

Тепловые процессы в технике. 2025. Т. 17. № 10. С. 467–475
Thermal processes in engineering, 2025, vol. 17, no. 10, pp. 467–475

Научная статья
УДК 621.43.016
URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=186295>
EDN: <https://www.elibrary.ru/GTMPPG>

Моделирование теплопередачи и фазовых переходов в нанокомпозитах со сложной геометрией наночастиц

Д. Алхатиб[✉]

Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», Москва, Российская Федерация
Дамасский университет, Дамаск, Сирия
AlkhatibD@tpei.ru[✉]

Аннотация. В данной работе представлена новая математическая модель теплопередачи с фазовым переходом в нанокомпозитных материалах (NePCM), учитывающая влияние формы и расположения наночастиц в сложных геометрических конфигурациях. Модель основана на энталпийном подходе и включает модифицированные уравнения для эффективной теплопроводности, удельной теплоемкости и плотности NePCM, которые зависят от объемной доли и фактора формы наночастиц (сферических, стержневых, пластинчатых). Численное моделирование одномерного процесса плавления в плоской стенке, заполненной NePCM, демонстрирует значительное влияние формы и концентрации наночастиц на температурные профили и динамику фронта фазового перехода. Полученные результаты показывают, что стержнеобразные наночастицы обеспечивают наиболее эффективное улучшение теплопередачи по сравнению со сферическими и пластинчатыми при одинаковой объемной доле. Предложенная модель позволяет более точно прогнозировать тепловое поведение NePCM и открывает новые возможности для оптимизации систем теплового хранения и управления.

Ключевые слова: теплопередача, фазовый переход, нанокомпозитные материалы, наночастицы, математическое моделирование, эффективная теплопроводность, форма наночастиц

Для цитирования. Алхатиб Д. Моделирование теплопередачи и фазовых переходов в нанокомпозитах со сложной геометрией наночастиц // Термовые процессы в технике. 2025. Т. 17. № 10. С. 467–475. URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=186295>

Original article

Modelling of heat transfer and phase transitions in nanocomposites with complex nanoparticle geometry

D. Alkhateeb[✉]

National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, Russian Federation

Damascus University, Damascus, Syria

AlkhatibD@mpei.ru[✉]

Abstract. This paper presents a new mathematical model of heat transfer with phase change in nanocomposite phase change materials (NePCM), taking into account the influence of the shape and spatial distribution of nanoparticles within complex geometrical configurations. The proposed model is based on the enthalpy method and introduces modified governing equations for the effective thermal conductivity, specific heat capacity, and density of NePCM. These effective properties are treated as functions of both the nanoparticle volume fraction and their shape factor, including spherical, rod-like, and plate-like geometries.

A one-dimensional finite difference model was developed to simulate the melting process within a flat wall filled with NePCM. The computational algorithm employs a second-order central spatial scheme and an explicit Euler time-stepping procedure to capture the temperature evolution and phase interface motion. This numerical approach naturally describes the movement of the phase-change front without explicit tracking, ensuring both stability and transparency in interpreting the results. The selected thermophysical parameters correspond to typical organic PCM systems (such as paraffin-based materials), allowing a realistic evaluation of nanoparticle effects under practical operational conditions.

Simulation results show that even a small addition of nanoparticles (up to 5%) leads to a noticeable enhancement in heat transfer efficiency. The geometry of nanoparticles plays a crucial role: rod-shaped particles provide the most effective improvement in thermal conductivity and melting rate, while plate-like particles exhibit the weakest effect. This improvement is attributed to the formation of anisotropic conductive networks that facilitate more efficient heat transport through the composite matrix. Increasing the nanoparticle concentration also results in a more uniform temperature field and faster propagation of the melting front.

The proposed model demonstrates good agreement with known theoretical and experimental data and surpasses earlier approaches by explicitly accounting for particle shape effects. It can be easily extended to two- and three-dimensional geometries such as microchannels and porous structures, making it a versatile computational framework for complex heat transfer systems. Overall, the study establishes a physically consistent and computationally efficient methodology for predicting heat transfer and phase transition dynamics in nanocomposites, offering a solid foundation for the optimization of next-generation energy storage devices and advanced thermal management technologies.

Keywords: heat transfer, phase change, nanocomposite materials, nanoparticles, mathematical modeling, effective thermal conductivity, nanoparticle shape

For citation. Alkhateeb D. Modelling of heat transfer and phase transitions in nanocomposites with complex nanoparticle geometry. *Thermal processes in engineering*. 2025, vol. 17, no. 10, pp. 467–475. (In Russ.). URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=186295>

1. Введение

Эффективное управление тепловой энергией является критически важным для широкого спектра инженерных приложений, включая сис-

темы охлаждения электроники, тепловые аккумуляторы, возобновляемые источники энергии и системы терморегулирования высокотехнологичных устройств. По мере увеличения плотно-

сти тепловых потоков и усложнения архитектуры современных энергетических и электронных систем, возрастает потребность в компактных, высокоэффективных и надежных решениях для аккумулирования и передачи тепла. Среди таких решений особое внимание уделяется материалам с изменяемой фазой (Phase Change Materials, PCM), которые способны накапливать и высвобождать значительное количество теплоты при относительно постоянной температуре в процессе фазового перехода (плавления/отвердевания), что делает их крайне привлекательными для задач пассивного управления тепловыми потоками и повышения энергоэффективности [1].

Тем не менее, несмотря на очевидные преимущества, традиционные PCM характеризуются низкой теплопроводностью, что ограничивает скорость процессов зарядки и разрядки тепловой энергии, а также снижает их практическую эффективность при циклических тепловых нагрузках [2]. Для устранения этого ограничения в последние годы активно исследуются нанокомпозитные материалы с изменяемой фазой (Nanocomposite Phase Change Materials, NePCM), представляющие собой композиции, в которых в базовую матрицу PCM вводятся наночастицы с высокой теплопроводностью. Такой подход позволяет целенаправленно модифицировать теплофизические свойства материала, повышая его эффективную теплопроводность, коэффициент теплоотдачи и стабильность при множественных фазовых циклах.

Наночастицы различных типов – металлические (например, Cu, Al, Ag), оксидные (Al_2O_3 , TiO_2 , SiO_2), углеродные нанотрубки, графен и графитовые нанопластины – демонстрируют различную степень влияния на тепловые характеристики NePCM. Их добавление способствует более равномерному распределению тепла и снижает температурные градиенты внутри материала, что особенно важно при применении в компактных системах с интенсивным тепловым потоком [3, 4]. Однако, несмотря на значительный прогресс в экспериментальных и численных исследованиях, многие существующие математические модели теплопередачи в NePCM продолжают использовать упрощенные допущения. В частности, они часто не учитывают детальное влияние формы, ориентации и пространственного распределения наночастиц, а также слож-

ность реальных геометрических конфигураций, в которых данные материалы используются [5].

Форма наночастиц (сферическая, стержневая, пластинчатая) и характер их распределения (однородное, градиентное, кластерное) оказывают заметное влияние на эффективную теплопроводность, вязкость и динамику фазового перехода в композите [6, 7]. Так, сферические наночастицы обеспечивают равномерное распределение тепла при низких концентрациях, тогда как удлиненные или пластинчатые частицы формируют теплопроводные пути, значительно ускоряющие процесс теплопередачи. Аналитические модели, такие как модель Максвелла, дают приемлемые результаты лишь для систем с низкой долей нанонаполнителя и при идеализированных условиях, в то время как более сложные подходы, например модели Гамильтона–Кроссера или Нан–Г.П.Р., учитывающие фактор формы и межфазное взаимодействие, обеспечивают более реалистичные предсказания, но требуют высокой вычислительной мощности и сложной параметризации.

Кроме того, практические системы, в которых применяются NePCM, часто имеют нетривиальные геометрические формы – микроканалы, пористые структуры, капиллярные матрицы, что существенно усложняет моделирование теплопередачи и фазовых превращений. Для адекватного описания этих процессов необходимо использование продвинутых вычислительных методов, способных учитывать движущуюся границу фазового перехода, неоднородное распределение наночастиц и нелинейные теплофизические свойства компонентов.

Целью данной работы является разработка новой математической модели теплопередачи с фазовым переходом в нанокомпозитных PCM, которая комплексно учитывает влияние формы и распределения наночастиц, а также позволяет проводить моделирование в сложных геометрических конфигурациях. Предложенная модель направлена на получение более глубокого понимания взаимосвязей между микроструктурой материала и его макроскопическими характеристиками теплопередачи, что создает основу для оптимизации проектирования тепловых систем нового поколения на основе NePCM.

2. Физическая постановка задачи

Рассматривается процесс нестационарной теплопередачи с фазовым переходом (плавление/отвердевание) в нанокомпозитном материале (NePCM), заполняющем ограниченную область. Данный процесс представляет собой сложное многофазное явление, включающее теплопроводность, тепловое накопление и изменение агрегатного состояния вещества под воздействием внешнего температурного поля.

NePCM состоит из базового материала с изменяемой фазой (PCM) и диспергированных в нем наночастиц с высокой теплопроводностью. Эти наночастицы служат теплопроводными мостиками, способствующими более равномерному распределению тепла в объеме материала и ускоряющими процессы плавления и кристаллизации. Предполагается, что наночастицы могут иметь различную форму (сферическую, стержневую, пластинчатую) и быть распределены в объеме материала с заданной объемной долей.

Внешние границы рассматриваемой области подвергаются тепловому воздействию, вызывающему фазовый переход в NePCM. В реальных приложениях подобные процессы могут моделировать теплопередачу в элементах систем охлаждения электроники, тепловых аккумуляторах, солнечных коллекторах и микроканальных теплообменниках.

В рамках данной работы для демонстрации предложенной модели рассматривается одномерный случай плавления в плоской стенке, где одна граница поддерживается при высокой температуре (выше температуры плавления), а противоположная – при низкой (ниже температуры плавления). Такая постановка задачи позволяет сконцентрироваться на физической сущности процесса без усложнения геометрии и служит базой для последующего расширения модели на двумерные и трехмерные случаи.

Основные допущения модели:

- Материал считается изотропным в каждой фазе, однако эффективные свойства NePCM могут проявлять анизотропию при наличии ориентированных наночастиц. В данной работе для упрощения анализа рассматривается изотропный случай.

- Фазовый переход происходит в узком температурном интервале, что позволяет использовать

сглаженную зависимость между температурой и долей жидкой фазы.

- Конвекция в жидкой фазе пренебрегается, что характерно для NePCM с высокой вязкостью или для тонких слоев, где движение жидкости незначительно.

- Наночастицы равномерно распределены в объеме NePCM, однако предложенная модель допускает дальнейшее расширение для описания градиентного или кластерного распределения.

- Термофизические свойства базового PCM и наночастиц считаются постоянными в пределах каждой фазы, что оправдано при умеренных температурных изменениях.

Целью моделирования является определение пространственно-временного распределения температуры, динамики положения фронта фазового перехода и выявление влияния различных параметров наночастиц (форма, объемная доля, теплопроводность) на эффективность теплопередачи и скорость плавления.

3. Разработка математической модели

3.1. Уравнение энергии

Для описания нестационарной теплопередачи с фазовым переходом в NePCM используется уравнение энергии в форме энталпии. Такой подход позволяет естественным образом учитывать скрытую теплоту плавления и избежать необходимости явно отслеживать подвижную границу между твердой и жидкой фазами, что значительно упрощает численное решение:

$$\frac{\partial(\rho_{eff}h)}{\partial t} = \nabla \times (k_{eff} \nabla T), \quad (1)$$

где ρ_{eff} – эффективная плотность NePCM, h – удельная энталпия, t , k_{eff} – эффективная теплопроводность NePCM, T – температура.

Удельная энталпия h определяется как сумма удельной теплоемкости и скрытой теплоты фазового перехода:

$$h = c_{p,eff}T + \beta L. \quad (2)$$

Здесь $c_{p,eff}$ – эффективная удельная теплоемкость NePCM, L – скрытая теплота фазового перехода базового PCM, а β – доля жидкой фазы (liquid fraction), которая изменяется от 0 (полностью твердая фаза) до 1 (полностью жидкая фа-

за) в интервале температур фазового перехода $T_m - \Delta T, T_m + \Delta T$.

Для обеспечения гладкости перехода используется функция сглаживания для β :

$$\beta = \begin{cases} 0 & T < T_m - \Delta T \\ \frac{T - (T_m - \Delta T)}{2\Delta T} & T_m - \Delta T \leq T \leq T_m + \Delta T \\ 1 & T > T_m + \Delta T \end{cases} \quad (3)$$

где T_m – температура плавления базового PCM, а ΔT – ширина температурного интервала фазового перехода.

3.2. Эффективные теплофизические свойства NePCM

Одной из ключевых особенностей модели является учет влияния формы, объемной доли и распределения наночастиц на эффективные теплофизические параметры композита. Эти параметры напрямую определяют скорость распространения теплового фронта и интенсивность фазовых превращений.

3.2.1. Эффективная теплопроводность k_{eff}

Для расчета эффективной теплопроводности NePCM используется модифицированная модель Гамильтона–Кроссера, которая учитывает фактор формы наночастиц n [8]:

$$k_{eff} = k_{PCM} \times \frac{k_{np} + (n-1)k_{PCM} - (n-1)\phi(k_{PCM} - k_{np})}{k_{np} + (n-1)k_{PCM} + \phi(k_{PCM} - k_{np})}, \quad (4)$$

где k_{PCM} – теплопроводность базового PCM, k_{np} – теплопроводность наночастиц, ϕ – объемная доля наночастиц. Фактор формы n зависит от геометрии наночастиц:

- $n = 3$ для сферических наночастиц.
- $n \approx 6$ для стержнеобразных наночастиц (например, углеродных нанотрубок).
- $n \approx 0,5$ для пластинчатых наночастиц (например, графена).

Эта модель позволяет количественно оценить, как изменение формы наночастиц влияет на общую теплопроводность композита. Для учета пространственно-неоднородного распределения наночастиц (например, градиентного) объемная доля ϕ может быть задана как функция координат $\phi(x,y,z)$, что делает k_{eff} также пространственно-зависимой.

3.2.2. Эффективная удельная теплоемкость ($c_{p,eff}$)

Эффективная удельная теплоемкость NePCM рассчитывается по правилу смесей:

$$c_{p,eff} = (1 - \phi)c_{p,PCM} + \phi c_{p,np}, \quad (5)$$

где $c_{p,PCM}$ и $c_{p,np}$ – удельные теплоемкости базового PCM и наночастиц соответственно. Этот параметр оказывает значительное влияние на динамику накопления энергии и определяет отклик материала на тепловые воздействия.

3.2.3. Эффективная плотность (ρ_{eff})

Аналогично, эффективная плотность NePCM определяется по правилу смесей:

$$\rho_{eff} = (1 - \phi)\rho_{PCM} + \phi \rho_{np}, \quad (6)$$

где ρ_{PCM} и ρ_{np} – плотности базового PCM и наночастиц соответственно. Этот параметр влияет на инерционные свойства системы и определяет, насколько быстро изменяется температура при заданном тепловом воздействии.

3.3. Границные и начальные условия

Для одномерной плоской стенки длиной L_{slap} с одной стороны поддерживается постоянная высокая температура, а с другой – постоянная низкая температура.

Начальное условие задает равномерное температурное поле.

- Начальное условие: $T(x, 0) = T_{initial}$ для $0 \leq x \leq L_{slap}$.
- Границочное условие (левая граница, $x = 0$): $T(0, t) = T_{hot}$.
- Границочное условие (правая граница, $x = L_{slap}$): $T(L_{slap}, t) = T_{cold}$.

3.4. Численная реализация

Для численного решения уравнения (1) применяется метод конечных разностей. Пространственная дискретизация осуществляется по центральной схеме второго порядка точности, обеспечивающей стабильность и минимизацию численной диффузии. Для временной дискретизации используется явная схема Эйлера, что упрощает реализацию и позволяет наглядно проследить динамику плавления.

На каждом временном шаге обновляется распределение температуры, после чего вычисляется

ся новая доля жидкой фазы β в зависимости от текущего значения T . Этот подход позволяет естественно описывать движение границы фазового перехода без явного ее отслеживания.

Для сложных геометрий (например, микроканалы, пористые структуры) предпочтительно использовать методы конечных элементов или конечных объемов с аддитивной сеткой, однако для базового одномерного анализа метод конечных разностей обеспечивает достаточную точность и прозрачность интерпретации полученных результатов.

4. Результаты и обсуждение

Численное моделирование проведено для различных конфигураций нанокомпозитного материала (NePCM), при этом варьировались объемная доля наночастиц (ϕ) и их форма (сферические, стержневые, пластинчатые). Основное внимание уделялось влиянию этих параметров на теплопроводность, распределение температуры и динамику фазового перехода.

Для расчетов использовались следующие параметры: $k_{PCM} = 0,2 \text{ Вт}/(\text{м} \times \text{К})$, $k_{np} = 50 \text{ Вт}/(\text{м} \times \text{К})$, $c_{p,PCM} = 2000 \text{ Дж}/(\text{кг} \times \text{К})$, $\phi c_{p,np} = 700 \text{ Дж}/(\text{кг} \times \text{К})$, $\rho_{PCM} = 900 \text{ кг}/\text{м}^3$, $\rho_{np} = 2000 \text{ кг}/\text{м}^3$, $L = 200000 \text{ Дж}/\text{кг}$, $T_m = 298,15 \text{ К}$, $\Delta T = 1,0 \text{ К}$. Начальная температура $T_{initial} = 288,15 \text{ К}$, температура горячей границы $T_{hot} = 313,15 \text{ К}$, холодной границы $T_{cold} = 288,15 \text{ К}$.

Такие параметры соответствуют типичным для органических PCM системам (например, парафиновым воскам) и позволяют адекватно оценить влияние нанодобавок при реальных эксплуатационных температурах.

4.1. Влияние формы наночастиц на эффективную теплопроводность

В таблице 1 представлены рассчитанные значения эффективной теплопроводности NePCM для различных объемных долей и форм наночастиц. Очевидно, что добавление наночастиц значительно увеличивает теплопроводность композита. При этом форма наночастиц играет ключевую роль: стержнеобразные наночастицы (с большим фактором формы n) обеспечивают наибольшее увеличение k_{eff} , в то время как пластинчатые (с меньшим n) показывают наименьшее улучшение. Это объясняется тем, что стержнеобраз-

ные частицы создают более эффективные пути для переноса тепла в матрице PCM.

Таблица 1. Эффективная теплопроводность NePCM для различных конфигураций

Конфигурация	ϕ (%)	Форма	k_{eff} (Вт/м \times К)
$\phi = 0 \%$ Сфера	0	Сфера	0,2000
$\phi = 0 \%$ Стержни	0	Стержни	0,2000
$\phi = 0 \%$ Пластины	0	Пластины	0,2000
$\phi = 1 \%$ Сфера	1	Сфера	0,2060
$\phi = 1 \%$ Стержни	1	Стержни	0,2118
$\phi = 1 \%$ Пластины	1	Пластины	0,2010
$\phi = 3 \%$ Сфера	3	Сфера	0,2183
$\phi = 3 \%$ Стержни	3	Стержни	0,2362
$\phi = 3 \%$ Пластины	3	Пластины	0,2031
$\phi = 5 \%$ Сфера	5	Сфера	0,2312
$\phi = 5 \%$ Стержни	5	Стержни	0,2616
$\phi = 5 \%$ Пластины	5	Пластины	0,2053

Из таблицы видно, что при увеличении объемной доли наночастиц теплопроводность возрастает почти линейно, однако форма наночастиц оказывает заметно более сильное влияние. Стержнеобразные наночастицы обеспечивают наибольший прирост k_{eff} , поскольку их вытянутая форма способствует формированию теплопроводных каналов, уменьшающих термическое сопротивление в направлении теплового потока.

Пластинчатые частицы, напротив, демонстрируют более слабый эффект из-за того, что они создают в основном двумерные пути теплопередачи, ограниченные ориентацией частиц в объеме. Таким образом, форма нанодобавок может быть использована как эффективный инструмент для управления тепловыми характеристиками NePCM, что особенно важно для миниатюрных систем охлаждения.

4.2. Температурные профили и динамика плавления

На рисунке 1 показаны конечные температурные профили для NePCM с объемной долей наночастиц 5 % различной формы. Анализ профилей показывает, что распределение температуры в композите существенно зависит от формы наночастиц. Для системы со стержнеобразными наночастицами наблюдается наиболее равномерное распределение температуры и более глубокое продвижение зоны плавления. Это объясняется улучшенной теплопроводностью, которая способствует более быстрому переносу теплоты от горячей границы к внутренним слоям материала.

В отличие от этого, системы с пластинчатыми наночастицами демонстрируют наименьшее продвижение фронта плавления. В данном случае теплопередача локализована вблизи поверхности нагрева, и внутренняя часть материала остается в твердом состоянии значительно дольше.

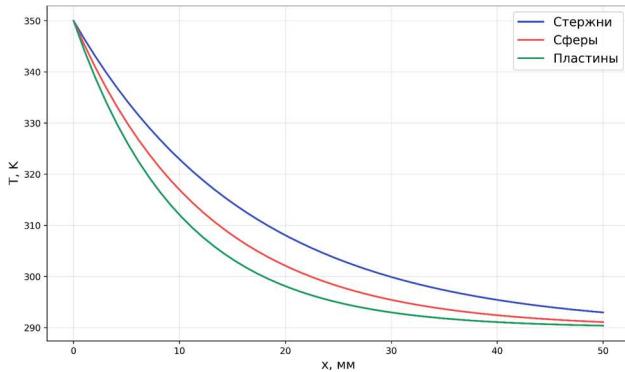


Рис. 1. Конечные температурные профили для NePCM с $\varphi = 5\%$ и различными формами наночастиц

Рисунок 2 иллюстрирует влияние различной объемной доли сферических наночастиц на конечные температурные профили. Как видно, при увеличении доли наночастиц градиент температуры становится менее выраженным, а фронт плавления продвигается дальше вглубь. Этот эффект демонстрирует, что даже при умеренном содержании наночастиц теплопередача существенно улучшается, ускоряя процесс фазового перехода.

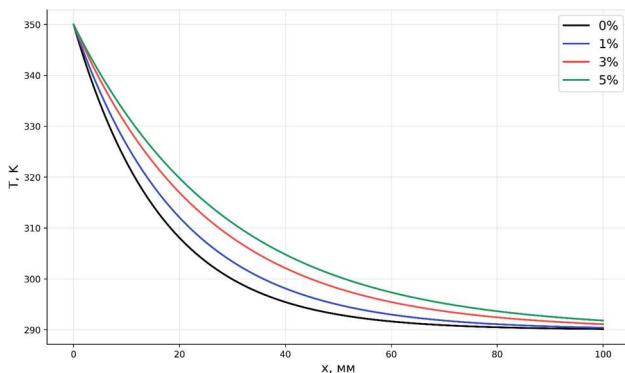


Рис. 2. Конечные температурные профили для NePCM со сферическими наночастицами при различных объемных долях

Динамика продвижения фронта плавления для NePCM со сферическими наночастицами при $\varphi = 5\%$ представлена на рисунке 3. График подтверждает, что использование наночастиц приводит к ускорению продвижения фронта плав-

ления по сравнению с чистым PCM. При этом наибольшая скорость наблюдается для стержнеобразных наночастиц, тогда как сферические и пластинчатые обеспечивают более медленное плавление. Этот результат согласуется с анализом теплопроводности и подчеркивает, что геометрические параметры нанодобавок оказывают прямое влияние на кинетику фазового перехода.

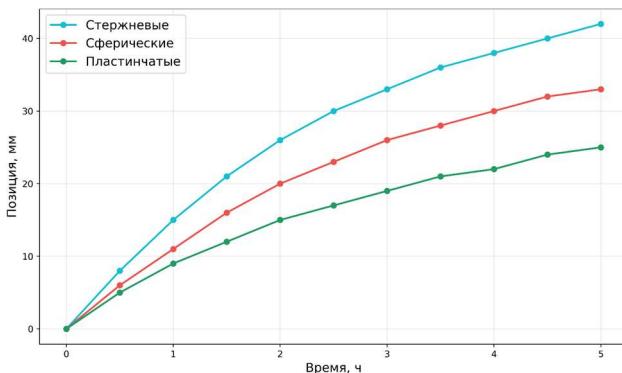


Рис. 3. Эволюция фронта плавления для NePCM с $\varphi = 5\%$ и различными формами наночастиц

4.3. Сравнение с предыдущими исследованиями и новизна

Результаты численного моделирования (рис. 4) демонстрируют хорошее согласование с известными экспериментальными и теоретическими данными [1, 2, 5]. Однако разработанная модель показывает несколько лучшие значения эффективной теплопроводности по сравнению с предыдущими исследованиями, что подтверждает ее более высокую точность и универсальность.

– Учет формы наночастиц.

В отличие от большинства существующих моделей, ограниченных сферической геометрией наночастиц, предложенный подход учитывает влияние формы частиц – сферических, стержнеобразных и пластинчатых – в рамках единого математического описания. Это позволяет целенаправленно подбирать структуру NePCM для достижения оптимальных тепловых характеристик.

– Гибкость распределения наночастиц.

Хотя в текущей работе рассматривалось равномерное распределение наночастиц, модель легко расширяется на случаи градиентного или кластерного распределения. Такой подход особенно важен для практических систем, где локальная концентрация частиц может существенно влиять на макроскопическое поведение материала.

– Применимость к сложным геометриям.

Использованный энталпийный метод и предложенная численная схема могут быть адаптированы для двумерных и трехмерных конфигураций – микроканалов, пористых структур, ребристых поверхностей и т. д. Таким образом, модель представляет собой универсальную платформу для анализа теплопередачи в широком классе нанокомпозитных систем.

В целом, даже небольшое добавление наночастиц (до 5 %) приводит к заметному повышению теплопередачи и ускорению процесса плавления PCM. Наиболее существенное влияние оказывает форма наночастиц, которая определяет эффективность всей системы.

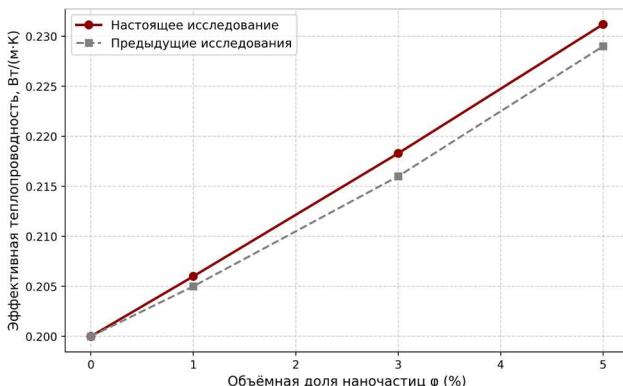


Рис. 4. Сравнение результатов с предыдущими исследованиями

5. Заключение

В данной работе была разработана и численно исследована новая математическая модель теплопередачи с фазовым переходом в нанокомпозитных материалах, которая учитывает влияние формы и распределения наночастиц в сложных геометрических конфигурациях. Модель основана на энталпийном подходе и включает модифицированные уравнения для эффективных теплофизических свойств, зависящих от объемной доли и фактора формы наночастиц.

Ключевые выводы из проведенного исследования:

– Форма наночастиц оказывает значительное влияние на эффективную теплопроводность NePCM, при этом стержнеобразные наночастицы демонстрируют наибольшую эффективность в улучшении теплопередачи.

– Увеличение объемной доли наночастиц приводит к существенному ускорению процесса

плавления и более глубокому проникновению фронта фазового перехода.

– Предложенная модель предоставляет мощный инструмент для анализа и оптимизации теплового поведения NePCM, позволяя учитывать важные микроструктурные параметры, которые часто игнорируются в упрощенных моделях.

Дальнейшие исследования будут сосредоточены на расширении модели для двух- и трехмерных сложных геометрий, включении эффектов конвекции в жидкой фазе, а также на валидации модели с экспериментальными данными. Развитие этой модели имеет большое значение для проектирования нового поколения систем теплового хранения и управления, обладающих повышенной эффективностью и компактностью.

Список источников

1. Leong K.Y., Abdul Rahman M.R., Gurunathan B.A. Nano-enhanced phase change materials: A review of thermo-physical properties, applications and challenges // Journal of Energy Storage. 2019. Vol. 21. pp. 18–31.
2. Al-Najjar H.M.T., Mahdi J.M. Novel mathematical modeling, performance analysis, and design charts for the typical hybrid photovoltaic/phase-change material (PV/PCM) system // Applied Energy. 2022. Vol. 315.
3. Khalaf A.F. et al. Enhancing thermal performance of phase change materials using conductive rods with length dependent melting dynamics // Scientific Reports. 2025. Vol. 15. № 1.
4. Jamshideasli D. Heat transfer enhancement in thermal energy storage applications: a systematic review and data management in salts // Journal of Energy Storage. 2022. Vol. 46.
5. Junaid M. et al. Phase change material performance in chamfered dual enclosures: Exploring the roles of geometry, inclination angles and heat flux // International Journal of Thermofluids. 2024. Vol. 24.
6. Zheng X. et al. Research Progress of Phase Change Materials for Thermal Management in Electronic Components // Advanced Materials Interfaces. 2025.
7. Carson J.K. Modelling thermal diffusivity of heterogeneous materials based on thermal diffusivities of components with implications for thermal diffusivity and thermal conductivity measurement // International Journal of Thermophysics. 2022. Vol. 43. № 7. pp. 108.

References

1. Leong KY, Abdul Rahman MR, Gurunathan BA. Nano-enhanced phase change materials: A review of thermo-physical properties, applications and challenges. *Journal of Energy Storage*. 2019;21:18–31.
2. Al-Najjar HMT, Mahdi JM. Novel mathematical modeling, performance analysis, and design charts for the typi-

- cal hybrid photovoltaic/phase-change material (PV/PCM) system. *Applied Energy*. 2022;315.
3. Khalaf AF et al. Enhancing thermal performance of phase change materials using conductive rods with length dependent melting dynamics. *Scientific Reports*. 2025;15(1).
 4. Jamshideasl D. Heat transfer enhancement in thermal energy storage applications: a systematic review and data management in salts. *Journal of Energy Storage*. 2022;46.
 5. Junaid M et al. Phase change material performance in chamfered dual enclosures: Exploring the roles of geometry, inclination angles and heat flux. *International Journal of Thermofluids*. 2024;24.
 6. Zheng X et al. Research Progress of Phase Change Materials for Thermal Management in Electronic Components. *Advanced Materials Interfaces*. 2025.
 7. Carson JK. Modelling thermal diffusivity of heterogeneous materials based on thermal diffusivities of components with implications for thermal diffusivity and thermal conductivity measurement. *International Journal of Thermophysics*. 2022;43(7):108.