^{**}*e-mail: muhammad.rahman@us.af.mil*

Abstract—A unique substance or material that releases or absorbs enough energy during a phase shift is known as a phase change material (PCM). Usually, one of the first two fundamental states of matter – solid or liquid – will change into the other. Phase change materials for thermal energy storage (TES) have excellent capability for providing thermal comfort in building's occupant by decreasing heating and cooling energy demands. Because of its latent heat property, a PCM has a high energy density. The building uses PCMs mainly for space heating or cooling, control of building material temperature and increase in building durability, solar water heating, and waste heat recovery from high heat loss locations. Phase change materials for thermal energy storage has been proven to be useful for reducing peak electricity demand or increasing energy efficiency in heating, ventilation, and air-conditioning systems. The primary grid benefit of PCM based thermal energy storage system is load shifting and shedding, which is accomplished by recharging the storage system during off-peak times and substituting heating, ventilation, and air-conditioning system operation during peak times. This study examines PCM based thermal energy storage systems in building applications and benefits, focusing on their substantial limitations, and closes with recommendations for further improvement of design for use.

Keywords: thermal energy storage, phase change material, thermal comfort, heating, cooling, paraffin, salt hydrate, energy efficiency, benefits and improvements of design