

УДК 536.42:536.248.2

Распространение тепла в фазоизменяемом материале при постоянном тепловом потоке*

М.И. Низовцев¹, В.Ю. Бородулин¹, В.Н. Летушко¹, В.И. Терехов¹,
В.А. Полубояров², Л.К. Бердникова²

¹Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

²Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, Новосибирск

E-mail: borodulin@itp.nsc.ru

Разработан новый композитный фазоизменяемый материал на основе пористого диатомита, который методом иммерсии насыщен парафином. Приведены результаты исследования распространения в нем тепла при нагреве с одной из сторон источником постоянной мощности. На основе энтальпийной модели проведены численные расчеты, выполнено сравнение с результатами экспериментов и проанализировано влияние свойств композитного материала на тепловые процессы в нем. В расчетах варьировались значения мощности теплового потока, диапазон температур фазовых переходов, характеристики фазоизменяемого компонента. Анализ результатов расчетов показал, что применение фазоизменяемого компонента позволяет не только увеличивать теплоаккумулирующую способность композитного материала, но и управлять тепловыми потоками. Вследствие этого появляется возможность уменьшить пиковые значения теплового потока, проходящего через материал, а также ограничить на длительное время диапазон изменения температуры материала при нагреве.

Ключевые слова: композитный материал, фазоизменяемый компонент, теплоаккумулирующие свойства, тепловая инерция, энтальпийная модель, фазовый переход.

Введение

В мировой практике область применения фазоизменяемых материалов (ФИМ) постоянно расширяется [1]. Благодаря скрытой теплоте фазовых превращений эти материалы обладают высокой аккумулирующей способностью и используются в качестве альтернативы системам аккумулирования явного тепла [2].

Аккумулирующие системы с ФИМ позволяют значительно уменьшить габариты систем охлаждения зданий, а также снизить издержки энергопотребления, которые характерны, например, для водяных систем охлаждения [3]. Серьезные перспективы имеют регенеративные системы вентиляции с использованием теплоаккумулирующих свойств ФИМ [4]. Фазоизменяемые материалы находят применение в автомобильной промышленности [5], а также в системах теплозащиты автономных источников электропитания и радиоэлектронной аппаратуры [6, 7]. Еще одно направление использования ФИМ связано с созданием элементов конструкции зданий, позволяющих за счет скрытой теплоты фазового перехода значительно повысить теплоаккумулирующие свойства теплоизоляции и улучшить теплозащитные характеристики зданий [8].

* Работа выполнена за счет средств междисциплинарных интеграционных исследований СО РАН (проект № 32).

Применение ФИМ в различных приложениях связано с решением ряда задач. Первая из них — поиск и выбор из всего многообразия подходящих по свойствам материалов. По сложившейся в литературе классификации фазоизменяемый материал может относиться либо к органическим, либо к неорганическим веществам [9]. Органические ФИМ, в свою очередь, подразделяются на парафины и не парафины, к которым относят жирные кислоты, сложные эфиры, гликоли и т.д. Типичными представителями неорганических ФИМ являются гидраты различных солей, а также металлы и их сплавы. Каждый из перечисленных материалов обладает своими достоинствами и недостатками. Например, гидраты солей являются нестабильными при термоциклировании, в результате их свойства изменяются со временем от цикла к циклу. Кроме этого, в сочетании с некоторыми материалами они могут вызывать значительную коррозию. Однако этот тип ФИМ имеет очень широкий диапазон температур фазовых переходов и довольно высокие значения скрытой теплоты. Вторая задача обусловлена поиском оптимальной конфигурации фазоизменяемого материала в конструкциях [8, 10]. Еще одна проблема связана с синтезом композитного материала, который удовлетворял бы заданным свойствам. Таким образом, очевидно, что применению ФИМ в том или ином приложении должен предшествовать тщательный анализ. В связи с этим был проведен ряд исследований с целью изучения свойств ФИМ [11, 12], синтеза новых композитных материалов [11], а также с целью изучения влияния ФИМ на процессы теплообмена в различных прикладных задачах [13]. В отечественной научной литературе вопросы, связанные с изучением и применением ФИМ, освещены недостаточно полно. Работ, посвященных технологиям получения композитных материалов, а также исследованию влияния ФИМ на процессы теплообмена, невелико. Небольшое количество публикаций по этой теме свидетельствует о недостатке внимания к рассматриваемой проблематике в России, а также о необходимости проведения исследований в этом направлении. Целью настоящей работы, с одной стороны, является разработка технологии получения композитов из легкодоступных материалов, а с другой — изучение влияния фазоизменяемого компонента на теплообменные процессы в таких материалах. В соответствии с поставленной целью в работе проводилось исследование синтеза и свойств новых композитных материалов с фазоизменяемыми компонентами. Отрабатывались методики измерений теплофизических параметров и численных расчетов процессов теплообмена в композитах с фазоизменяемыми материалами.

Состав и технология изготовления образцов из композитного материала

В составе нового композитного материала в качестве основы использовался природный материал диатомит, который пропитывался парафином. Диатомит — осадочная горная порода, которая представляет собой кремнистые отложения желтоватого цвета. Эта порода состоит более чем на 50 % из панцирей бациллариофициевых водорослей, и в ней может содержаться от 70 до 98 % кремнезема. Диатомит обладает большой пористостью, малым объемным весом, хорошими адсорбционными и теплоизоляционными свойствами [14]. Мировые запасы диатомита оцениваются в 1 млрд. т, из них около 250 млн. т находится в США, около 110 млн. т. — в Китае [15]. Разведанные запасы диатомита в России составляют примерно 350 млн. т. [16]. Основной объем производства продукции из диатомита в России приходится на диатомитовый кирпич и теплоизоляционные изделия [15]. Для производства строительного кирпича и изделий используют обычно средне- и низкокачественные глинистые разновидности диатомита. В отличие от обычного строительного кирпича, диатомитовый кирпич практически вдвое легче, он обладает высокими тепло- и звукоизоляционными характеристиками.

Образцы для исследований изготавливались методом виброформования из мелкозернистого диатомита Инзенского месторождения с влажностью, не превышающей 3–8 %, и с размером зёрен породы менее 0,14 мм. Микрофотография диатомита представлена на рис. 1а. Диатомит смешивался с известковой водой (насыщенным раствором $\text{Ca}(\text{OH})_2$, растворимость которого при 20 °С составляла 1,56 г/л) до получения однородного состава в пропорции 440 г сухого вещества на 220 мл раствора. Готовая масса в стальной форме помещалась на виброплощадку. Амплитуда колебаний составляла 0,35–0,5 мм при массе пригруза 10 кг. Далее образцы проходили сушку на воздухе в течение 24 часов, а затем в сушильном шкафу при температуре до 100 °С. Последующий обжиг образца проводился в течение 12 часов при температуре 900 °С. Фазовый состав композита определялся с помощью рентгенофазового анализа, химический состав — методом атомно-эмиссионной спектроскопии. Согласно рентгенофазовому анализу основной фазой композита является диоксид кремния (SiO_2). Согласно атомно-эмиссионному спектральному анализу, содержание Si составляет 99,1 масс. %, а основные элементы примесей представлены в следующих пропорциях: Al — 0,2, Ca — 0,02, Cr — $5 \cdot 10^{-3}$, Fe — 0,5, Mg — 0,05, Ti — 0,04 масс. %.

Для экспериментов образцы диатомита изготавливались в форме пластин площадью $0,1 \times 0,1 \text{ м}^2$ толщиной 0,02 м (рис. 1б). Форма и размер образцов определялись габаритами рабочей камеры измерителя теплопроводности ИТП-МГ4, который позволяет измерять коэффициент теплопроводности λ образцов с инструментальной погрешностью 5 %. Результаты измерений показали, что для диатомита без насыщения ФИМ $\lambda = 0,13 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$. В качестве фазоизменяемого материала использовался твердый нефтяной парафин марки П-2. Насыщение диатомита фазоизменяемым материалом проводилось иммерсионным методом. Для этого парафин нагревался до кипения в металлической емкости и затем в нее погружали пластины диатомита. После насыщения парафином образцы извлекались из емкости и высушивались фильтровальной бумагой для удаления избытка парафина с поверхности образцов. Покрытие поверхности тонким защитным слоем лака осуществлялось после охлаждения пластин до комнатной температуры. Полученные при этом значения объемного содержания ФИМ в зависимости от степени насыщения диатомита составляли 38–71,4 %. Измерения коэффициента теплопроводности пластины диатомита, заполненной ФИМ, показали более высокие значения λ по сравнению со значениями до заполнения. Так, при объемном содержании парафина 56 % $\lambda = 0,31 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$. Плотность образцов определялась абсолютным весовым методом. Ее значение для диатомита без заполнения ФИМ составило 683 кг/м^3 , а с заполнением — 1166 кг/м^3 .

Измерение температуры плавления парафина проводилось при остывании его проб. Исследуемая проба парафина помещалась в стеклянную пробирку. Предварительно

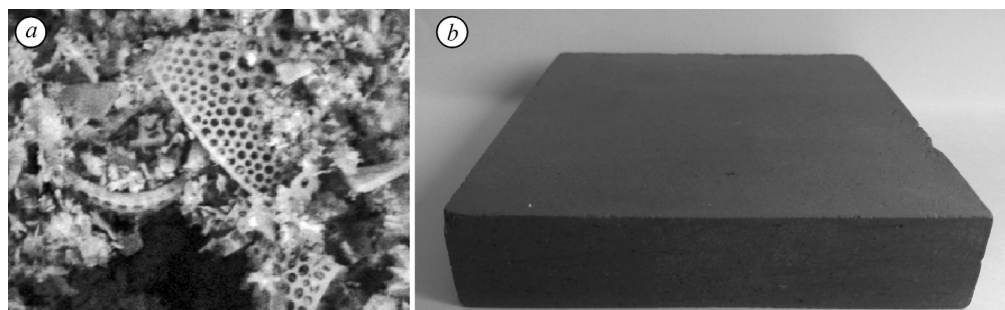


Рис. 1. Структура диатомита, полученная методом электронной микроскопии (Hitachi TM 1000) (а), образец пористого диатомита в форме пластины (б).

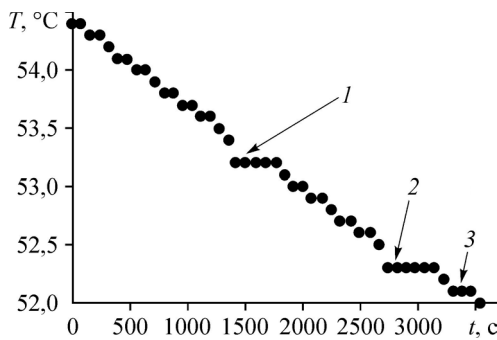


Рис. 2. Определение значений температуры фазовых переходов ФИМ в интервале температур от 54,5 °C до 52 °C.

$$T_{\text{затв.}} = 53,2 (1), 52,3 (2), 52,1 (3) \text{ } ^\circ\text{C}.$$

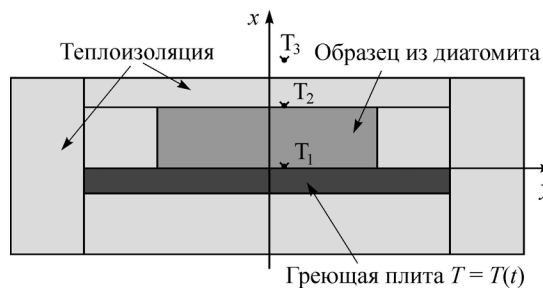
определялась температура термостата, при которой парафин находился в полностью расплавленном состоянии. В экспериментах это значение составило 56 °C. После нагрева до этой температуры и полного расплавления парафина, нагрев прекращался. В процессе остывания измерялась температура пробы парафина. На рис. 2 в качестве примера показан процесс остывания пробы парафина за один час наблюдений от значения температуры 54,5 °C. В этот промежуток времени наблюдались три значения температуры фазового перехода: 53,2, 52,3 и 52,1 °C. Первая площадка длительностью 5 минут на графике температуры соответствовала температуре затвердевания 53,2 °C. Длительность второй площадки при 52,3 °C составляла 8 минут. В ходе экспериментов отсчеты температуры по термометру проводились каждые 10 секунд. В диапазоне температур от 54,4 до 52 °C средняя скорость снижения температуры составляла 0,05 °C/мин. При анализе результатов измерений для образцов ФИМ в качестве диапазона температуры фазовых переходов был условно определен интервал температуры от 47 до 53 °C. Таким образом, фазоизменяемый материал полагался полностью затвердевшим при температуре равной или ниже 47 °C и полностью расплавленным при 53 °C и выше.

Экспериментальная установка и методика измерений

Эксперименты по изучению распространения тепла в материалах с ФИМ были направлены на определение температурных полей. В ходе экспериментов образец композита нагревался до определенной температуры регулируемым высокостабильным источником тепловой энергии. В среднем мощность источника тепла в экспериментах составляла около 26 Вт. При выходе на стационарное состояние этой мощности соответствовало измеренное значение плотности теплового потока через образец чистого диатомита 43,8 Вт/м², а через образец, заполненный ФИМ, — 51 Вт/м². Схема рабочего участка установки представлена на рис. 3. Образец, помещенный в теплоизолированную камеру, нагревался снизу массивной алюминиевой плитой. Источником тепла служила вольфрамовая спираль, нагреваемая электрическим током. Регулировка электрической мощности, подводимой к спирали, осуществлялась электронным регулятором ПИТ-3Б. Тепло к алюминиевой плите подводилось через засыпку мелкодисперсного песка, окружающего нагревательную спираль. Температура на верхней поверхности образца измерялась датчиком T₂, на нижней — датчиком T₁. Датчики температуры изготавливались из хромелевой и копелевой проволоки диаметром 0,2 мм. Нагрев отключался, когда температура греющей плиты превышала температуру фазовых переходов ФИМ. Превышение температуры выбиралось таким образом, чтобы

Рис. 3. Схема эксперимента.

T₁ — датчик температуры на поверхности греющей плиты, T₂ — датчик температуры на поверхности пластины из диатомита, T₃ — датчик температуры окружающего воздуха.



весь ФИМ, содержащийся в образце, был расплавлен. В экспериментах с диатомитом и парафином П-2 температура отключения устанавливалась около 65 °С. Теплоизоляция над образцом обеспечивала уменьшение температурного перепада внутри образца, создавая при этом более однородное температурное поле.

Модель тепловых процессов в композитных фазоизменяемых материалах

Анализ особенностей распространения тепла в материалах, содержащих ФИМ, проводился с использованием энтальпийной модели [1, 17] на основе закона сохранения энергии. Для неподвижной среды в случае отсутствия внутренних источников тепла или пренебрежения ими можно записать

$$\rho \frac{\partial H}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T), \quad (1)$$

где ρ — плотность среды, H — удельная энтальпия, λ — коэффициент теплопроводности, T — температура. Изменение H складывается из изменения энтальпии явного тепла и фазовых превращений:

$$\Delta H(t) = \int_{T_0}^{T(t)} c(\tau) d\tau + \int_{f_0}^{f(t)} L df, \quad (2)$$

где c — теплоемкость среды, L — удельная теплота фазовых превращений ФИМ, $f(t)$ — массовая доля вещества, претерпевшего фазовые превращения к моменту времени t . Подставляя выражение (2) в (1) и раскрывая частную производную $\partial H/\partial t$, получим

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) - \rho L \frac{\partial f}{\partial t}. \quad (3)$$

Рассмотрим ФИМ, у которых нет определенной температуры фазовых превращений. В этом случае процесс их плавления и затвердевания происходит в некотором интервале температур. Обозначим температуру начала плавления (температура солидуса) T_s , а температуру окончания плавления (температура ликвидуса) — T_l . При затвердевании ФИМ из жидкого состояния кристаллизация начнется при T_l , а завершится при T_s . При значениях температуры между T_s и T_l ФИМ будет находиться в промежуточном состоянии, которое включает и расплав, и твердую фракцию. Обозначим через $f(x, y, z, t)$ долю расплавленного вещества к моменту времени t в точке среды с координатами (x, y, z) . Изучение свойств ФИМ показало наличие в некотором диапазоне температур неравномерности фазового перехода. Однако в связи с отсутствием информации о функции распределения теплоты фазового перехода внутри этого диапазона для проведения расчетов использовался осредненный подход: вся совокупность фазовых превращений равномерно распределялась по выбранному интервалу температуры. Состояние среды при заданной температуре T между точками ликвидуса и солидуса характеризовалось долей расплава $f(T)$. Величина f в первом приближении аппроксимировалось линейной зависимостью от температуры:

$$f = (T - T_s)/(T_l - T_s).$$

Подстановка последнего выражения в (3) приводит к новому уравнению теплопроводности, которое позволяет учесть фазовые переходы:

$$\rho c \cdot \left(1 + \frac{L}{c \cdot (T_l - T_s)} \right) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T). \quad (4)$$

В точках пространства, которые не содержат ФИМ или в которых закончились фазовые переходы, справедливо $\partial f / \partial t = 0$, поэтому из (3) следует обычное уравнение теплопроводности:

$$\rho c (\partial T / \partial t) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T).$$

Рассмотрим задачу в двухмерной постановке соответственно схеме эксперимента, изображенной на рис. 3. Такая постановка наиболее просто реализуется, но в то же время позволяет моделировать пространственное распределение ФИМ внутри основного материала. В безразмерном виде уравнение теплопроводности, относящееся к основному материалу, имеет вид

$$\frac{\partial \theta}{\partial Fo} = \frac{\partial}{\partial \bar{x}} \left(\frac{\partial \theta}{\partial \bar{x}} \right) + \frac{L_x^2}{L_y^2} \cdot \frac{\partial}{\partial \bar{y}} \left(\frac{\partial \theta}{\partial \bar{y}} \right). \quad (5)$$

Здесь безразмерная температура θ введена относительно T_s и T_0 , где T_0 — это начальная температура образца, которая равна температуре окружающего воздуха T_a :

$$\theta = (T - T_0) / (T_s - T_0).$$

При таком способе обезразмеривания $\theta_0 = \theta_a = 0$ и $\theta_s = 1$. Для θ_1 получим

$$\theta_1 = (T_1 - T_0) / (T_s - T_0).$$

Для областей ФИМ, в которых фазовые переходы завершились, справедливо уравнение для безразмерных величин

$$\bar{c}_V \frac{\partial \theta}{\partial Fo} = \frac{\partial}{\partial \bar{x}} \left(\bar{\lambda} \frac{\partial \theta}{\partial \bar{x}} \right) + \frac{L_x^2}{L_y^2} \cdot \frac{\partial}{\partial \bar{y}} \left(\bar{\lambda} \frac{\partial \theta}{\partial \bar{y}} \right). \quad (6)$$

При фазовых переходах для областей, содержащих ФИМ, в безразмерном виде получим:

$$\bar{c}_V \cdot \left(1 + \frac{L}{c_{\text{ФИМ}} \cdot (T_1 - T_s)} \right) \cdot \frac{\partial \theta}{\partial Fo} = \frac{\partial}{\partial \bar{x}} \left(\bar{\lambda} \frac{\partial \theta}{\partial \bar{x}} \right) + \frac{L_x^2}{L_y^2} \cdot \frac{\partial}{\partial \bar{y}} \left(\bar{\lambda} \frac{\partial \theta}{\partial \bar{y}} \right). \quad (7)$$

В уравнениях (6) и (7) \bar{c}_V — безразмерная величина объемной теплоемкости ФИМ, $c_{\text{ФИМ}}$ — удельная теплоемкость фазоизменяемого материала, $\bar{\lambda}$ — безразмерный коэффициент теплопроводности ФИМ, L_x и L_y — толщина и поперечный размер пластины. Обезразмеривание параметров, которые характеризуют свойства ФИМ, проводилось относительно параметров основного материала, в частности, плотность, объемная теплоемкость и теплопроводность ФИМ нормировались на аналогичные параметры основного материала. Безразмерное время (число Фурье) и пространственные координаты в уравнениях обозначены соответственно как Fo и \bar{x} , \bar{y} . Число Фурье было определено как

$$Fo = \chi_b t / L_x^2,$$

где χ_b — коэффициент температуропроводности основного материала. Пространственные координаты x и y нормированы на L_x и L_y соответственно.

При задании граничных условий 1-го рода в качестве граничного значения использовалась температура на нижней поверхности образца, которая принималась равной температуре греющей плиты $T_p = T(0, t)$. В безразмерном виде это граничное условие имеет вид

$$\theta|_{\bar{x}=0} = \theta_p(Fo),$$

где

$$\theta_p = (T_p - T_0) / (T_s - T_0).$$

При задании на нижней поверхности образца граничных условий 2-го рода задавалось некоторое определенное значение теплового потока q . Этот поток в безразмерном виде записывался как

$$\bar{q} = \frac{qL_x}{\lambda_b \cdot (T_s - T_0)},$$

где λ_b — коэффициент теплопроводности основного материала. Боковая поверхность образца считалась теплоизолированной:

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial \bar{y}} \right|_{\bar{y}=\pm 0,5} = 0.$$

Тепловой поток на верхней грани определялся через коэффициент теплоотдачи α и разность температур между поверхностью и окружающим воздухом. Это соответствует граничному условию 3-го рода:

$$\bar{\lambda} \cdot \left. \frac{\partial \theta}{\partial \bar{x}} \right|_{\bar{x}=1} = -\text{Bi} \cdot \theta|_{\bar{x}=1},$$

где $\text{Bi} = \alpha L_x / \lambda_b$ — число Био.

При моделировании предполагалось, что ФИМ распределен равномерно по всему объему основного материала в виде локальных включений. Решение модельных уравнений осуществлялось численными методами. Расчеты проводились в двумерной постановке методом контрольного объема со вторым порядком точности [18].

Тестирование расчетной модели

Ниже приводятся результаты тестирования модели для анализа тепловых процессов в композитных фазоизменяемых материалах. Результаты вычислений сравнивались с результатами экспериментов для различных режимов нагрева образцов: как с ФИМ, так и без него. В одном случае образцы нагревались до некоторой температуры, а затем охлаждались до комнатной (первый режим). В другом случае образцы после нагрева выдерживались при постоянной температуре в течение длительного времени, чтобы было гарантировано завершение фазовых превращений во всем объеме (второй режим). Нагрев образцов осуществлялся через нижнюю грань. Остальная поверхность считалась теплоизолированной.

На рис. 4 приведено сравнение расчетов и экспериментов для образца диатомита без заполнения его ФИМ. Результаты сравнения для двух режимов нагрева представлены на рис. 4а и 4б соответственно. Нижняя грань образца в обоих режимах нагревалась до температуры 65,2 °С. Точки 1 на рисунках относятся к результатам измерений температуры на нижней грани, которая контактирует с греющей плитой (датчик T_1 на рис. 3), точки 2 — к результатам измерений температуры на верхней грани (датчик T_2 на рис. 3). Линии 3 получены в численном эксперименте. В расчетах для нижней грани использовались граничные условия 1-го рода. Значения температуры для реализации граничных условий для рассматриваемых режимов нагрева брались из экспериментов (точки 1 на рис. 4а и 4б соответственно). Из сравнения численных данных с результатами измерений видно, что расчеты хорошо согласуются с экспериментами. Следовательно, модель позволяет адекватно описывать процесс распространения тепла в основном материале.

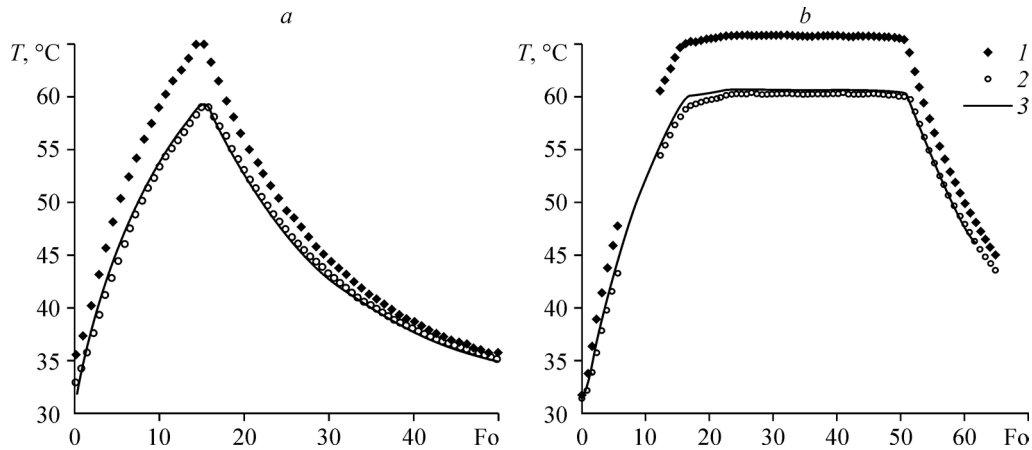


Рис. 4. Температура верхней и нижней грани образца из пористого диатомита.

a — первый режим нагрева, *b* — второй режим нагрева; 1 — температура нижней грани (эксперимент), 2 — температура верхней грани (эксперимент), 3 — температура верхней грани (расчет).

Следующий этап тестирования модели и программных средств заключался в сравнении результатов экспериментов и расчетов для образцов с ФИМ. На рис. 5 приведены эти результаты для композита с температурным диапазоном фазовых превращений от $T_s = 47^\circ\text{C}$ до $T_1 = 53^\circ\text{C}$. Нагрев нижней грани в первом режиме, как и ранее, проводился до $65,2^\circ\text{C}$, а во втором — до 63°C . Объемная доля ФИМ в образце составляла 56 %. Величина скрытой теплоты фазовых превращений в расчетах принималась равной 179 кДж/кг.

Для парафина были приняты следующие значения параметров: плотность $\rho = 800 \text{ кг/м}^3$, удельная теплоемкость $c = 2000 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$, теплопроводность $\lambda = 0,22 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$ [5, 19, 20]. Из сравнения следует, что результаты расчетов и экспериментов хорошо согласуются между собой как на участках нагрева, так и на участках охлаждения композита с ФИМ. Здесь фазовые превращения заметно проявляются в снижении темпа изменения температуры в диапазоне между T_s и T_1 . Для оценки течения процессов фазовых превращений в реальном времени на рисунке сверху приведена дополнительная временная шкала.

Из анализа результатов тестирования модели и ее программной реализации можно сделать вывод, что модель позволяет адекватно описывать тепловые процессы в композитных материалах с ФИМ.

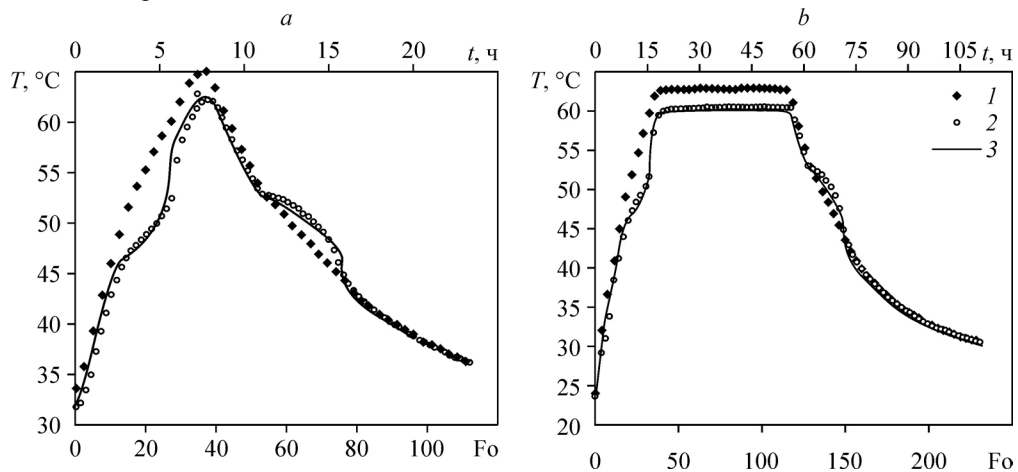


Рис. 5. Температура верхней и нижней грани композита с ФИМ.

a — первый режим нагрева, *b* — второй режим нагрева; 1 — температура нижней грани (эксперимент), 2 — температура верхней грани (эксперимент), 3 — температуры верхней грани (расчет).

Численное моделирование тепловых процессов

Для проведения расчетов выбрана постановка задачи, в которой на нижней подогреваемой грани образца задано постоянное значение плотности теплового потока q . Расчетные параметры выбирались согласно параметрам экспериментальных исследований. Начальная температура образцов в расчетах принималась равной $31,8^\circ\text{C}$. Все их грани, кроме нижней, на стадии нагрева полагались теплоизолированными. После отключения нагрева нижняя грань также считалась теплоизолированной. В расчетах значение плотности теплового потока варьировалось от 40 до 80 Вт/м^2 . Значения температуры T_s и T_1 принимались равными 47 и 53°C соответственно, кроме расчетов, где варьировался интервал температуры фазовых переходов. Объемное содержание ФИМ задавалось равным 46% кроме тех расчетов, где оно варьировалось. Фазоизменяемый материал равномерно распределялся по всему объему образца в виде локализованных включений подобно тому, как это происходит на практике при микроинкапсулировании ФИМ в несущий материал. В процессе моделирования образец нагревался при постоянной мощности теплоподвода. Когда на нижней грани образца достигалось значение температуры 65°C , источник тепла отключался. Температура нагрева задавалась с некоторым превышением над T_1 с тем, чтобы обеспечить полное плавление парафина внутри образца. Анализ результатов решения задачи осуществлялся путем сравнения зависимостей температуры от времени при различных значениях варьируемых параметров и безразмерных комплексов.

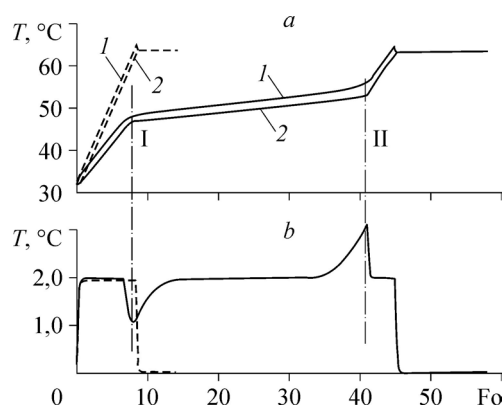
Среди определяющих решение безразмерных комплексов одна их часть входит непосредственно в уравнения модели, а другая — в граничные и начальные условия. Такие величины, как число Кутателадзе $K = \frac{L}{c_{\text{ФИМ}} \cdot (T_1 - T_s)}$, а также $\bar{\lambda}$, \bar{c}_v и L_x^2/L_y^2 входят в

уравнение в виде коэффициентов. При задании на нижней грани граничных условий 2-го рода к определяющим комплексам относится безразмерная величина плотности теплового потока $\bar{q} = \frac{qL_x}{\lambda_b \cdot (T_s - T_0)}$. Анализ решения и обобщение результатов целесообразно

проводить с использованием этих параметров.

На рис. 6а представлена температура на нижней и верхней гранях образца с ФИМ (сплошные линии 1 и 2 соответственно) и образца без ФИМ (штриховые линии 1 и 2) при нагреве нижней грани с $q = 60 \text{ Вт/м}^2$ ($\bar{q} = 0,26$). Видно, что для образца без ФИМ нагрев проходил примерно за $\Delta Fo = 10$, а для образца с ФИМ — за $\Delta Fo = 45$, то есть в 4,5 раза медленней. Вертикальные штрихпунктирные линии I и II ограничивают временной интервал в диапазоне температур от 47 до 53°C , который является диапазоном фазовых переходов внутри образца. Влияние фазовых превращений проявлялось в значительном снижении темпа роста температуры. После достижения образцом температуры $T_1 = 53^\circ\text{C}$ и полного расплавления ФИМ темп нагрева образца снова становится высоким, как и на участке до линии I. На всех трех участках нагрева

Рис. 6. Температура нижней (1) и верхней (2) граней образца (а), разница температур между нижней и верхней гранью (б). Штриховая линия — образец без ФИМ, сплошная линия — образец с ФИМ; $q = 60 \text{ Вт/м}^2$.



образца с ФИМ до отключения источника тепла рост температуры происходил практически по линейному закону. Таким образом, введение в образец ФИМ позволило за счет фазовых переходов значительно замедлить нагрев образца без снижения мощности нагрева. Необходимо отметить, что разность температур между нижней и верхней гранями образца при наличии ФИМ практически совпала с этой разностью, полученной в отсутствие ФИМ, и составила около $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 6*b*). Причем она сохраняла это значение и на участке фазовых превращений. Исключение составляли переходные участки вблизи областей начала и конца фазовых переходов, обозначенные на графике штрихпунктирными линиями I и II.

На рис. 7*a* показано влияние мощности источника тепла на рост температуры верхней грани образца с ФИМ при $\bar{q} = 0,17$ (40 Вт/м^2), $0,26$ (60 Вт/м^2) и $0,34$ (80 Вт/м^2). Видно, что с увеличением подводимой мощности темп нагрева на всех трех участках возрастает, а время задержки наступления полного расплавления ФИМ сокращается. Эффект от фазовых превращений удобно отобразить в виде относительного времени нагрева верхней грани пластины, т.е. отношения интервала времени нагрева $\Delta\tau$ с учетом фазовых превращений к интервалу времени $\Delta\tau_0$ без их учета. Таким образом можно судить об относительном времени задержки $\Delta\tau/\Delta\tau_0$. На рис. 7*b* представлена такая зависимость от мощности нагрева. Видно, что учет фазовых превращений приводил к значительной задержке времени нагрева образца — более чем в пять раз. По результатам расчетов относительное время задержки оказалось практически независимым от мощности нагрева образца. Увеличение мощности в два раза (с 40 до 80 Вт/м^2) практически не влияло на величину относительной задержки.

Влияние объемного содержания ФИМ в образце на его температуру представлено на рис. 8*a*. Чем меньше в образце содержание ФИМ, тем меньше величина роста его температуры отличается от величины роста температуры образца без ФИМ. Увеличение содержания ФИМ приводило к образованию характерной температурной «полочки» в области фазовых превращений в интервале температур от T_s до T_l , длительность которой также возрастала. Согласно результатам расчетов между относительным временем задержки $\Delta\tau/\Delta\tau_0$ и объемной концентрацией ФИМ φ наблюдается линейная зависимость (рис. 8*b*). При увеличении φ приблизительно на 23% время задержки возрастает на 68% .

В результате расчетов определено влияние ширины температурного интервала ΔT между T_l и T_s на нагрев образца с ФИМ (рис. 9). Анализ показал, что сокращение ΔT

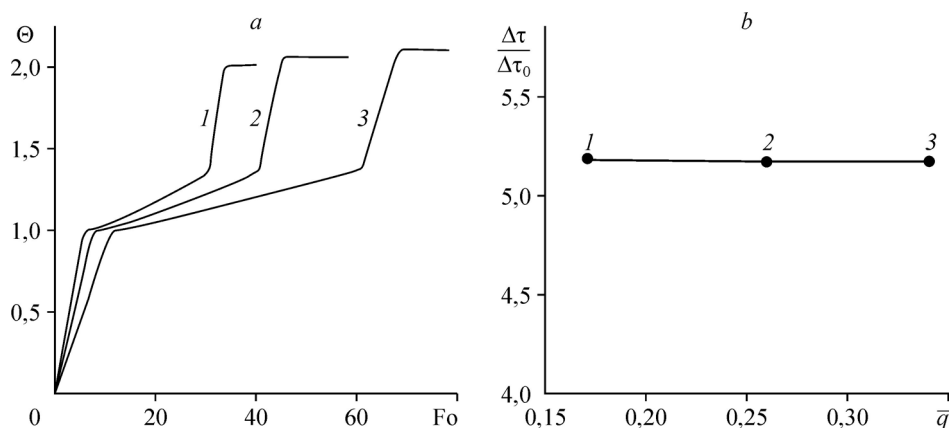


Рис. 7. Зависимости температуры верхней грани образца с ФИМ (а) и относительного времени нагрева верхней грани образца (б) от мощности источника.

$\bar{q} = 0,34$ (1), $0,26$ (2), $0,17$ (3).

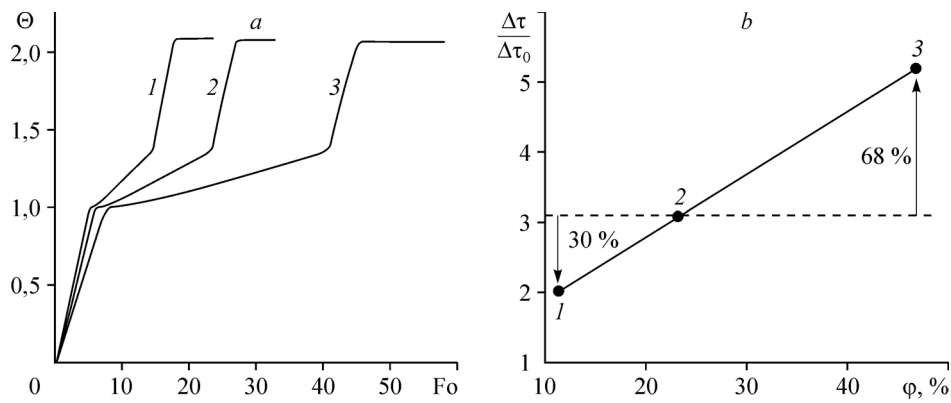
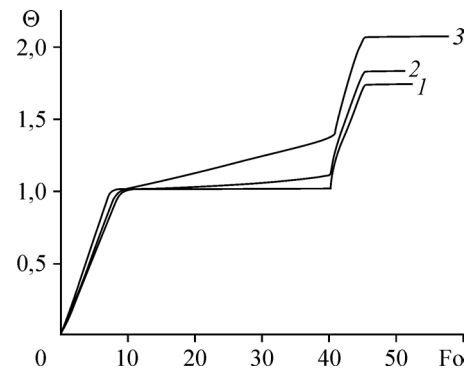


Рис. 8. Влияние объемного содержания ФИМ при $\bar{q} = 0,26$ (60 Вт/м^2) на температуру (a) и на относительное время задержки нагрева (b) при 11,5 (1), 23 (2), 46 (3) % (a).

Рис. 9. Безразмерная температура верхней грани пластины при $\bar{q} = 0,26$ (60 Вт/м^2) в зависимости от ширины интервала ΔT .

1 — $\Delta T = 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$ ($\theta_1 = 1,011$), 2 — $\Delta T = 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ($\theta_1 = 1,11$),
3 — $\Delta T = 6 \text{ }^\circ\text{C}$ ($\theta_1 = 1,39$).



приводит к существенному уменьшению крутизны наклона графика температуры в зависимости от времени на участке фазовых превращений. При этом длительность самого участка практически не изменяется. Очевидно, что чем уже температурный интервал между точками T_1 и T_s , тем точнее может поддерживаться температурный режим в образце во время фазовых превращений.

Влияние теплопроводности ФИМ на нагрев образца оказалось несущественным. Так, увеличение безразмерного коэффициента теплопроводности фазоизменяемого материала в 4 раза (с $\bar{\lambda} = 0,5$ до $\bar{\lambda} = 2,0$) привело лишь к незначительному повышению максимальной температуры нагрева образца.

Изменение объемной теплоемкости ФИМ оказывает значительное влияние на тепловые процессы, с ее увеличением длительность нагрева образца возрастает. Так, при увеличении \bar{c}_v в 4 раза длительность нагрева увеличивается приблизительно в 3,5 раза (рис. 10a).

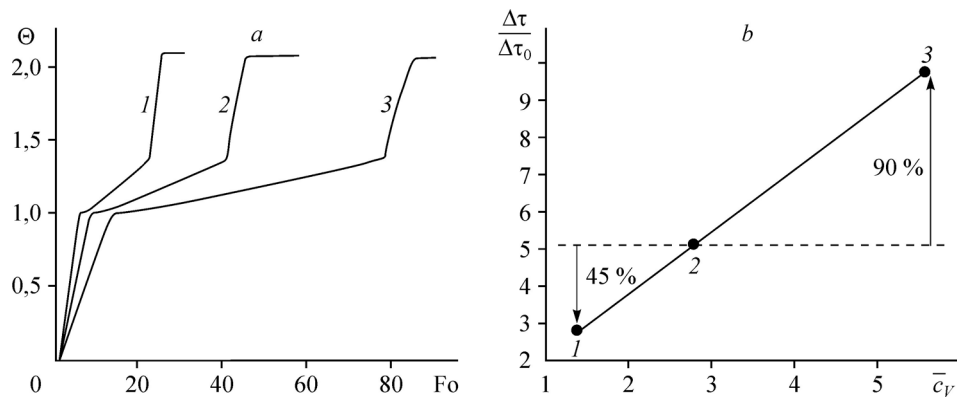


Рис. 10. Влияние объемной теплоемкости ФИМ при $\bar{q} = 0,26$ (60 Вт/м^2) на температуру (a) и на относительное время задержки нагрева (b) при $\bar{c}_v = 1,39$ (1), 2,79 (2), 5,58 (3).

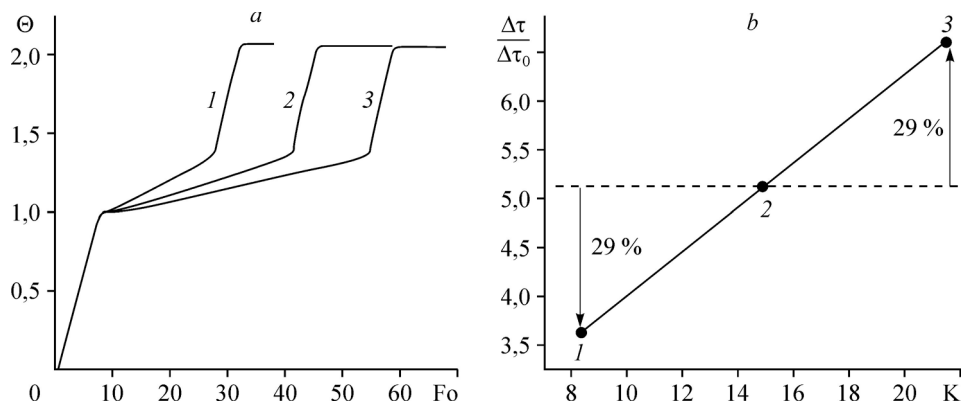


Рис. 11. Влияние числа К при 46 % ФИМ и $\bar{q} = 0,26$ (60 Вт/м²) на температуру (а) и на относительное время задержки нагрева (b) при К = 8,3 (1), 14,9 (2), 21,5 (3).

Зависимость относительного времени задержки от безразмерного значения объемной теплоемкости представлена на рис. 10b, для нее характерна линейная связь между величинами.

Число Кутателадзе, согласно предложенной расчетной модели, является важным обобщающим комплексом при тепловом воздействии на ФИМ. На рис. 11a приведены расчетные зависимости безразмерной температуры верхней грани образца от числа Кутателадзе К при нагреве с $\bar{q} = 0,26$ (60 Вт/м²). Увеличение числа К сказывалось на темпе роста температуры и приводило к его снижению в процессе фазовых превращений. Как и для ряда других параметров, относительное время задержки демонстрирует линейную зависимость от числа К. При увеличении К с 14,9 до 21,5 и уменьшении его с 14,9 до 8,3 относительная длительность нагрева изменяется почти на 29 % в сторону увеличения или уменьшения соответственно (рис. 11b).

Заключение

В ходе исследований получены образцы нового фазоизменяемого материала на основе широко распространенного природного минерального сырья — диатомита. Образцы пористого диатомита насыщались легкоплавкой органикой — парафином марки П-2. Степень насыщения образцов на основе диатомита парафином варьировалась в диапазоне объемной концентрации 38,0–71,4 %.

На основе энтальпийной модели предложена методика расчетов теплообменных процессов в фазоизменяемых материалах и разработано соответствующее программное обеспечение. Проведенные эксперименты позволили осуществить тестирование модели и методов вычислений.

Результаты моделирования процесса нагрева образцов с ФИМ при постоянном тепловом потоке выявили следующие особенности. Время нагрева образцов с ФИМ по сравнению с нагревом образцов без ФИМ увеличивалось в 4,5 раза. С ростом мощности теплового источника время нагрева образцов уменьшалось, однако относительная задержка времени нагрева по сравнению со случаем без учета фазовых переходов практически не изменялась и составляла величину ~ 5 . В поведении температуры образцов

с ФИМ присутствуют три характерных участка: участок роста температуры до температуры начала фазовых превращений T_s , участок замедления темпа роста, связанный с фазовыми превращениями, и участок с практически прежним темпом роста температуры после завершения фазового перехода, когда $T > T_1$. При этом на каждом участке рост температуры имел практически линейную зависимость. Уменьшение интервала температур фазовых превращений между T_s и T_1 приводило к существенному снижению темпа нагрева образцов на участке фазовых переходов, при этом длительность самого участка практически не изменялась. Увеличение объемного содержания ФИМ, объемной теплоемкости и числа Кутателадзе приводило к линейному росту относительного времени задержки нагрева композитного материала. В то же время, изменение коэффициента теплопроводности в 4 раза оказывало слабое влияние на относительное время задержки.

Список литературы

1. Kenisarin M., Mahkamov K. Passive thermal control in residential buildings using phase change materials // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. Vol. 55. P. 371–398.
2. Fang Y., Nin J., Deng S. Numerical analysis for maximizing effective energy storage capacity of thermal energy storage system by enhancing heat transfer in PCM // Energy and Building. 2018. Vol. 160. P. 10–18.
3. Souayfane F., Fardoun F., Biwole P.H. Phase change materials (PCM) for cooling applications in buildings: a review // Energy and Building. 2016. Vol. 129. P. 396–431.
4. Zeinelabdein R., Omer S., Gan G. Critical review of latent heat storage system for free cooling in buildings // Renewable and Sustainable Energy reviews. 2018. Vol. 82. P. 2843–2868.
5. Jaguemont J., Omar N., Van den Bossche P., Mierlo J. Phase-change materials (PCM) for automotive applications: a review // Applied Thermal Engng. 2018. Vol. 132. P. 308–320.
6. Li W.Q., Qu Z.G., He Y.L., Tao Y.B. Experimental study of a passive thermal management system for high-powered lithium ion batteries using porous metal foam saturated with phase change materials // J. Power Sources. 2014. Vol. 255. P. 9–15.
7. Васильев Е.Н., Деревянко В.А. Динамика фазовых превращений в тепловом аккумуляторе системы терморегулирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры // Теплофизика и аэромеханика. 2018. Т. 25, № 3. С. 481–488.
8. Li Z., Yang Y., Sarula C., Yong S. Numerical study on the thermal performance of lightweight temporary building integrated with phase change materials // Applied Thermal Engng. 2018. Vol. 138. P. 35–47.
9. Zeinelabdein R., Omer S., Gan G. Critical review of latent heat storage system for free cooling in buildings // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 82. P. 2843–2868.
10. Royon L., Karim L., Bontemps A. Optimization of PCM embedded in a floor panel developed for thermal management of the lightweight envelope of buildings // Energy and Buildings. 2014. Vol. 82. P. 385–390.
11. Пат. RU 2276178 С1 РФ, МПК^{С1} С09К 5/06, F24J 2/42, F24J 2/48. Теплоаккумулирующий материал и преобразователь солнечной энергии на его основе / Емельянов А.А., Полубояров В.А., Прохоров В.П., Коротаева З.А., Макаренко М.Г., Ляхов Н.З.; заявитель и патентообладатель ООО НТФ «Базис»; № 2005104062/04; заявл. 15.02.2005; опубл. 10.05.2006, Бюлл. № 13.
12. Chiu Y.-J., Yan W.-M., Chiu H.-C., Jang J.-H., Ling C.-Y. Investigation on the thermophysical properties and transient heat transfer characteristics of composite phase change materials // Int. Communications in Heat and Mass Transfer. 2018. Vol. 98. P. 223–231.
13. Tokuc A., Basaran T., Yesugey S.C. An experimental and numerical investigation on the use of phase change materials in building elements: the case of a flat roof in Istanbul // Energy and Buildings. 2015. Vol. 102. P. 91–104.
14. Левинсон-Лессинг Ф.Ю., Струве Э.А. Диатомит, диатомовая земля // Петрографический словарь. М.: Госгеолтехиздат, 1963. 108 с.
15. Мельниченко В.А. Первое российское производство наполнителей из диатомита будет запущено в 2012 году // Химический журнал. 2011. № 11. С. 38–39.
16. Российская геологическая энциклопедия / ред. Е.А. Козловский, А.А. Ледовских. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2010. Т.1. 663 с.
17. Souayfane F., Biwole P.H., Fardoun F. Melting of phase change material in presence of natural convection: a simplified model // Applied Thermal Energy. 2018. Vol. 130. P. 660–671.

18. **Патанкар С.** Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат, 1984. 124 с.
19. **Huang P., Verma A., Robles D.J., Wang Q., Mukherjee P., Sun J.** Probing the cooling effectiveness of phase change materials on lithium-ion battery thermal response under overcharge condition // *Applied Thermal Engng.* 2018. Vol. 132. P. 521–530.
20. **Lafri D., Semmar D., Hamid A., Ouzzane M.** Experimental investigation on combined sensible and latent heat storage in the different configurations of tank filled with PCM // *Applied Thermal Engng.* 2019. Vol. 149. P. 625–632.

*Статья поступила в редакцию 14 января 2019 г.,
после доработки — 21 февраля 2019 г.,
принята к публикации 28 февраля 2019 г.*