DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-5-18-29 **Тараненко Д.В.** Сибирский федеральный университет E-mail: dmitrij taranenko@mail.ru

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СТЕН ЗА СЧЁТ ВКЛЮЧЕНИЯ В ИХ КОНСТРУКЦИЮ МАТЕРИАЛОВ С ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ ФАЗОВЫМ СОСТОЯНИЕМ

Аннотация. Материалы с изменяющимся фазовым состоянием (МИФС) представляют большой интерес ввиду их существенных преимуществ в повышении энергоэффективности, поддержании теплового комфорта в зданиях и содействии сокращению загрязнения окружающей среды. Исследования энергосберегающей способности строительных конструкций с МИФС выполнены в основном зарубежными авторами и рассматривают здания, расположенные в теплом климате.

В работе представлены результаты численного исследования наружных стен с МИФС в соответствии с требованиями отечественных норм по тепловой защите, для континентального климата г. Красноярска. Предварительно проведена верификация численной реализации алгоритма расчета, который учитывает наличие у МИФС несовпадение температур плавления и кристаллизации (термического гистерезиса). Явление термического гистерезиса во многих исследованиях не учитывается. Между тем, применение упрощенных алгоритмов, которые не включают гистерезис, может привести к существенным неточностям. В связи с этим, в расчетах исследования учтен эффект гистерезиса. Предложена методика по выбору МИФС для использования их в наружных ограждающих конструкциях. Конструкция стены с выбранным МИФС привела к уменьшению расхода тепловой энергии на 13,7 % относительно исходной конструкции в дни отопительного периода, и на 8,5 % – относительно исходной конструкции при одинаковой толщине конструкций. Сделан вывод о перспективности использования нескольких слоев МИФС с различными друг от друга температурами фазового перехода.

Ключевые слова: материалы с изменяющимся фазовым состоянием, фазовый переход, энергосбережение, энергопотребление, гистерезис, аккумулирование тепловой энергии, энергоэффективность.

Введение. За последнее десятилетие проведено множество исследований, направленных на повышение энергоэффективности ограждающих конструкций зданий за счет использования в конструкциях материалов с изменяющимся фазовым состоянием. Данные материалы, обладая возможностью осуществления фазовых переходов 1-го рода, характеризуются постоянством температур во время изменения энтальпии (теплота кристаллизации или плавления). Процессы плавления и кристаллизации материала сопровождаются затуханием амплитуды температурной волны при прохождении сквозь материал, а при размещении МИФС в теплозащитной оболочке здания способствуют снижению затрат на поддержание комфортной температуры помещения.

В настоящее время разработаны различные способы включения материала, имеющего жидкую фазу, в состав строительных конструкций. Из них: заключение материала в оболочку (в зависимости от размеров оболочки различают микро- и макрокапсуляцию); получение материала стабилизированной формы [1] путем объединения МИФС и вспомогательного материала [2]; пропитка пор строительных материалов [3]. В дальнейшем материал стабилизированной формы, в том числе микракапсулированный материал, может быть добавлен в строительные растворы [4] или использован как самостоятельное изделие (например, в виде стеновых панелей [5]).

Большинство исследований с интеграцией МИФС в конструкции зданий выполнены зарубежными авторами и проведены в условиях теплого климата [6, 7, 8].

Существуют исследования отечественных авторов, выполненных с учетом климатических условий различных регионов Российской Федерации. Так, в [9] представлен анализ влияния фазовых переходов на тепловой баланс здания в Москве, Санкт-Петербурге и Сочи. Авторами сделан вывод об актуальности разработки МИФС с теплофизическими характеристиками, отвечающими различным регионам страны с учетом соответствующих сезонных температур окружающего воздуха. В эксперименте [10], проведенном в г. Якутске, показана практическая возможность и эффективность использования фазового перехода воды для отопления закрытых помещений до высоких отрицательных температур, что уместно для складских помещений и стояночных гаражей. В [11] рассмотрена концепция наружной ограждающей стены с использованием теплоаккумулирующей вставки, за счет использования которой можно варьировать время промерзания стены в случае отключения системы отопления в условиях Крайнего Севера. В [12] реализован выбор материала для накопления тепловой энергии с использованием метода анализа иерархий.

Однако большинство численных исследований и коммерчески доступных расчетных программ используют упрощенных алгоритмы, не учитывающие наличие термического гистерезиса у большинства МИФС [13, с. 182, 14]. Термический (тепловой) гистерезис характеризуется несовпадением температур плавления и кристаллизации, а также термодинамических характеристик материала (энтальпии, плотности) при нагреве и охлаждении [15]. Для большого числа непарафиновых органических и неорганических МИФС применение упрощенных алгоритмов, которые не включают гистерезис, может приводить к существенным неточностям [13, с. 182, 14, 16, 17].

Цель исследования – оценить эффект экономии тепловой энергии от использования материала с изменяющимся фазовым состоянием в качестве добавочного слоя к наружной стене, которая

$$C_{eff}(T) = \begin{cases} C_{S}, \\ \frac{L}{T_L - T_S} + \frac{C_{S+}C_L}{2}, \\ C_L, \end{cases}$$

где Cs – удельная теплоемкость твердой фазы, Дж/кг/К; C_L – удельная теплоемкость жидкой фазы, Дж/кг/К; L – удельная теплота фазового перехода (кристаллизации или плавления), Дж/кг; Т – температура, К; T_s – температура завершения кристаллизации или температура начала плавления, К; T₁ – температура завершения плавления или температура начала кристаллизации, К.

Для расчета фазовых переходов с термическим гистерезисом, МИФС рассмотрен как смесь твердой и жидкой фазы. Алгоритм моделирования гистерезиса представлен в работе [14].

Для жидкой фазы конвективный перенос теплоты не учитывается, поэтому уравнение теплопроводности любой фазы:

$$C_{eff} \cdot \rho \, \frac{\partial T}{\partial t} = div(\lambda \cdot gradT) + f$$
 (2)

где ρ – плотность среды, кг/м³; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/м/К; gradT – градиент температуры, К/м; f – мощность внутренних источников теплоты, Вт/м³.

Численное моделирование выполнено в программе COMSOL Multiphysics в одномерном пространстве. На наружной и внутренней поверхностях конструкций заданы граничные условия третьего рода. Температура наружного воздуха принята по данным метеостанции, температура внутреннего воздуха постоянна и составляет соответствует нормативным требованиям к тепловой защите, применительно к процессу отопления жилых зданий, расположенных в климате г. Красноярска, с учетом теплового гистерезиса МИФС.

Для выполнения цели исследования поставлены следующие последовательно решаемые задачи:

 определить начало и продолжительность временного периода, при котором использования МИФС представляется наиболее рациональным;

2) определить температуру фазового перехода МИФС и его положение в ограждающей конструкции;

3) оценить максимальную экономию тепловой энергии в конструкции стены с МИФС относительно контрольной стены.

Материалы и методы. В основе методов моделирования теплообмена при плавлении и кристаллизации лежит задача Стефана [18]. Для численного решения этой задачи использован метод эффективной теплоемкости, который подразумевает замещение теплоемкости МИФС эффективной теплоемкости Сеff, Дж/кг/К [16]:

$$T < T_s,$$

$$T_s \le T \le T_l$$
(1)

$$T > T_l$$

+21°С в соответствии с ГОСТ 30494-2011. Коэффициенты теплоотдачи согласно нормативной литературе: 12 Вт/(м²°С) для наружной поверхности и 8,7 Вт/(м²°С) для внутренней. В качестве начального температурного распределения принят результат предварительного расчета, выполненного с указанными выше граничными условиями.

Верификация расчетной модели. В рамках верификации, модельный материал (вода) помещен в пластиковую форму в виде полого шара. Датчики температуры размещены в центре формы, на поверхности формы и на удалении от нее, для фиксирования температуры окружающей среды. Осуществлен полный цикл кристаллизации-плавления материала при контролируемой внешней температуре (рисунок 1).

Показана хорошая сходимость расчетной и экспериментальной температур в центре формы. Ошибка расчета от начала до времени завершения цикла плавления-кристаллизации определена по формуле [19]:

ошибка =
$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} |T_i - T_i^*|$$
 (3)

где n – число временных шагов для сравнения, (шаг 60 с.); T_i – температура расчетная на i-ом временном шаге, °C; T_i^* – температура экспериментальная на i-ом временном шаге, °C.

Ошибка составила 1,21°С, что является допустимым.

Наибольшее расхождение между фактическими и расчетными температурами наблюдается во втором часу опыта, когда происходит переохлаждение жидкости. В расчетах эффект переохлаждения не учитывается как оказываемый малое влияние на величину теплового потока, при постоянном изменении температур наружного воздуха. Кроме того, исследуемые в работе марки МИФС имеют органическое происхождение, для которых в целом данный эффект отсутствует или менее выражен [20].





Основная часть. Выбор температур наружного воздуха для промежуточных расчетов. На рисунке 2 представлен график частотного распределения среднесуточных температур наружного воздуха за отопительный период для г. Красноярска.



Максимальную частоту повторения имеют температуры от 0 °C включительно до 1 °C. Таким образом, большее количество фазовых превращений (или большая их продолжительность) возможны на периоде времени с наибольшим числом переходов через температуры 0 °C – 1 °C.

Для определения подобного периода времени, отопительный период разделен на некоторые элементарные части (декады) таким образом, чтобы на одну из частей приходилось наибольшее возможное число переходов через 0 °C.

Наибольшим числом переходов обладает декада с 28 сентября по 7 октября 2022г (показана на рисунке 3).

2025, №5



Рис. 3. График температур с переходами через 0°С

Укрупнение указанного периода за счет объединения с соседними декадами неизбежно приводит к уменьшению среднего количества переходов через 0°С, поэтому в дальнейших расчетах для задания граничных условий на наружной поверхности стены выбраны температуры воздуха только данной декады.

Определение марки МИФС и положения в конструкции. На рисунке 4 показана исходная конструкция стены, сопротивление теплопередачи которой соответствует требуемому сопротивление теплопередачи, определенному согласно СП 50.13330.2024 «Тепловая защита зданий» для конструкций, эксплуатируемых в г. Красноярске.



1 - Утеплитель Isover Вентфасад Верх;

- 2 Утеплитель Isover Вентфасад Оптима;
- 3 Кирпич керамический полнотелый;
- 4 Цементно-песчаный раствор.

Рис. 4. Схема стены с утеплением минеральной ватой в два слоя

Многие коммерческие марки МИФС (номенклатура которых дана в [6]) плавятся и кристаллизуются в некотором температурном диапазоне ΔT (ΔT melt и ΔT freeze соответственно), величина которого для этих двух процессов может отличаться. Если принять, что Т₁ – температура, при которой полностью завершается плавление,

а Т2-температура, при которой полностью завершается кристаллизация, то разность между ними ΔT_{1-2} у МИФС с осуществлением фазового перехода в диапазоне температур превышает 5°С-10°С, что в температурных условиях отапливаемого помещения приводит к снижению возможности осуществления полных фазовых переходов, в случае размещения МИФС ближе к внутренней поверхности стены. Исходя из этого, задача выбора и расположения МИФС в стене требует определения амплитуды температурных волн, проходящих стену. Максимальные и минимальные температуры исходной конструкции за выбранную декаду показаны на рисунке 5.



Рис. 5. Температуры в исходной конструкции стены

На рисунке 5 видно, что температурный диапазон ΔT , которым должен обладать МИФС для выполнения полного фазового перехода (в связи с чем диапазон ΔT не должен превышать разницу между максимальной и минимальной температурами), уменьшается по мере удаления от наружной поверхности стены. Графики рисунка могут быть использованы для определения положения слоя МИФС в стене, после выбора марки МИФС с определенными ΔT melt и ΔT freeze. Так как распределение температур, показанное на рисунке 5, получено для конструкции стены без материала с фазовым переходом, после первоначального выбора марки и положения МИФС необходимо произвести уточнение.

При указанной выше разнице ΔT_{1-2} более 5°С, расстояние от внешней границы до слоя МИФС не должно превышать 80 мм, где ΔT =5,4°С.

Для первого приближения принят МИФС марки savE® OM03 от компании PLUSS Advanced Technologies (МИФС1). По данным, предоставленным производителем, более 90% от общего количества тепла, обусловленное кристаллизацией, МИФС1 выделяет при температурах от 0,5°C до 3,5°C (Δ Tfreeze=3,0°C), и более 90% от общего количества тепла, обусловленное плавлением – поглощает при температурах от 1,5°C до 8,5°C (Δ Tmelt=7,0°C). Таким образом,

 ΔT_{1-2} =8°С (T₁=8,5°С и T₂=0,5°С), и данный материал следует расположить на расстоянии 20 мм от наружной поверхности, т.е. вместе с минимальным отклонением температур T₁ и T₂ от температур рисунка 5. Отклонение температур T_{PCM} (при T_{max} > T₁ > T₂ > T_{min}) определено по формуле:

$$T_{PCM} = \frac{(T_{max} - T_1) + (T_2 - T_{min})}{2}$$
(4)

где T_{max} и T_{min} – максимальная и минимальная температура соответственно.

В качестве второго приближения (уточнения) выполнено изменение положения МИФС1 с шагом 10 см (что эквивалентно шагу 0,286 м^{2.}°С/Вт) и изменение температуры плавления Tmelt и температуры кристаллизации Tfreeze на одинаковое значение с шагом 1°С. Данные температуры являются равноудаленными от границ ΔTmelt и ΔTfreeze соответственно:

$$T_{melt} = T_1 - \frac{\Delta Tmelt}{2}$$
(5)

$$T_{freeze} = T_2 + \frac{\Delta T freeze}{2}$$
(6)

Для МИ Φ C1 Tmelt = 5 °C и Tfreeze = 2°C.

Результаты второго приближения показаны на рисунке 6. Из технологических соображений (удобства изготовления и монтажа) исходная (минимальная) толщина слоя МИФС – 10 мм.









Как показано на рисунке 6, минимальное количество тепловой энергии через ограждающую конструкцию наблюдается при размещении материала с изменяющимся фазовым состоянием на расстоянии 50 мм от наружной поверхности (1,512 м^{2.}°C/Вт), при увеличении температур фазового перехода на 5°С (до Tmelt=10,0 °С и Tfreeze=7,0 °С). В дальнейшем материал с увеличенными температурами фазового перехода обозначен как МИФС2. Теплофизические характеристики обоих материалов представлены в таблице 1.

На рисунке 7 видно, что при одинаковой начальной температуре слоев МИФС в обоих конструкциях (время до начала выбранной декады, показано областью серого цвета) МИФС1 не достигает начала кристаллизации (Tfreeze + Δ Tfreeze/2 = 3,5 °C). В то же время МИФС2 кристаллизуется в течение большей части расчета (температура начала кристаллизации составляет 8,5 °C), с чем и связано снижение величины расхода энергии (с 0,97 кВт·ч/м² до 0,88 кВт·ч/м²) при использовании МИФС2. Относительно конструкции исходной стены применение МИФС2 сократило расход тепловой энергии на (1,02-0,88)/1,02·100=13,7 %.

Таким образом, наименьшее количество энергии на отопление за выбранную декаду получено при применении МИФС2 с размещением материала ближе к наружной поверхности стены (на расстоянии 50 мм от наружной поверхности). Известно, что на величину расхода тепловой энергии влияет теплопроводность материалов ограждающей конструкции. В таблицу 1 сведены теплофизические характеристики марок материалов с изменяющимся фазовым состоянием, соответствующие МИФС2 по показателю ΔT_{1-2} . Для снижения годовой величины расхода тепловой энергии, следует применять МИФС с меньшим коэффициентом теплопроводности.

Меньшим относительно МИФС2 коэффициентом теплопроводности, усредненным по двум фазам, обладает savE® ОМ08 (МИФС3, средний коэффициент теплопроводности 0,1765 Вт/м/°С). При этом теплопроводность твердой фазы МИФС2 ниже.

Далее проведено сравнение этих материалов.

Оценка экономии тепловой энергии от использования МИФС. Выполнен поочередный расчет исходной стены с МИФС2 и МИФС3 в пределах выбранной декады с варьированием толщины слоя материала с изменяющимся фазовым состоянием при его постоянном положении в стене, на расстоянии 50 мм от наружной поверхности. Вычислено максимальное снижение расхода тепловой энергии от использования в составе конструкции стены в качестве добавочного слоя материала с фазовым переходом путем сравнения количества энергии, проходящее через стены с МИФС и исходной стены, при условии одинаковой толщины конструкций, в связи с чем толщина минеральной ваты исходной стены, не

Результаты показаны на рисунке 8.



Рис. 7. Температуры в стене при фазовом переходе

Таблица 1

Характеристики материалов с изменяющимся фазовым состоянием

Марка МИФС	Теплота, кДж/кг		Теплопроводность фазы, Вт/м/°С		Теплоемкость фазы, кДж/кг/°С		Плотность фазы, кг/м ³	
	кристал-	плав- пения	жидкой К1	твердой К s	жидкой С1	твердой Сs	жид- кой	твер- лой
	Lfreeze	Lmelt	111	115	CI	05	ρl	ρs
RUBITHERM® RT5HC	240	241	0,2	0,2	2	2	760	850
savE® OM08 (МИФС3)	150	154	0,118	0,235	2.11	1.71	1020	1190
CrodaTherm [™] 9.5	186	186	0,15	0,24	2.1	2.2	858	963
RUBITHERM® RT10HC	185	182	0,2	0,2	2	2	770	850
RUBITHERM® RT11HC	183	181	0,2	0,2	2	2	770	880
savE®OM03(МИФС1), МИФС2	228	196	0,146	0,224	1,91	1,76	835	912

Для выбранной декады оптимальным остается применение МИФС2 с увеличенной до 15 мм толщиной слоя (рисунок 9) – величина расхода тепловой энергии составила 0,85 кВт·ч/м² за 10 суток, что на 8,5% ниже, чем для исходной конструкции без МИФС, с увеличенной до 145 мм толщиной минеральной ваты.

При сравнении стены, схема которой изображена на рисунке 9, со стеной без МИФС и минеральной ватой толщиной 145 мм (исходная кон-

струкция с увеличенной на 15 мм толщиной утеплителя), абсолютное значение тепловых потоков через стену с МИФС на большей части расчетного времени больше (рисунок 10), что объясняется гораздо большим коэффициентом теплопроводности материала с изменяющимся фазовым состоянием. Это особенно заметно в отопительный период, когда происходит увеличение разницы температур помещения и наружного воздуха.



Рис. 8. Зависимости расхода энергии на отопление от толщины слоя утеплителя и МИФС





Рис. 10. Тепловые потоки за год

При этом на некоторых участках расчетного времени тепловые потоки, направленные из помещения наружу, через стену с МИФС меньше. Дольше всего данный эффект непрерывно сохраняется с 27 сентября по 7 октября, что соответствует декаде с наибольшим числом переходов через 0 °C. Также с начала апреля по середину мая и с конца сентября до начала ноября в конструкции с МИФС наблюдается уменьшение амплитуды колебаний теплового потока на внутренней поверхности стены.

Выводы.

1. Выполнена верификация численного расчета фазовых переходов с учетом теплового гистерезиса. Все представленные в статье расчеты получены с использованием верифицированной модели.

2. Предложена методика выбора МИФС на основе частотного распределения температур за отопительный период. Установлено, что для города Красноярска наибольшей вероятностью повторения за отопительный период обладают температуры от 0 °С включительно до 1 °С.

3. Использование МИФС2 за 10 суток отопительного периода при толщине слоя 10 мм в качестве добавочного слоя снижает расход тепловой энергии относительно исходной конструкции на 13,7 %.

При увеличении толщины слоя МИФС2 до 15 мм наблюдается максимум уменьшения расхода тепловой энергии, по сравнению со стеной без МИФС, при условии одинаковой толщины конструкций (разница 8,5 %).

4. Использование материала с изменяющимся фазовым состоянием привело к уменьшению амплитуды колебаний теплового потока на внутренней поверхности стены общей продолжительностью 2,5 месяцев. Длительное снижение теплового потока за счет осуществления фазового перехода наблюдается только в определенный период времени, который соответствует максимальному числу переходов температуры наружного воздуха через 0 °С. В остальных случаях тепловой поток через конструкцию с МИФС, как правило, больше, т.к. теплопроводность выбранного МИФС выше теплопроводности минеральной ваты (в 5,3 раза). Таким образом, следует проводить дополнительные исследования, направленные на увеличение количества слоев МИФС, обладающих разными температурами фазового перехода.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Mehling H, Cabeza L.F. Heat and cold storage with PCM: An up to date introduction into basics and applications. Springer Science+Business Media. Luxembourg, 2008. 308 p. DOI: 10.1007/978-3-540-68557-9.

2. Liu K., Yuan Z.F., Zhao H.X., Shi C.H., Zhao F. Properties and applications of shape-stabilized phase change energy storage materials based on porous material support – A review // Materials Today Sustainability. 2023. No. 8 (21). 100336. DOI: 10.1016/j.mtsust.2023.100336.

3. Lopez-Arias M., Francioso V., Velay-Lizancos M. High thermal inertia mortars: New method to incorporate phase change materials (PCMs) while enhancing strength and thermal design models Building // Construction and 2023. 370. 130621. Materials. Vol. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130621.

4. Min H.-W., Kim S., Kim H. S. Investigation on thermal and mechanical characteristics of concrete mixed with shape stabilized phase change material for mix design // Construction and Building Materials. 2017. Vol. 149. Pp. 749–762. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.176.

5. Kuznik F., Virgone J. Experimental assessment of a phase change material for wall building use // Applied Energy. 2009. Vol. 86. No. 10. Pp. 2038–2046. DOI: 10.1016/j.apenergy.2009.01.004.

6. Назиров Р.А., Тараненко Д.В., Веде П.Ю. Применение материалов с изменяющимся фазовым состоянием в ограждающих конструкциях // Строительство и реконструкция. 2019. № 2. С. 90–105. DOI: 10.33979/2073-7416-2019-82-2-90-105.

7. Cui Y., Xie J., Liu J., Wang J., Chen S. A review on phase change material application in building // Advances in Mechanical Engineering. 2017. No. 9 (6). Pp. 1–15. DOI: 10.1177/1687814017700828.

8. Faraj K., Khaled M., Faraj J., Hachem F., Castelain C. A review on phase change materials for thermal energy storage in buildings: Heating and hybrid applications // Journal of Energy Storage. 2021. Vol. 33, 101913. DOI: 10.1016/j.est.2020.101913.

9. Федюхин А.В., Афанасьева О.В., Зайцев М.Д. Анализ перспектив применения материалов с фазовым переходом в строительных конструкциях // Вестник МГСУ. 2023. № 12 (18). С. 1977–1988. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.12.1977-1988.

10. Кузьмин Г.П., Куваев В.А. Результаты испытания устройства для управления температурным режимом помещений теплотой фазового перехода воды // Успехи современного естествознания. 2022. № 8. С. 127–132.

11. Герасимова Е.А., Карауш С.А., Герасимова О.О. Стеновая панель здания с теплоаккумулирующей вставкой для эксплуатации в суровой климатической зоне // Construction

and Geotechnics. 2022. № 2 (13). C. 44–54. DOI: 10.15593/2224-9826/2022.2.04.

12. Амер А.Э., Рахмани К., Лебедев В.А. Выбор материалов с фазовым переходом с использованием метода анализа иерархий (МАИ) // Международный научно-исследовательский журнал. 2020. № 6 (96). Ч. 1. С. 35–48. DOI: 10.23670/IRJ.2020.96.6.006.

13. Kosny J. PCM-Enhanced Building Components: An Application of Phase Change Materials in Building Envelopes and Internal Structures. Springer. Cham, 2015. 271 p. DOI: 10.1007/978-3-319-14286-9.

14. Biswas K., Shukla Y., Desjarlais A., Rawal R. Thermal characterization of full-scale PCM products and numerical simulations, including hysteresis, to evaluate energy impacts in an envelope application // Applied Thermal Engineering. 2018. Vol. 138. Pp. 501–512. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.04.090.

15. Мажукин В.И., Королева О.Н., Шапранов А.В., Алексашкина А.А., Демин М.М. Молекулярно-динамическое моделирование термического гистерезиса золота // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2021. № 81. С. 1–11. DOI: 10.20948/prepr-2021-81.

16. Lu D., Xu X., Zhang X., Xie W., Gao Y. Study on Influencing Factors of Phase Transition

Hysteresis in the Phase Change Energy Storage // Materials. 2022. No. 15 (8). 2775. DOI: 10.3390/ma15082775.

17. Barz T., Buruzs A., Andreas Sommer. Major and minor hysteresis loops in the enthalpy-temperature and phase fraction-temperature diagrams of solid/liquid phase change materials // International Journal of Engineering Science. 2023. Vol. 191. 103913. DOI: 10.1016/j.ijengsci.2023.103913.

18. Бараненко А.В., Кузнецова П.А., Захарова В.Ю., Цой А.П. Применение веществ с фазовыми переходами для аккумулирования тепловой энергии // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. № 6 (18). С. 990–1000. DOI: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-990-1000.

19. Mauder, T. Robustness analysis of various approaches to modeling of the phase change front propagation // ASME 2017 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. 2017. Pp. 1–9. DOI: 10.1115/IMECE2017-71372.

20. Lorina D., Mahanwar P.A. A review on organic phase change materials and their applications // International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology. 2021. No. 5 (9). Pp. 268–284. DOI: 10.33564/IJEAST.2021.v05i09.045.

Информация об авторе

Тараненко Дмитрий Васильевич, аспирант кафедры проектирования зданий и экспертизы недвижимости. Еmail: dmitrij_taranenko@mail.ru. Сибирский федеральный университет. Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, д. 79.

Поступила 06.01.2025 г. © Тараненко Д.В., 2025

Taranenko D.V.

Siberian Federal University E-mail: dmitrij_taranenko@mail.ru

INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY OF WALLS BY INCLUDING PHASE CHANGE MATERIALS IN THEIR STRUCTURE

Abstract. Phase changing materials (PCMs) are of great interest due to their significant advantages in increasing energy efficiency, maintaining thermal comfort in buildings, and helping to reduce environmental pollution. Research into the energy-saving capacity of building structures with PCMs has been carried out mainly by foreign authors and considers buildings located in warm climates.

This paper presents the results of a numerical study of external walls with PCM in accordance with the requirements of domestic standards for thermal protection for the continental climate of Krasnoyarsk. Preliminary verification of the numerical implementation of the calculation algorithm was carried out, which takes into account the presence of a mismatch between the melting and crystallization temperatures of PCM (thermal hysteresis). The phenomenon of thermal hysteresis is not taken into account in many studies. Meanwhile, the use of simplified algorithms that do not include hysteresis can lead to significant inaccuracies. In this regard, the hysteresis effect was taken into account in the study calculations. A method for selecting PCM for use in external enclosing structures is proposed. The wall structure with the selected PCM resulted in a decrease in thermal energy by 13.7% relative to the original structure during the heating period, and by 8.5% relative to

the original structure with the same thickness of the structures. A conclusion is made about the prospects of using several PCM layers with different phase transition temperatures.

Keywords: phase change materials, phase transition, energy saving, energy consumption, hysteresis, thermal energy storage, energy efficiency.

REFERENCES

1. Mehling H, Cabeza L.F. Heat and cold storage with PCM: An up to date introduction into basics and applications. Springer Science+Business Media. Luxembourg, 2008. 308 p. DOI: 10.1007/978-3-540-68557-9

2. Liu K., Yuan Z.F., Zhao H.X., Shi C.H., Zhao F. Properties and applications of shape-stabilized phase change energy storage materials based on porous material support – A review. Materials Today Sustainability. 2023. No. 8 (21). 100336. DOI: 10.1016/j.mtsust.2023.100336.

3. Lopez-Arias M., Francioso V., Velay-Lizancos M. High thermal inertia mortars: New method to incorporate phase change materials (PCMs) while enhancing strength and thermal design models. Construction and Building Materials. 2023. Vol. 370, 130621. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130621.

4. Min H.-W., Kim S., Kim H. S. Investigation on thermal and mechanical characteristics of concrete mixed with shape stabilized phase change material for mix design. Construction and Building Materials. 2017. Vol. 149. Pp. 749–762. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.176.

5. Kuznik F., Virgone J. Experimental assessment of a phase change material for wall building use. Applied Energy. 2009. Vol. 86. No. 10. Pp. 2038–2046. DOI: 10.1016/j.apenergy.2009.01.004.

6. Nazirov R.A., Taranenko D.V., Vede P.Yu. The use of materials with a changing phase state in building envelope structures [Primenenie materialov s izmenyayushchimsya fazovym sostoyaniem v ograzhdayushchih konstrukciyah]. Building and Reconstruction. 2019. No. 2. Pp. 90–105. DOI: 10.33979/2073-7416-2019-82-2-90-105. (rus)

7. Cui Y., Xie J., Liu J., Wang J., Chen S. A review on phase change material application in building. Advances in Mechanical Engineering. 2017. No. 9 (6). Pp. 1–15. DOI: 10.1177/1687814017700828.

8. Faraj K., Khaled M., Faraj J., Hachem F., Castelain C. A review on phase change materials for thermal energy storage in buildings: Heating and hybrid applications. Journal of Energy Storage. 2021. Vol. 33. 101913. DOI: 10.1016/j.est.2020.101913.

9. Fedyukhin A.V., Afanaseva O.V., Zaitsev M.D. Analysis of the prospects of phase change materials in building structures [Analiz perspektiv primeneniya materialov s fazovym perekhodom v stroitel'nyh konstrukciyah]. Vestnik MGSU. 2023. No. 18 (12). Pp. 1977–1988. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.12.1977-1988. (rus)

10. Kuzmin G.P., Kuvaev V.A. Test results of a device for controlling the temperature regime of premises by the heat of the phase transition of water [Rezul'taty ispytaniya ustrojstva dlya upravleniya temperaturnym rezhimom pomeshchenij teplotoj fazovogo perekhoda vody]. Advances in current natural sciences. 2022. No. 8. Pp. 127–132. DOI: 10.15593/2224-9826/2022.2.04. (rus)

11. Gerasimova E.A., Karaush S.A., Gerasimova O.O. Building wall panel with heat storage insert for use in harsh climatic zones [Stenovaya panel' zdaniya s teploakkumuliruyushchej vstavkoj dlya ekspluatacii v surovoj klimaticheskoj zone]. Construction and Geotechnics. 2022. Vol. 13. No. 2. Pp. 44– 54. DOI: 10.15593/2224-9826/2022.2.04. (rus)

12. Amer A.E., Raxmani K., Lebedev V.A. Selection of Materials with Phase Transition Using the Hierarchy Analysis Method (Ham) [Vybor materialov s fazovym perekhodom s ispol'zovaniem metoda analiza ierarhij (MAI)]. International Research Journal. No. 6 (96). 2020. DOI: 10.23670/IRJ.2020.96.6.006. (rus)

13. Kosny J. PCM-Enhanced Building Components: An Application of Phase Change Materials in Building Envelopes and Internal Structures. Springer. Cham, 2015. 271 p. DOI: 10.1007/978-3-319-14286-9.

14. Biswas K., Shukla Y., Desjarlais A., Rawal R. Thermal characterization of full-scale PCM products and numerical simulations, including hysteresis, to evaluate energy impacts in an envelope application. Applied Thermal Engineering. 2018. Vol. 138. Pp. 501–512. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.04.090.

15. Mazhukin V.I., Koroleva O.N., Shapranov A.V., Aleksashkina A.A., Demin M.M. Molecular dynamic modeling of thermal hysteresis of gold [Molekulyarno-dinamicheskoe modelirovanie termicheskogo gisterezisa zolota]. Keldysh Institute PREPRINTS. 2021. No. 81. Pp. 1–11. DOI: 10.20948/prepr-2021-81. (rus)

16. Lu D., Xu X., Zhang X., Xie W., Gao Y. Study on Influencing Factors of Phase Transition Hysteresis in the Phase Change Energy Storage. Materials. 2022. No. 15 (8). 2775. DOI: 10.3390/ma15082775.

17. Barz T., Buruzs A., Andreas Sommer. Major and minor hysteresis loops in the enthalpy-temperature and phase fraction-temperature diagrams of solid/liquid phase change materials. International Journal of Engineering Science. 2023. Vol. 191. 103913. DOI: 10.1016/j.ijengsci.2023.103913. 18. Baranenko A.V., Kuznetsov P.A., Zakharova V.Yu., Tsoy A.P. Application of substances with phase transitions for thermal energy accumulation [Primenenie veshchestv s fazovymi perekhodami dlya akkumulirovaniya teplovoj energii]. Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics. 2018. 6 (18). Pp. 990–1000. DOI: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-990-1000. (rus)

19. Mauder, T. Robustness analysis of various approaches to modeling of the phase change front propagation. ASME 2017 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. 2017. Pp 1–9. DOI: 10.1115/IMECE2017-71372.

20. Lorina D., Mahanwar P.A. A review on organic phase change materials and their applications. International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology. 2021. No. 5 (9). Pp. 268–284. DOI: 10.33564/IJEAST.2021.v05i09.045.

Information about the author

Taranenko, Dmitry V. Postgraduate student. E-mail: dmitrij_taranenko@mail.ru. Siberian Federal University. Russia, 660041, Krasnoyarsk, Svobodny pr., 79.

Received 06.01.2025

Для цитирования:

Тараненко Д.В. Повышение энергоэффективности стен за счёт включения в их конструкцию материалов с изменяющимся фазовым состоянием // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 5. С. 18–29. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-5-18-29

For citation:

Taranenko D.V. Increasing the energy efficiency of walls by including phase change materials in their structure. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 5. Pp. 18–29. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-5-18-29