

УДК 536.42:536.248.2

## **Повышение теплоинерционности стен зданий при применении фазоизменяемых материалов\***

**М.И. Низовцев, А.Н. Стерлягов**

*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*

E-mail: nizovtsev@itp.nsc.ru

Выполнено численное исследование влияния тонкого слоя фазоизменяемого материала (ФИМ) на тепловые характеристики наружной стены здания из легкого теплоизоляционного материала. Проведен анализ изменения температуры и плотности теплового потока при различных расположениях слоя ФИМ в стене. Показано, что применение в стене из вспененного полиуретана толщиной 100 мм тонкого слоя из парафина толщиной 4 мм позволяет снизить амплитуду колебаний теплового потока на внутренней поверхности стены в летнее время от 2 до 13 раз в зависимости от места расположения ФИМ. Наибольшее снижение получено при установке ФИМ в центральной области стены. Расчеты показали, что при применении ФИМ в стенах зданий из легких теплоизоляционных материалов наблюдается положительный эффект в летнее время, связанный с задержкой максимального значения теплового потока, поступающего в помещение, относительно максимального суточного значения температуры наружного воздуха на 6–8 ч.

**Ключевые слова:** фазоизменяемый материал, теплоинерционность, теплопроводность, тепловой поток, наружная стена здания.

### **Введение**

В разных технических приложениях возникают тепловые задачи, связанные с необходимостью как аккумулирования и последующего выделения тепловой энергии, так и предотвращения перегрева различных элементов оборудования при пиковых нагрузках. Для решения подобных технических задач все шире начинают применяться фазоизменяемые материалы (ФИМ). Такие материалы позволяют при фазовых переходах в достаточно узком температурном диапазоне поглотить значительное количество тепла при повышении температуры и выделить его при охлаждении [1]. Как правило, на практике используют фазовый переход жидкость – твердое тело, хотя скрытая теплота при фазовом переходе жидкость – газ может на порядок превосходить фазовый переход жидкость – твердое тело. Однако ФИМ на переходе жидкость – газ не получили широкого распространения из-за большого объемного расширения при фазовых превращениях.

---

\* Расчетные исследования проведены при поддержке мегагранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (договор № 075-15-2021-575). Экспериментальная верификация расчетной модели выполнена по государственному контракту с ИТ СО РАН (121031800217-8).

Обычно ФИМ классифицируют по типу материала на три группы: органические, неорганические и эвтектические [2]. Органические, в свою очередь, подразделяются на парафины и не-парафины, к которым относятся жирные кислоты, спирты, сложные эфиры, гликоли. Они стабильны, имеют высокую теплоту фазового перехода ( $> 180$  кДж/кг), доступны в широком температурном диапазоне  $15–45$  °С. В качестве недостатка можно отметить низкие коэффициенты теплопроводности ( $0,1–0,35$  Вт/(м·К)). Жирные кислоты имеют свойства, близкие к парафинам, но они циклически более стабильны, чем парафины. Жирные кислоты позволяют получать температуру плавления в диапазоне  $20–30$  °С с точностью  $0,5$  °С. Среди неорганических ФИМ типичными представителями являются гидратированные соли и металлические материалы. Они имеют широкий диапазон фазовых переходов от  $5$  до  $130$  °С и теплоту фазовых переходов более  $220$  кДж/кг. Гидратированные соли — наиболее старый по применению вид ФИМ, но они имеют недостатки: нестабильность свойств при термоциклировании и высокая коррозия с другими материалами. Металлические ФИМ имеют сравнительно высокие коэффициенты теплопроводности — около  $15$  Вт/(м·К), к ним относятся биметаллические сплавы GaLn, GaSn. Эвтектические смеси — смеси из органических и неорганических составляющих, такие смеси плавятся как единое целое.

Наиболее часто отдают предпочтение органическим ФИМ из-за более длительного срока службы, структурной стабильности и конгруэнтного плавления [3]. Однако органические ФИМ имеют низкие коэффициенты теплопроводности, что приводит к длительным временам протекания в них тепловых процессов [4]. С целью повышения теплопроводности используют металлические ребра, углеродные волокна, графитовые включения [5, 6]. В последнее время внимание исследователей обращено на применение их в качестве аддитивов с высокой теплопроводностью — графеновых нанотрубок [7].

Удобно вводить ФИМ в состав различных материалов в микрокапсулированной форме. В этом случае каждая микрокапсула покрыта специальной оболочкой, предотвращающей протечку ФИМ в жидком состоянии. Размеры микрокапсул могут варьироваться от  $0,05$  до  $5000$  мкм [8]. В работе [9] проведен обзор использования ФИМ в макро-капсулированной форме. Ряд исследований выполнен при введении ФИМ в формостабилизированные материалы, которые благодаря своей структуре удерживают ФИМ в жидком состоянии [10,11].

Фазоизменяемые материалы нашли применение в батарейных системах гибридных и электрических автомобилей для снижения пиковых тепловых нагрузок [12], повышения эффективности работы солнечных батарей [13], изготовления суспензий с микрокапсулированными материалами [14], предотвращения перегрева электронных приборов [15].

Активно начинают применяться ФИМ при строительстве и реконструкции зданий [16]. Строительный сектор потребляет  $20–40$  % всей вырабатываемой энергии, основная доля приходится на развитые страны [17, 18], и около  $50$  % этой энергии расходуется на отопление, вентиляцию и кондиционирование воздуха [19]. Повышение термальной массы здания рассматривается как одна из мер снижения энергозатрат на отопление, кондиционирование и повышение его энергоэффективности [20]. Термальную массу здания можно повысить либо путем увеличения массы ограждающих конструкций, либо за счет использования ФИМ [21]. Применение ФИМ представляет собой уникальную альтернативу для повышения термальной массы здания, что улучшает тепловой комфорт без значительного увеличения массы конструктивных элементов [22]. Использование ФИМ в ограждающих конструкциях зданий относят к пассивным методам повышения

их энергоэффективности наряду с утеплением и применением естественной и ночной вентиляции [23].

Были выполнены исследования, в которых рассматривалось влияние климатических особенностей применения ФИМ в разных городах при изменении климата от умеренного до жаркого [24, 25]. Авторы работы [26] пришли к выводу, что использование ФИМ более эффективно в климате с большими суточными перепадами температур по сравнению с тропическим климатом с меньшим перепадом температур. В ряде работ отмечается, что ФИМ более эффективен при включении в легкие конструкции (например, в изолированные деревянные стены), чем в конструкции с большой массой (такие как здания из бетонных блоков) [27, 28]. Легкие здания подвержены резким колебаниям температуры воздуха внутренних помещений в сезоны отопления и кондиционирования из-за недостаточной тепловой массы, что приводит к большому потреблению энергии для обеспечения комфортной температуры. Применение ФИМ рассматривается в качестве эффективного решения для контроля теплового состояния в легких зданиях [19].

Авторы [29] численно и экспериментально исследовали влияние ФИМ, помещенных в теплоизоляционный слой стены здания. Проанализировано влияние ФИМ в стене здания на температуру и тепловой поток при изменении параметров наружного воздуха. Расположение ФИМ в центре стены снизило теплотребление на 15 %. Временная задержка максимального значения теплового потока на внутренней поверхности стены от температуры наружного воздуха составила 2 ч.

Ряд исследований связан с разработкой и апробацией теплоизоляционных материалов с ФИМ. В работе [26] изучались тепловые характеристики теплоизоляционного слоя, в котором доля ФИМ составляет 30 вес. %. Отмечено, что тепловая изоляция с ФИМ может снизить тепловую нагрузку на 25–30 % и сдвинуть максимум нагрузки на систему кондиционирования на 3 ч в летнее время.

Основное направление применения ФИМ в ограждающих конструкциях зданий связано со снижением летнего перегрева помещений. Однако имеется ряд работ, в которых рассматривается использование одновременно нескольких ФИМ с разными температурами фазовых переходов для регулирования температуры не только в летний период, но и в переходные и зимний периоды [30]. Авторы [31] протестировали применение двух ФИМ в фасаде с разными температурами фазовых переходов. Один слой ФИМ с температурой плавления 27 °C располагался ближе к наружной поверхности для работы в летний сезон, а другой ФИМ с температурой плавления 23 °C — ближе к внутренней поверхности для зимнего сезона.

В работе [32] исследовалось влияние ориентации и температуры фазового перехода ФИМ в легких стенах зданий. Проведено исследование применения в панелях толщиной от 6 до 20 мм капсулированного ФИМ для повышения теплоинерционности зданий в летнее время в различных регионах Европы [33]. Использовалось интенсивное проветривание офисных зданий в ночное время для перевода ФИМ в твердое состояние. Сделан вывод об эффективности использования ФИМ для зданий Центральной Европы.

Важное место при использовании ФИМ в ограждающих конструкциях легких зданий уделяется определению оптимального месторасположения ФИМ в конструкции наружной стены. Авторы работы [34] использовали численные расчеты методом конечных разностей для оптимизации параметров стены здания, содержащей ФИМ с целлюлозой, и отметили, что эффективность была выше, когда ФИМ располагался ближе к внутренней поверхности стены. Однако было обнаружено, что этот вариант очень

чувствителен к изменению температуры в помещении, поэтому было рекомендовано равномерное распределение ФИМ.

В работах [35, 36] были экспериментально исследованы тепловые характеристики стен со слоем ФИМ, который помещали в полиэтиленовые пакеты. В результате было получено, что оптимальное положение ФИМ находилось на расстоянии  $0,2L$  от внутренней поверхности стены (где  $L$  — толщина стены), что приводило к снижению максимального теплового потока на внутренней поверхности стены на 41 %.

В других исследованиях [37, 38] показано, что на оптимальное расположение ФИМ влияют его тепловые свойства, а также внешние условия. Получено, что оптимальное расположение ФИМ в стене смещалось к внешней поверхности, когда толщина ФИМ, теплота плавления и температура плавления ФИМ увеличивались, а в случае роста внутренней температуры оптимальное расположение ФИМ смещалось к внутренней поверхности.

Выполненный обзор работ по исследованию применения ФИМ в ограждающих конструкциях легких зданий показал, что фазоизменяемые материалы позволяют повысить теплоинерционность зданий и снизить затраты на отопление и кондиционирование воздуха. Но несмотря на уже выполненные исследования, ряд вопросов требует дополнительного изучения и рассмотрения. Так, в разных работах получены противоречивые данные по оптимальному месторасположению ФИМ в легких стеновых конструкциях, что связано, с одной стороны, с многими факторами, которые оказывают влияние на оптимальное расположение ФИМ, а с другой — с тем, что большинство исследований проведено в реальных условиях при различном характере изменения наружных и внутренних параметров воздушной среды. Кроме того, не исследовано влияние ширины температурной зоны фазового перехода ФИМ и режимов изменения температуры наружного и внутреннего воздуха на эффективность применения ФИМ. На все эти вопросы обращено внимание при выполнении численных расчетов в настоящей работе.

1. Постановка задачи и условия расчета

Расчеты проведены для здания, у которого наружная стена толщиной 100 мм выполнена из легкого теплоизоляционного материала с тонкой прослойкой ФИМ. В качестве теплоизоляционного материала стены использовался вспененный полиуретан плотностью  $35 \text{ кг/м}^3$ , а в качестве ФИМ — парафин с различными температурами фазовых переходов. Основные характеристики материалов наружной стены, используемые в расчетах, взяты из [39] и приведены в таблице.

Рассматривался летний период времени. Температура наружного воздуха  $T_n$ , при ее среднем значении  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ , совершала суточные колебания с амплитудой  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_n = 25 + \sin(2\pi t/\tau) \text{ }^\circ\text{C}$ , где  $t$  — время,  $\tau$  — суточный период времени. В помещении рассматривался режим кондиционирования с постоянной температурой воздуха ( $T_b = 21 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Коэффициенты теплообмена на внутренней и наружной поверхности стены принимались постоянными: на внутренней  $\alpha_b = 8,7 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ , на наружной  $\alpha_n = 23 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$  согласно [40].

Таблица

Основные характеристики материалов

Материал	Плотность, $\text{кг/м}^3$	Теплоемкость, $\text{Дж/(кг}\cdot\text{К)}$	Теплопроводность, $\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$	Теплота фазового перехода, $\text{Дж/кг}$
Вспененный полиуретан	35	1400	0,035	—
Парафин	920	2190	0,268	179000

Толщина слоя ФИМ в основной серии расчетов составляла 4 % от общей толщины стены и равна 4 мм. Слой ФИМ при расчетах располагался в различных зонах стены с целью определения оптимального его расположения.

## 2. Модель расчета

Для определения оптимального расположения ФИМ решалось нестационарное уравнение теплопроводности:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla q = 0, \quad (1)$$

$$q = -k \nabla T, \quad (2)$$

где  $\rho$  — плотность,  $C$  — приведенная теплоемкость,  $k$  — коэффициент теплопроводности.

С учетом фазовых превращений

$$C = C_p + L \frac{da_m}{dT}, \quad (3)$$

где  $C_p$  — теплоемкость, кДж/кг,  $L$  — теплота фазовых переходов, кДж/кг,  $a_m$  — функция фазовых переходов. Функция фазовых переходов в расчетах принималась в виде сглаженной функции Хэвисайда:

$$a_m = 0 \text{ при } x \leq -0,5,$$

$$a_m = 0,5 + 0,9375(2x) - 0,625(2x)^3 + 0,1875(2x)^5 \text{ при } -0,5 \leq x \leq 0,5,$$

$$a_m = 1 \text{ при } x \geq 0,5,$$

$$x = \frac{T - T_\phi}{\Delta T_\phi}, \text{ где } T_\phi \text{ — температура фазового перехода, } \Delta T_\phi \text{ — температурная ширина}$$

фазового перехода.

Зависимость функции фазового перехода и ее производной по температуре от температуры приведена на рис. 1. Функция фазового перехода в виде сглаженной функции Хэвисайда с максимумом при температуре фазового перехода и нулевым значением вне температурного диапазона фазовых переходов хорошо согласуется с видом ДСК-кривых, полученных при исследовании фазовых переходов парафинов на сканирующем калориметре [7].

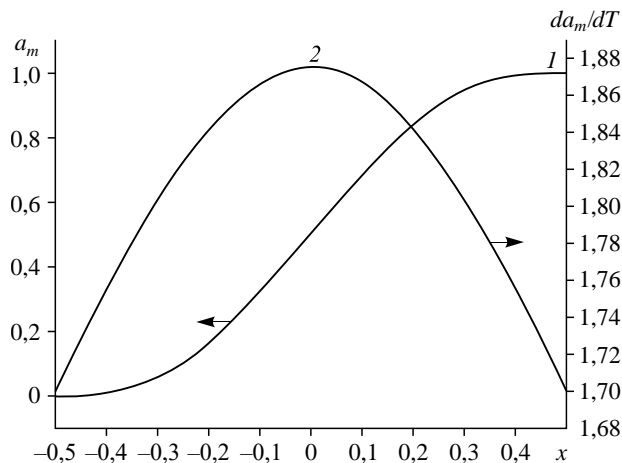


Рис. 1. Зависимость функции фазового перехода (1) и ее производной по температуре (2) от температуры.

### 3. Численные расчеты и тестирование расчетной модели

Расчеты были выполнены с использованием компьютерного кода Comsol Multihysics 6.1. Задача решалась в одномерной постановке. Максимальный размер сетки при расчете был выбран 1 мм со сгущением к границам ФИМ. При уменьшении максимального размера сетки до 0,1 мм изменение максимального теплового потока на внутренней поверхности составляло менее 0,01 %.

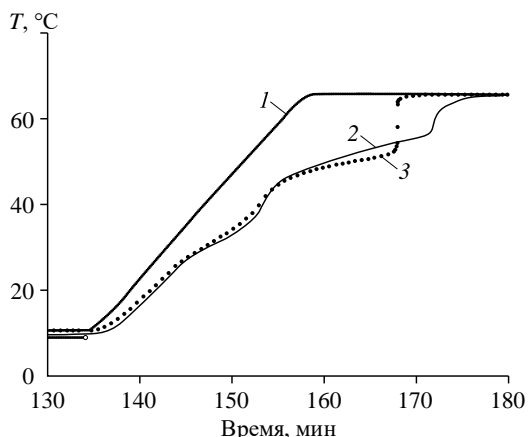
Нестационарное уравнение теплопроводности решалось численным методом конечных элементов с применением обратного дифференцирования для временного шага. В расчетах обеспечивался по крайней мере один временной шаг в каждом временном интервале в 0,1 ч. Полное расчетное время выбиралось 288 ч, чтобы исключить влияние начальных условий. При расчете различных физических параметров относительный допуск устанавливался 0,01 для контроля численной ошибки. При запуске программы использовался более короткий временной шаг, равный 1 % от первого шага, а затем длина шага постепенно увеличивалась, пока не достигала 0,1 ч.

Для тестирования расчетной модели был проведен специальный эксперимент [7], который заключался в следующем. Парафин марки П2 в пробирке помещали в термостат с водой. Воду в термостате нагревали от 10 до 70 °С (точки 1 на рис. 2). В центре пробирки с парафином термопарой измерялась температура в процессе нагрева (точки 3 на рис. 2). Линией 2 на рисунке показаны результаты расчета изменения температуры парафина в центре пробирки. Результаты расчета достаточно хорошо согласовались с экспериментальными измерениями. Некоторое расхождение расчета и эксперимента наблюдалось, когда парафин становился жидким и температура в нем изменялась быстрее, чем в расчете, что, по-видимому, связано со свободноконвективным перемешиванием жидкого парафина в пробирке, которое в расчетах не учитывалось.

Ранее подобная модель расчета с использованием компьютерного кода Comsol Multihysics для расчета тепловых процессов в ФИМ проходила тестирование в [41] на экспериментальных данных [42]. В результате получено, что среднеквадратичное отклонение расчетных данных от экспериментальных не превышало 1 °С.

### 4. Результаты расчетов и обсуждение

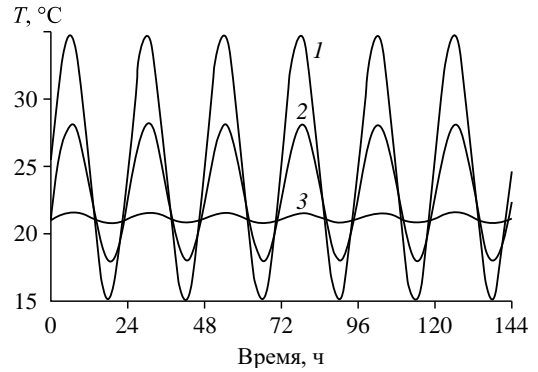
В качестве базового варианта для последующего сравнения был выполнен расчет изменения тепловых параметров в стеновой конструкции из пенополиуретана толщиной



100 мм. На рис. 3 приведено изменение температуры с течением времени в различных сечениях по толщине стены. Согласно результатам расчета, во всех сечениях наблюдались суточные синусоидальные колебания температуры, диапазон которых уменьшался от 20 °С на наружной поверхности

Рис. 2. Изменение температуры воды в термостате (эксперимент) (1) и парафина (2, 3 — расчет и эксперимент соответственно).

Рис. 3. Изменение температуры на наружной поверхности (1), в центре (2) и на внутренней поверхности (3) (без ФИМ).



до  $0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$  на внутренней. При этом плотность теплового потока на внутренней поверхности изменялась по гармоническому синусоидальному закону с суточным периодом (рис. 4). В дневное время тепловой поток был направлен в помещение и максимальное значение плотности теплового потока было больше  $4\text{ Вт/м}^2$ , а в ночное время направление теплового потока менялось на противоположное с максимальным значением около  $2\text{ Вт/м}^2$ . Сдвиг по времени между максимальными значениями наружной температуры воздуха и тепловым потоком на внутренней поверхности стены был незначительным, так как конструкция является малоинерционной, и составлял  $0,7\text{ ч}$ .

Аналогичный тепловой расчет был проведен при замене 4 об.% пенополиуретана в центральной зоне стены на ФИМ. Средняя температура фазового перехода ФИМ была принята  $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что соответствовало средней температуре в центре стены без ФИМ, а температурный диапазон фазовых переходов ФИМ равен  $\Delta T_{\text{ф}} = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Согласно результатам расчета, амплитуда колебаний плотности теплового потока на внутренней поверхности стены с ФИМ снизилась в 13 раз по сравнению с ранее рассмотренным базовым вариантом расчета стены без ФИМ (рис. 5).

Была выполнена серия расчетов при расположении ФИМ в центральной зоне стены при сужении температурного диапазона фазовых переходов ФИМ до  $1,0$  и  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . С уменьшением ширины диапазона фазовых переходов наблюдалось дальнейшее снижение амплитуды колебаний теплового потока на внутренней поверхности стены (рис. 6).

Это было связано с увеличением амплитуды колебаний доли жидкой фазы ФИМ с уменьшением ширины температурного диапазона фазовых превращений ФИМ (рис. 7).

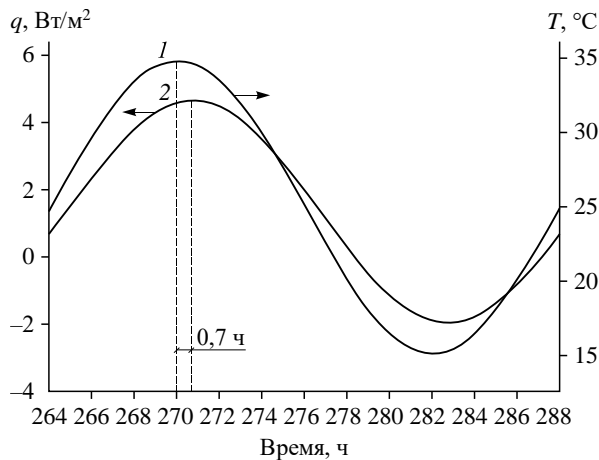


Рис. 4. Изменение температуры наружного воздуха (1) и плотности теплового потока на внутренней поверхности (2) (без ФИМ).

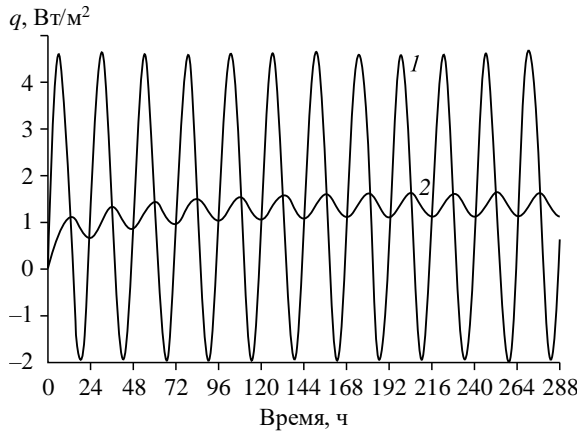


Рис. 5. Плотность теплового потока на внутренней поверхности без ФИМ (1), с ФИМ в центре (2).

В результате расчета получено, что временной сдвиг между максимальными значениями наружной температуры воздуха и максимальным значением плотности теплового потока на внутренней поверхности стены при расположении в ее центральной зоне ФИМ составил 6,2 ч при  $\Delta T_{\phi} = 5^{\circ}\text{C}$  (рис. 8).

Такой значительный временной сдвиг позволяет сместить время максимальных тепlopоступлений с дневного времени на вечернее, когда пик энергопотребления на летнее кондиционирование уже пройден. При сужении температурного диапазона фазовых переходов и расположении ФИМ в центральной зоне стены временной сдвиг между максимальными значениями наружной температуры воздуха и максимальным значением плотности теплового потока на внутренней поверхности стены еще более увеличивался и составил 8 ч при  $\Delta T_{\phi} = 0,5^{\circ}\text{C}$ .

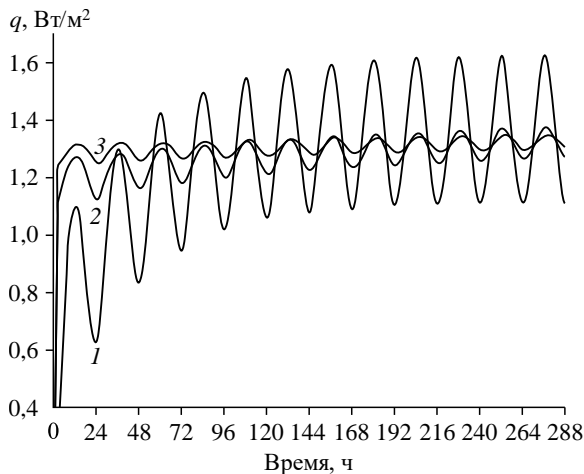


Рис. 6. Плотность теплового потока на внутренней поверхности (ФИМ в центре).  $\Delta T_{\phi} = 5^{\circ}\text{C}$  (1),  $1^{\circ}\text{C}$  (2),  $0,5^{\circ}\text{C}$  (3).



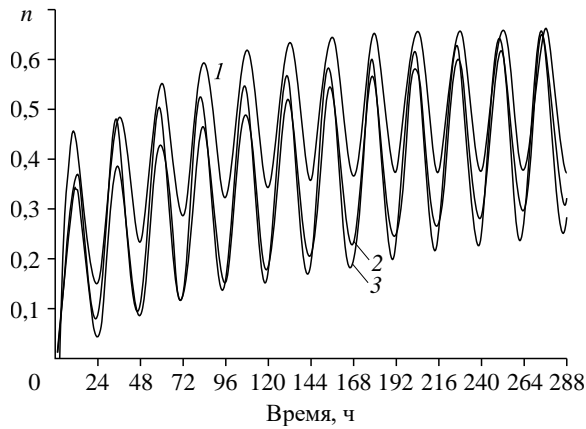


Рис. 7. Изменение доли жидкой фазы  $n$  (ФИМ в центре).  
 $\Delta T_{\text{ф}} = 5^{\circ}\text{C}$  (1),  $1^{\circ}\text{C}$  (2),  $0,5^{\circ}\text{C}$  (3).

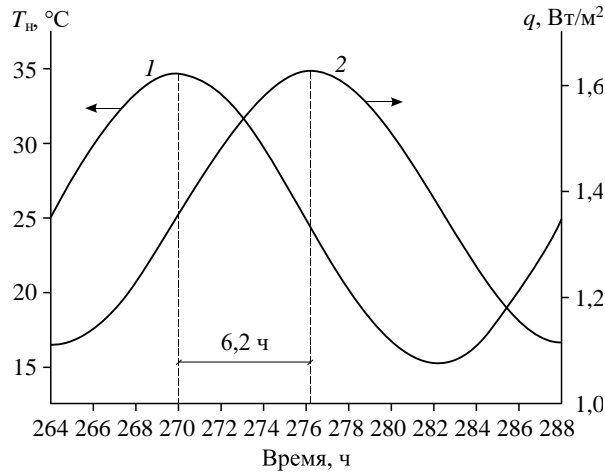


Рис. 8. Изменение температуры наружного воздуха  $T_{\text{в}}$  (1) и плотности теплового потока на внутренней поверхности (ФИМ в центре) (2) при  $\Delta T_{\text{ф}} = 5^{\circ}\text{C}$ .

Был выполнен расчет при расположении слоя ФИМ 4 об.% на внутренней поверхности стены, при этом за среднюю температуру фазового перехода принималась средняя температура на внутренней поверхности при отсутствии ФИМ. Для такого варианта, как и в случае расположения ФИМ в центре стены, наблюдалось снижение плотности теплового потока на внутренней поверхности при наличии ФИМ, причем более сильное по мере сужения температурного диапазона фазовых переходов ФИМ (рис. 9). Однако амплитуда колебаний плотности теплового потока на внутренней поверхности стены при расположении в этой зоне ФИМ была значительно выше, чем при расположении ФИМ в центре. Такая закономерность наблюдалась при различной ширине температурного диапазона фазовых переходов. В качестве примера на рис. 10 показано сравнение при  $\Delta T_{\text{ф}} = 5^{\circ}\text{C}$ . При расположении ФИМ в зоне внутренней поверхности также наблюдался временной сдвиг между максимальными значениями наружной температуры воздуха

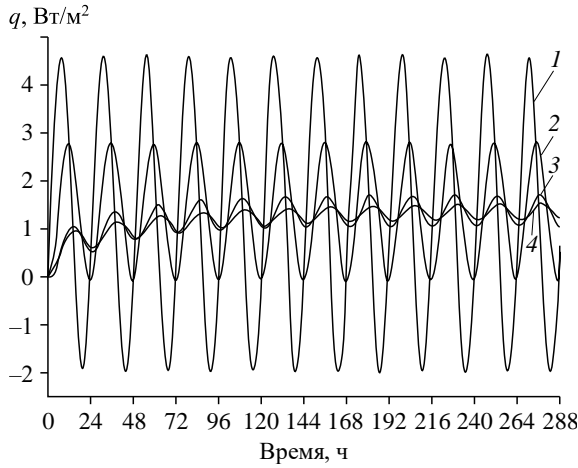


Рис. 9. Плотность теплового потока на внутренней поверхности без ФИМ (1), с ФИМ на внутренней поверхности при  $\Delta T_{\text{ф}} = 5$  (2), 1 (3), 0,5 (4) °C.

и максимальным значением плотности теплового потока на внутренней поверхности стены, хотя и меньший, чем при расположении ФИМ в центре.

Далее были проведены расчеты изменения плотности теплового потока при других положениях ФИМ. Для определения оптимального расположения ФИМ удобно воспользоваться зависимостью от расположения ФИМ коэффициента снижения амплитуды колебаний плотности теплового потока на внутренней поверхности стены  $k = A_q^1 / A_q^2$ , где  $A_q^1$  и  $A_q^2$  — соответственно амплитуды плотности теплового потока без ФИМ и с ФИМ. Зависимость коэффициента  $k$  от относительного расположения центра слоя ФИМ  $l/d$ , где  $l$  — расстояние от наружной поверхности,  $d$  — общая толщина стены с ФИМ (в нашем случае  $d = 100$  мм), при  $\Delta T_{\text{ф}} = 0,5$  °C приведена на рис. 11. Согласно результатам расчетов, наибольшее снижение амплитуды колебаний теплового потока на внутренней поверхности стены  $k = 13$  получено в центральной зоне. При удалении зоны расположения ФИМ от центра к наружной или внутренней поверхности стены происходило снижение эффективности использования ФИМ.

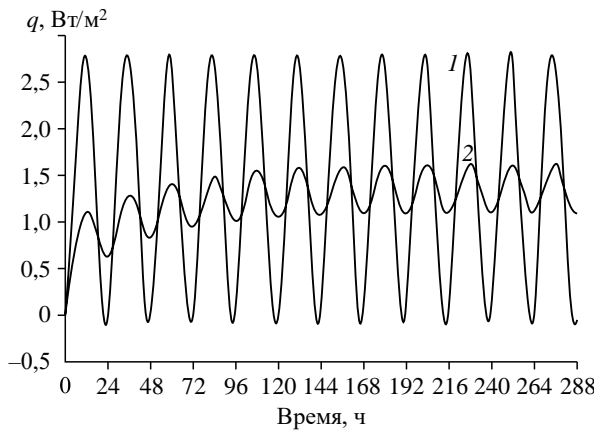


Рис. 10. Плотность теплового потока на внутренней поверхности при  $\Delta T_{\text{ф}} = 5$  °C. ФИМ на внутренней поверхности (1), ФИМ в центре (2).

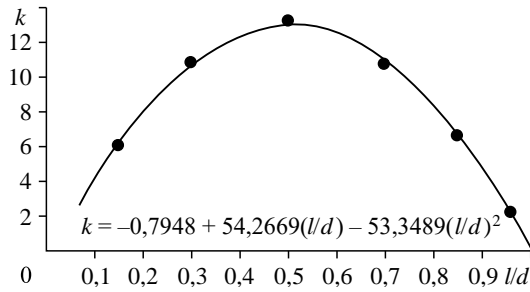


Рис. 11. Определение оптимального расположения ФИМ при  $\Delta T_{\phi} = 5^{\circ}\text{C}$ .

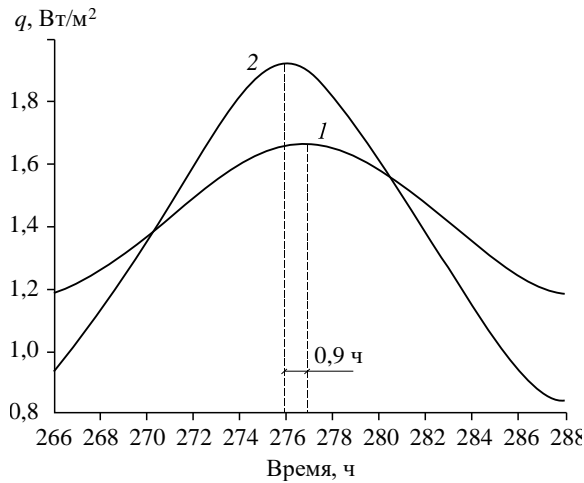


Рис. 12. Снижение диапазона колебаний плотности теплового потока на внутренней поверхности при увеличении содержания ФИМ ( $\Delta T_{\phi} = 5^{\circ}\text{C}$ ).  
4 об. % (1), 8 об. % (ФИМ в центре) (2).

Дальнейшее снижение амплитуды колебаний плотности теплового потока на внутренней поверхности стены из легкого теплоизоляционного материала можно получить при увеличении объемной доли ФИМ. В качестве примера на рис. 12 приведены результаты расчета снижения амплитуды колебаний плотности теплового потока в 1,9 раза с увеличением объемной доли ФИМ в центральной зоне с 4 до 8 об.% при  $\Delta T_{\phi} = 5^{\circ}\text{C}$ .

### Заключение

Выполненные расчетные исследования показали, что небольшое объемное содержание фазоизменяемого материала позволяет существенно повысить теплоинерционные свойства стен из легких теплоизоляционных материалов и снизить расход энергии в летнее время на кондиционирование.

В результате расчетов получено, что применение в стене из вспененного полиуретана толщиной 100 мм слоя парафина 4 % по объему позволяет снизить амплитуду колебаний теплового потока на внутренней поверхности стены в летнее время от 2 до 13 раз в зависимости от места расположения ФИМ. Наибольшее снижение получено при установке ФИМ в центральной области слоя пенополиуретана.

Расчеты показали, что эффективность снижения суточных колебаний теплового потока на внутренней поверхности стены можно повысить при сужении температурного диапазона фазовых переходов ФИМ относительно среднего значения изменения температуры в области установки ФИМ, а также при увеличении объемного содержания ФИМ.

При применении ФИМ в стенах зданий из легких теплоизоляционных материалов наблюдается положительный эффект в летнее время, связанный с задержкой максимального значения теплового потока, поступающего в помещение, относительно максимального суточного значения температуры наружного воздуха на 6–8 ч.

### Список литературы

1. Zhang Y., Zhou G., Lin K., Zhang Q., Di H. Application of latent heat thermal energy storage in buildings: State-of-the-art and outlook // *Building and Environ.* 2007. Vol. 42, No. 6. P. 2197–2209.
2. Wang Q., Jiang B., Li B., Yan Y. A critical review of thermal management models and solutions of lithium-ion batteries for the development of pure electric vehicles // *Renewable and Sustainable Energy Rev.* 2016. Vol. 64. P. 106–128.
3. Bruno F., Belusko M., Liu M., Tay N.H.S. Using solid-liquid phase change materials (PCMs) // *Advances in Thermal Energy Storage Systems*: L. Cabeza (Ed.), N.Y.: Woodhead Publ., 2015. P. 201–246.
4. Zalba B., Mari'n J.M., Cabeza L.F., Mehling H. Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications // *Appl. Therm. Engng.* 2003. Vol. 23. P. 251–283.
5. Liu C., Rao Z., Zhao J., Huo Y., Li Y. Review on nanoencapsulated phase change materials: preparation, characterization and heat transfer enhancement // *Nano Energy.* 2015. Vol. 13. P. 814–826.
6. Nurten S., Fois M., Paksoy H. Improving thermal conductivity phase change materials—a study of paraffin nanomagnetite composites // *Solar Energy Mater. and Sol. Cells.* 2015. Vol. 137. P. 61–67.
7. Низовцев М.И., Летушко В.Н., Стерлягов А.Н. Повышение теплопроводности фазоизменяемого материала графеновыми нанотрубками // *Докл. АН ВШ РФ.* 2022. № 4 (57). С. 50–65.
8. Konuklu Y., Ostry M., Paksoy H.O., Charvat P. Review on using microencapsulated phase change materials (PCM) in building applications // *Energy and Buildings.* 2015. Vol. 106. P. 134–155.
9. Rathore P.K.S., Shukla S.K. Potential of macroencapsulated PCM for thermal energy storage in buildings: A comprehensive review // *Construction and Building Mater.* 2019. Vol. 225. P. 723–744.
10. Низовцев М.И., Бородулин В.Ю., Летушко В.Н., Терехов В.И., Полубояров В.А., Бердникова Л.К. Распространение тепла в фазоизменяемом материале при постоянном тепловом потоке // *Теплофизика и аэромеханика.* 2019. Т. 26, № 3. С. 337–350.
11. Zhu N.A.Li., Hu P., Wei S., Deng R., Lei F. A review on applications of shapestabilized phase change materials embedded in building enclosure in recent ten years // *Sustainable Cities and Society.* 2018. Vol. 43. P. 251–264.
12. Jagueмонт J., Omar N., Bossche P. Van den, Mierlo J. Phase-change materials (PCM) for automotive applications: A review // *Appl. Therm. Engng.* 2018. Vol. 132. P. 308–320.
13. Karthikeyan S., Ravikumar S.G., Kumaresan V., Velraj R. Parametric studies on packed bed storage unit filled with PCM encapsulated spherical containers for low temperature solar air heating applications // *Energy Convers. and Managem.* 2014. Vol. 78. P. 74–80.
14. Jurkowska M., Szczygie I. Review on properties of microencapsulated phase change materials slurries // *Appl. Therm. Engng.* 2016. Vol. 98. P. 365–373.
15. Arshad A., Ali H.M., Yan W.-M., Hussein A.K., Ahmadlouydarab M. An experimental study of enhanced heat sinks for thermal management using n-eicosane as phase change material // *Appl. Therm. Engng.* 2018. Vol. 132. P. 52–66.
16. Souayfane F., Fardoun F., Biwole P.H. Phase change materials (PCM) for cooling applications in buildings: a review // *Energy and Buildings.* 2016. Vol. 129. P. 396–431.
17. Heier J., Bale C., Martin V. Combining thermal energy storing with buildings — A review // *Renewable and Sustainable Energy Rev.* 2015. Vol. 42. P. 1305–1325.
18. Saffari M., Gracia A.D., Ushak S., Cabeza L.F. Economic impact of integrating PCM as passive system in buildings using Fanger comfort model // *Energy and Buildings.* 2016. Vol. 112. P. 159–172.
19. Marin P., Saffari M., Gracia A.D., Zhu X., Farid M.M., Cabeza L.F., Ushak S. Energy savings due to the use of PCM for relocatable lightweight buildings passive heating and cooling in different weather conditions // *Energy and Buildings.* 2016. Vol. 129. P. 274–283.
20. Figueiredo A., Figueira J., Vicente R., Maio R. Thermal comfort and energy performance: Sensitivity climate apply the passive house concept to the Portuguese climate // *Building and Environ.* 2016. Vol. 103. P. 276–288.

21. Guarino F., Athienitis A., Cellura M., Bastien D. PCM thermal storage design in building: Experimental studies and applications to solar in cold climates // Appl. Energy. 2017. Vol. 185. P. 95–106.
22. Evola G., Marletta L., Sicurella F. A methodology for investigating the effectiveness of PCM wallboard for summer thermal comfort in buildings // Building and Environ. 2013. Vol. 59. P. 517–527.
23. Arumugam P., Ramalingam V., Vellaichamy P. Effective PCM, insulation, natural and/or night ventilation techniques to enhance the thermal performance of buildings located in various climates — A review // Energy and Buildings. 2022. Vol. 258. P. 111840-1–111840-25.
24. Sharifi N.P., Sakulich A. Application of phase change materials to improve the thermal performance of cementitious material // Energy and Buildings. 2015. Vol. 103. P. 83–95.
25. Hoes P., Hensen J.L.M. The potential of lightweight low-energy houses with hybrid adaptable thermal storage: comparing the performance of promising concepts // Energy and Buildings. 2015. Vol. 110. P. 79–93.
26. Kosny J., Kossecka E., Brzezinski A., Tleoubaev A., Yarbrough D. Dynamic thermal performance analysis of fiber insulations containing bio-based phase change materials (PCMs) // Energy and Buildings. 2012. Vol. 52. P. 122–131.
27. Sun Y., Wang S., Xiao F., Gao D. Peak load shifting control using different cold thermal energy storage facilities in commercial buildings: a review // Energy Conversion and Managem. 2013. Vol. 71. P. 101–114.
28. Kalnæs S.E., Jelle B.P. Phase change materials and products for building applications: A state-of-the-art review and future research opportunities // Energy and Buildings. 2015. Vol. 94. P. 150–176.
29. Fateh A., Klinker F., Brütting M., Weinläder H., Devia F. Numerical and experimental investigation of an insulation layer with phase change materials (PCMs) // Energy and Buildings. 2017. Vol. 153. P. 231–240.
30. Berardi U., Soudian S. Experimental investigation of latent heat thermal energy storage using PCMs with different melting temperatures for building retrofit // Energy and Buildings. 2019. Vol. 185. P. 180–195.
31. Favoino F., Goia F., Perino M., Serra V. Experimental assessment of the energy performance of an advanced responsive multifunctional facade module // Energy and Buildings. 2014. Vol. 68. P. 647–659.
32. Fateh A., Borelli D., Devia F., Weinläder H. Summer thermal performances of PCM-integrated insulation layers for light-weight building walls: effect of orientation and melting point temperature // Thermal Sci. and Engng Progress. 2017. Vol. 6. P. 361–369.
33. Evola G., Marletta L. The effectiveness of PCM wallboards for the energy refurbishment of lightweight buildings // Energy Procedia. 2014. Vol. 62. P. 13 – 21.
34. Childs K., Stovall T. Potential energy savings due to phase change material in a building wall assembly: an examination of two climates // ORNL/TM-2012/6. Oak Ridge Nat. Lab. 2012. Vol. 2. P. 1038077-1–1038077-41.
35. Jin X., Medina M.A., Zhang X. On the importance of the location of PCMs in building walls for enhanced thermal performance // Applied Energy. 2013. Vol. 106. P. 72–78.
36. Jin X., Zhang S., Xu X., Zhang X. Effects of PCM state on its phase change performance and the thermal performance of building walls // Building and Environ. 2014. Vol. 81. P. 334–339.
37. Jin X., Medina M.A., Zhang X. Numerical analysis for the optimal location of a thin PCM layer in frame walls // Appl. Therm. Eng. 2016. Vol. 103. P. 1057–1063.
38. Jin X., Shi D., Medina M.A., Shi X., Zhou X., Zhang X. Optimal location of PCM layer in building walls under Nanjing (China) weather conditions // J. Therm. Anal. and Calorimetry. 2017. Vol. 129, No. 3. P. 1767–1778.
39. Borodulin V.Yu., Nizovtsev M.I. Heat-inertial properties of walls of lightweight thermal insulation with phase change materials // J. Phys.: Conf. Ser. 2018. Vol. 1105. P. 012108-1–012108-5.
40. СН 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. Актуализир. ред. СНиП 23-02-2003. М.: Минрегион России, 2012. 100 с.
41. Kishore R.A., Bianchi M.V., Booten C., Vidal J., Jackson R. Optimizing PCM-integrated walls for potential energy savings in U.S. Buildings // Energy and Buildings. 2020. Vol. 226. P. 110355-1–110355-14.
42. Biswas K., Abhari R. Low-cost phase change material as an energy storage medium in building envelopes: experimental and numerical analyses // Energy Conver. and Managem. 2014. Vol. 88. P. 1020–1031.

*Статья поступила в редакцию 7 июня 2023 г.,  
после доработки — 5 октября 2023 г.,  
принята к публикации 21 ноября 2023 г.*