

Copyright © 2024 by Cherkas Global University



Published in the USA  
 European Reviews of Chemical Research  
 Issued since 2014.  
 E-ISSN: 2413-7243  
 2024. 11(1): 3-11

DOI: 10.13187/erchr.2024.1.3  
<https://erchr.cherkasgu.press>



## Enhancing Thermal Conductivity of Phase Change Materials: A Review of Methods

Ashraf AL-Nassar <sup>a, \*</sup>, Andrei N. Makeev <sup>a</sup>

<sup>a</sup>National Research University (Moscow Power Engineering Institute) Moscow, Russian Federation

### Abstract

Currently, the accumulation of thermal energy is an important task not only in traditional thermal energy systems to balance energy supply and demand, but also in renewable energy systems, where energy production can vary greatly. At the same time, special attention is paid to the latent accumulation of thermal energy. This is mainly due to the high energy density that can be stored at the time of its excess generation and the ability to maintain an isothermal regime during phase transitions. This property makes phase transition materials (PCMs) particularly valuable in various thermal energy storage applications. One of the main limitations to the overall efficiency of thermal energy storage systems based on PCMs is the relatively low thermal conductivity of the material used. This determines the rate of absorption and release of heat during the phase transition, which ultimately significantly limits the scope of such storage systems. This article not only examines the role of PCMs in thermal energy storage systems, but also identifies key advantages and several innovative strategies to increase the thermal conductivity of PCMs. These strategies include the addition of ribs, the use of nanoparticles, the implementation of heat pipes, and encapsulation techniques. It is expected that these developments will significantly improve the practice of sustainable energy management and contribute to more efficient use of renewable energy sources using thermal energy storage devices based on phase transition materials. The summary of the study highlights the importance of using phase transition materials to ensure a sustainable energy future where thermal energy storage is an integral part of the functioning of energy systems.

**Keywords:** latent heat, energy storage, phase transition materials, thermal conductivity, encapsulation, nanoparticle materials, heat pipes.

### 1. Введение

Накопители тепловой энергии (НТЭ) играют важнейшую роль в современных энергетических системах, обеспечивая возможность накопления избыточной тепловой энергии для последующего использования. Эта возможность важна для балансирования спроса и предложения, особенно в системах возобновляемой энергетики, где производство энергии может быть неустойчивым. Системы НТЭ помогают повысить энергоэффективность, сократить выбросы парниковых газов и повысить общую надежность энергоснабжения. Накопитель скрытой тепловой энергии (НСТЭ) – это тип НТЭ, который накапливает энергию в виде скрытого тепла, которое поглощается или высвобождается, когда материал претерпевает фазовый переход, например, из твердого состояния в жидкое или из жидкости в газ. Материалы с фазовым переходом используются в системах НСТЭ из-

\* Corresponding author  
 E-mail addresses: [ashrafnassar@yandex.ru](mailto:ashrafnassar@yandex.ru) (A. AL-Nassar)

за их высокой плотности накопления энергии и способности накапливать и высвобождать энергию практически при постоянных температурах до тех пор, пока МФП не вернется в исходную фазу, где накопленная энергия высвобождается. НСТЭ обладает рядом преимуществ перед другими типами НТЭ, такими как явное накопление тепла и термохимическое хранение.

Явное накопление тепла предполагает накопление энергии путем изменения температуры материала, что обычно требует больших объемов и имеет меньшую плотность энергии по сравнению со скрытым накоплением тепла.

Термохимическое хранение предполагает накопление энергии посредством обратимых химических реакций, которые могут быть сложными и дорогостоящими.

Материалы с фазовым переходом играют ключевую роль в этих системах, предоставляя эффективные решения для накопления тепловой энергии. Однако низкая теплопроводность МФП является значительной проблемой, ограничивая скорость накопления и извлечения энергии. Цель данной работы состоит в обзоре современных методов повышения теплопроводности МФП, а также в анализе их эффективности и практичности для улучшения тепловых характеристик.

## 2. Методы улучшения производительности

В данном разделе описаны методы исследования, направленные на повышение теплопроводности МФП. Рассмотрены следующие методы:

### I. Увеличение контактных поверхностей с использованием ребер.

Этот метод считается самым простым и используется для увеличения площади поверхности теплопередачи и осуществляется с помощью ребер или металлической фольги. Лопастей могут иметь прямоугольную или круглую форму и считаются более прочными и толстыми, чем металлическая фольга толщиной менее 0,1 мм. В результате небольшого расстояния между фольгой передача тепла за счет проводимости считается наиболее влиянием на процесс аккумуляции тепла, а относительно длинные лопасти позволяют осуществлять передачу посредством конвекции.

Применение ребер было введено одна эффективная техника для улучшения теплопроводности МФП. Авторы работы ([Kamkari, Shokouhmand, 2014](#)) показали, что общее время плавления можно сократить на 18 % и 37 % соответственно, когда в МФП погружены одно и три ребра, по сравнению с МФП без ребер. Также были подробно изучены эффекты геометрических характеристик ребра. В работе ([Amudhalapalli, Devanuri, 2024](#)) Исследование сосредоточилось на повышении эффективности системы хранения латентного тепла с использованием различных конфигураций и ориентаций ребер. В текущем анализе поверхность теплоотдачи трубы теплоносителя увеличена за счет радиальных (R-тип), спиральных (S-тип) и продольных (L-тип) ребер, результаты показали значительное сокращение времени зарядки вертикально расположенного теплообменника по сравнению с другими ориентациями: на 47,5 %, 45,7 % и 23 % для конфигураций R-типа, S-типа и L-типа соответственно ([Kudachi et al., 2022](#)). В этой статье были разработаны две конфигурации теплообменника (ТО), одна без внутреннего трубчатого ребра и другая с кольцевым ребром как для цикла зарядки, так и для разрядки. В целом, экспериментальное исследование продемонстрировало, что включение ребер в системы хранения тепловой энергии на основе МФП значительно повышает их эффективность и эффективность в хранении и высвобождении тепловой энергии. В данной статье ([Ma et al., 2023](#)) было исследовано влияние формы ребер на теплоотдачу фазового материала (МФП) и сравнивались на основе формы труб с ребрами и количества труб с ребрами, Использование труб с ребрами является эффективным методом для повышения теплоотдачи в системах НСТЭ и различные расположения ребер, такие как постепенное увеличение диаметра ребер от верха до низа или все ребра с одинаковым диаметром, оказывают влияние на процесс накопления тепла и работоспособность системы. В работе ([Gupta, Rathod, 2023](#)) было количественно оценено влияние формы ребер на процесс плавления фазового материала (МФП) в прямоугольном замкнутом пространстве с постоянной температурой стенки и рассмотрены три различные конфигурации с разными формами ребер. Исследование подчеркивает важность оптимизации конструкции ребра для максимизации эффективности теплоотдачи и улучшения эффективности систем хранения тепловой энергии на основе МФП. В статье

(Kumar et al., 2021) проведено комплексное двумерное численное исследование для изучения теплоотдачи на основе фазового материала (МФП) с ребристым теплоотводом с целью термического управления электронными устройствами. Исследование подчеркивает важность оптимизации конфигурации теплоотвода, такой как количество ребер, для улучшения термического управления компонентами электроники. Количество ребер в теплоотводе напрямую влияет на эффективность теплоотдачи на основе МФП, с увеличением количества ребер улучшается общая производительность. Несколько исследований – в основном теоретических, проведенных в работах (Youssef et al., 2018; Liu, 2016; Abujas et al., 2016; Ibrahim et al., 2017) подтвердили, что тепловая эффективность зарядки и разрядки МФП значительно улучшается за счет встраивания ребристых трубок и труб в МФП. В работе (Parry et al., 2014) авторы разработали вычислительно эффективную численную модель для системы хранения тепловой энергии типа "оболочка-труба", где теплообмен происходит между фиксированным количеством фазового материала, находящегося в контакте с трубой, через которую протекает высокотемпературная жидкость. Результаты показали, что системы с ребрами и несколькими трубами имели более быстрое повышение температуры во время зарядки по сравнению с базовым проектированием и Поверхность контакта теплообменника теплоносителя с трубой с ребрами по сравнению с круглыми ребрами была в два раза выше для продольных ребер, что привело к быстрому плавлению и затвердеванию МФП.

## II. Использование наночастиц для увеличения теплопроводности.

Добавление очень маленьких молекул с высокой теплопроводностью к веществу с фазовым переходом привлекло внимание в последние десятилетия. Этими частицами могут быть графит, металлы (алюминий, медь, серебро) или оксиды металлов (оксид алюминия, оксид меди, оксид магния). Выбор наночастиц зависит от таких факторов, как стоимость, повышение теплопроводности, совместимость с МФП и предполагаемое применение.

Добавление металлических наночастиц к МФП исследовали несколько исследователей. В работе (Khyad et al., 2016) добавили 1 % массовой доли алюминиевого порошка в МФП (температура плавления ниже 80 °C) и наблюдали увеличение теплопроводности в 18 раз, а именно, с 0,23 Вт/(м·К) до 4,11 Вт/(м·К). Эффект добавления алюминиевого порошка в МФП также изучали авторы работы (Li et al., 2015), с акцентом на процессы плавления и затвердевания, а также увеличение теплопроводности, они показали, что при добавлении 1 % и 2 % массовых долей алюминия время затвердевания МФП (с интервалом плавления от 45,8 до 50,3 °C) сократилось с 220 минут до 140 минут. В другом исследовании авторы (Şahan et al., 2015) использовали наномагнетит (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>), и для составов МФП с 10% и 20% парафин-наномагнетита теплопроводность МФП увеличилась на 48 % и 60 %, соответственно. В работе (Vallejo et al., 2018) исследовали влияние различных дисперсий функционализированных графеновых нанопластинок на теплоотдачу и стабильность смеси пропиленгликоля и воды с массовым соотношением 3:7. Согласно их результатам, теплопроводность используемой в исследовании МФП была увеличена до 16 % для случая с 1 % массовой долей функционализированных графеновых нанопластинок. В статье (Mebarek-Oudina, Chabani, 2023) обобщается общий обзор того, как преодолеть эти ограничения путем адаптации наносушеных фазовых материалов. Интеграция наночастиц ускоряет процессы плавления/затвердевания, что приводит к более быстрым фазовым переходам по сравнению с чистыми МФП, улучшая термофизические свойства фазовых материалов и повышая тепловую эффективность. В работе (Jalil et al., 2022) исследовано влияние использования фазового материала (МФП) на эффективность охлаждения теплоотвода, показывая, что рабочий теплоотвод с МФП может снизить температуру до 18 °C, и добавление небольшого количества (2 %) наночастиц (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) в МФП улучшило производительность теплоотвода, указывая на потенциал для дальнейшей оптимизации в системах охлаждения. В данной статье (Chinnasamy, Honghyun, 2022) исследовались фазовые свойства четырех металлических наночастиц, а именно Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CuO, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> и SiC при концентрациях 1, 3, 5 и 5 вес. %. Добавление металлических наночастиц при разных концентрациях приводило к незначительным изменениям в температурах фазового перехода и различным значениям скрытой теплоты, варьирующимся от 6,56 % до 18,5 %. Нанокompозитные фазовые материалы (МФП) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и CuO проявили значительные улучшения в тепловых и физических свойствах по сравнению с нанокompозитами Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> и

SiC, что делает их подходящими для приложений в управлении внутренней тепловой нагрузкой. В работе (Nitsas, Koronaki, 2021) проведен экспериментальный анализ органических фазовых материалов, Добавление медных наночастиц к органическому фазовому материалу (МФП) уменьшает время тепловой зарядки на 25,3 % при концентрации 0,165 %, Гибридные наночастицы меди и оксида алюминия в МФП при концентрациях от 0,165 % до 0,816 % снижают время на 10,8 % по сравнению с чистым МФП. Статья (Zhang et al., 2022) введена новая конфигурация вентиляционной системы с использованием синусоидальных контейнеров фазового материала (МФП) внутри канала, где рассматривалась смесь TiO<sub>2</sub> и RT25 как МФП. Результаты показали, что включение наноматериалов в МФП может улучшить эффективность поглощения тепла и снизить общее время процесса в вентиляционной системе. В работе (Amudhalapalli, Devanuri, 2022) изучено почти 40 различных наночастиц по их эффективности в улучшении термофизических свойств МФП, работающих в диапазоне от 30 до 100 °C, с акцентом на изменения в теплопроводности и скрытой теплоты.

### III. Тепловая трубка.

Интеграция тепловых трубок с материалами с фазовым переходом объединяет их соответствующие преимущества для создания синергетической системы терморегулирования. Тепловые трубки эффективно передают тепло, используя принцип фазового перехода, при котором рабочая жидкость испаряется в испарителе за счет приложенного тепла, поступает в конденсатор для выделения тепла, конденсируется обратно в жидкость и возвращается за счет капиллярного действия. МФП, с другой стороны, накапливают и высвобождают тепловую энергию во время фазовых переходов при определенных температурах. За счет встраивания или окружения тепловых трубок материалами с фазовым переходом значительно повышается теплопроводность и эффективность теплопередачи. Тепловые трубки известны своей способностью быстро и эффективно передавать тепло на большие расстояния при минимальном тепловом сопротивлении. В сочетании с МФП, которые обладают высокой способностью к скрытому накоплению тепла, тепловые трубки обеспечивают быстрое и равномерное распределение тепловой энергии, поглощаемой МФП во время фазового перехода (обычно из твердого состояния в жидкое) по всему материалу. Такая быстрая теплопередача предотвращает образование локальных очагов перегрева и позволяет МФП быстро поглощать тепло, максимально увеличивая потенциал накопления энергии. Кроме того, на этапе затвердевания (превращения жидкости в твердое вещество) тепловые трубки способствуют высвобождению накопленной тепловой энергии, поддерживая постоянный температурный профиль. Такой синергетический подход не только повышает общую эффективность теплопередачи системы, но и улучшает ее чувствительность к изменяющимся тепловым нагрузкам, что делает ее идеальной для применений, где важен точный контроль температуры и терморегулирование, таких как охлаждение электроники, системы аккумулирования тепла для возобновляемых источников энергии и пассивные решения для отопления и охлаждения зданий.

В работе (Rahim et al., 2022) исследование успешно разработало и протестировало систему солнечного накопления тепла, объединяющую френелевы линзы, тепловые трубы и материалы с изменением фазы для эффективного накопления тепла. Система продемонстрировала способность накапливать тепло до 730 кДж с использованием 2 кг МФП на основе парафина с температурой плавления от 54 до 59 °C. В данной статье (Hayat et al., 2020) Исследование направлено на улучшение теплового управления электронными системами путем комбинации МФП, медного пористого материала и тепловых труб. Результаты показали, что гибридная система охлаждения (Foam- МФП -HT) с вентилятором значительно снижает температуру на 47%, 51% и 54% при тепловых потоках 2, 2.5 и 3 кВт/м<sup>2</sup> после 6000 секунд зарядки. В работе (Patil, Chandrakishor, 2014) Исследование направлено на повышение эффективности теплообмена в системе теплоаккумуляции с использованием МФП, тепловых труб и медных трубок, интегрированных с солнечной системой нагрева воды. Результаты показывают, что использование тепловых труб с МФП обещает быть перспективным подходом для эффективного накопления солнечной энергии и обеспечения непрерывного поставления горячей воды для бытовых нужд. Статья (Reay, 2015) исследовала использование тепловой трубки с МФП в цилиндрическом контейнере. Авторы

работы (Boo et al., 2011) исследовали численное моделирование системы хранения тепла с вставленными тепловыми трубками для высокотемпературного и среднетемпературного диапазонов. В работе (Sharifi et al., 2012) численно моделировали процесс плавления МФП в скрытом тепле тепловая энергия с встроенными тепловыми трубками, провели параметрический анализ, показавший, что скорость плавления заметно превышает результаты, полученные с использованием стержня или трубы. Авторы работы (Tiari et al., 2017) повысили тепловую эффективность НСТЭ системы с использованием тепловых трубок. Экспериментальные исследования показали, что внедрение сети тепловых трубок значительно увеличило время зарядки накопителя. В работе (Tiari et al., 2015) также разработали инструмент вычислительного моделирования для изучения поведения высокотемпературной НСТЭ системы с использованием технологии ребристых тепловых трубок. В этом исследовании была создана двумерная модель для оценки эффективности числа ребристых тепловых трубок в процессе зарядки системы. Было установлено, что увеличение числа тепловых трубок с 1 до 3 приводит к увеличению скорости зарядки на 10 %, однако изменение общего числа ребер не приводит к заметному изменению эффективности настройки НСТЭ. Тиари и др. изучили цилиндрический резервуар с ребристой тепловой трубкой в двух измерениях с точки зрения конструкции тепловой трубки, длины ребра и числа ребер и выяснили, что большее количество ребристых тепловых трубок приводит к более быстрому процессу плавления/затвердевания. В работе (Gan, Hung, 2023) исследовали влияние размера нано-фитинг материала на общее тепловое поведение микротепловой трубки, а также практическую реализацию нано-фитинг в высокоэффективной системе охлаждения для микроэлектроники для совместимости с окружающей средой. Авторы работы (Zhang, 2020) предложили новую комбинированную тепловую трубку/ребра из медной пены и оценили ее производительность путем сравнения с производительностью ребристой тепловой трубки. В работе (Feng, 2022) исследовали эксперимент/численное исследование проектирования и оптимизации гибридного холодильного блока, использующего составной фазовый материал и плоскую тепловую трубку для термического управления аккумуляторами. В статье (Diao et al., 2019) численно исследовали поведение нового типа устройства для хранения латентного тепла (НСТЭ) на основе плоских микротепловых трубок с прямоугольными продольными ребрами.

#### IV. Инкапсуляция МФП.

Инкапсуляция МФП представляет собой процесс заключения фазопереходных материалов в оболочку или капсулу из другого материала и классифицируется на 4 группы:

1. Микрокапсулирование: МФП заключают в микроскопические капсулы, обычно размером от нескольких микрометров до миллиметров. Эти микрокапсулы могут быть включены в различные матрицы, такие как полимеры или строительные материалы.
2. Макрокапсулирование: В этом случае МФП заключают в более крупные контейнеры или капсулы, которые могут быть использованы в тепловых аккумуляторах или теплообменниках.
3. Наноканпулирование: МФП заключают в наноканпулы, что позволяет улучшить теплопередачу на наноскопическом уровне. Этот метод часто используется в передовых технологиях и материалах.
4. Композитные материалы: МФП смешивают с высокотеплопроводными материалами (например, графитом, углеродными нанотрубками или металлическими частицами) и инкапсулируют в композитную матрицу для улучшения тепловых характеристик.

Технология микроинкапсуляции, как подчеркивают различные исследования, предлагает метод преодоления проблем, связанных с обработкой МФП, предоставляя стабильную структуру и улучшенную эффективность теплообмена. В статье (Mahmood et al., 2022) авторы предоставляют надежный источник информации о последних достижениях и разработках в области микроинкапсулированных фазовых переходных материалов, исследование демонстрирует потенциал микроинкапсулированных МФП в обеспечении надежного метода для хранения и управления тепловой энергией, с акцентом на улучшение теплообмена и обеспечение стабильных структур для долгосрочной эксплуатации. В работе (Dutkowski et al., 2022) изучено влияние физического состояния микроинкапсулированного фазового материала на гидравлическое сопротивление смеси в круглом канале. Проведены детальные исследования гидравлического сопротивления микроинкапсулированной смеси МФП в канале диаметром 4 мм, испытания проводились с смесью МФП на 21,5 % по массе

при различных температурах (18,4 °C, 26,1 °C, 30,5 °C), представляющих твердое, фазовое и жидкое состояния. Исследование показало, что с увеличением числа Рейнольдса сопротивление потока также увеличивается, причем изменения плотности в смеси в первую очередь зависят от состояния МФП, а не от вязкости. Авторы работы (Santos, 2021) разработаны новый дизайн для панели инкапсуляции с учетом практических аспектов, таких как стоимость производства и удобство изготовления, помимо теплообмена и перепада давления. Предложенный дизайн удвоил способность к теплообмену, что позволяет лучше обмениваться тепловой энергией между панелями МФП и воздухом в теплообменниках МФП-воздух, и новый дизайн также увеличил объемную емкость на 13,7 %, обеспечивая больше МФП для хранения и высвобождения теплоты. В работе (Hoang et al., 2015) исследовано тепловое поведение инкапсулированного фазового материала (Rubitherm RT5) с двумя разными массовыми долями МФП, результаты показали, что инкапсулированный МФП обладает превосходной тепловой буферной способностью по сравнению с обычными упаковочными материалами, улучшая тепловую защиту для перепродуктов. В работе (Tyagi et al., 2014) представлено сравнительное исследование двух различных типов систем терморегулирования для отопления помещений с использованием гексагидрата хлорида кальция в качестве материала для накопления тепловой энергии, заключенного в панели и шарики. В данной работе (Giro-Paloma et al., 2019) изучен материал с фазовым переходом (инкапсулирован в микрокапсулы для увеличения теплопередачи и контроля изменений объема при фазовом переходе). Включение восков в микрокапсулы обеспечивает улучшенную теплопередачу и лучший контроль изменений объема во время фазовых переходов, что делает его перспективным подходом для технологии скрытого аккумулирования тепла. В обзоре (Shchukina et al., 2018), посвященном материалам с фазовым переходом для аккумулирования тепловой энергии, в частности их наноинкапсулированию, авторы рассматривают наноинкапсулирование как многообещающий метод повышения эффективности материалов с фазовым переходом, как органических, так и неорганических, за счет обеспечения высокой удельной поверхности и регулирования теплообмена между оболочкой капсулы и корпусом. современный уровень развития технологии инкапсуляции МФП в основном включает макро- и микрокапсулирование, но существует потребность в передовых исследованиях многофункциональных нанокапсул для улучшения тепловых свойств и эффективности. В исследовательской работе (Höhlein et al., 2018) представлена подробная стратегия разработки макрокапсулирования материалов с фазовым переходом, процесс инкапсулирования включает в себя анодированные алюминиевые трубы, герметично закрытые механическими методами для гидрата неорганической соли, но, несмотря на эффективность разработанных макрокапсул, их высокая стоимость в основном обусловлена индивидуальным изготовлением, побуждение к разработке недорогих концепций герметизации с использованием пищевых продуктов массового производства или алюминиевых банок для будущей работы. В работе (Valizadeh, Torabi Angaji, 2020) исследование было сосредоточено на изготовлении, характеристике и термических свойствах нанокапсул AP25 в качестве органических материалов с фазовым переходом для хранения тепловой энергии. Нанокапсулы продемонстрировали высокую скрытую теплоту фазового перехода – 141,8 Дж/г при 27,4°C, что указывает на их значительный потенциал для применения в качестве накопителей тепловой энергии.

Методы увеличения поверхностей обмена и использования тепловой трубки повышают эффективность процесса теплопередачи внутри МФП, тогда как другие методы увеличивают теплопроводность МФП и тем самым усиливают термодиффузию внутри него. Объединение методов повышает эффективность передачи и хранения тепла.

### 3. Заключение

Системы скрытого накопления тепловой энергии, использующие уникальные свойства материалов с фазовым переходом, предлагают многообещающее решение для эффективного накопления тепловой энергии и регулирования температуры. Несмотря на высокую плотность накопления энергии и изотермические свойства, низкая теплопроводность МФП остается серьезной проблемой, которую необходимо преодолеть, чтобы в полной мере использовать их потенциал. В этой статье представлен всесторонний

обзор современных методов повышения теплопроводности МФП для систем накопления скрытой тепловой энергии. Анализ показывает, что добавление высокопроводящих частиц, увеличение площади поверхности теплопередачи, использование тепловых трубок и инкапсулирование МФП являются эффективными подходами к улучшению тепловых свойств МФП. Прогресс в улучшении теплопроводности МФП открывает большие перспективы для разработки систем НСТЭ. Продолжая исследовать и совершенствовать эти методы, мы сможем раскрыть весь потенциал МФП и внести свой вклад в создание более эффективных и устойчивых решений для хранения энергии и управления температурой в различных отраслях промышленности. Перспективы будущих исследований включают дальнейшую оптимизацию этих методов и их интеграцию в коммерческие энергетические системы для повышения их эффективности и устойчивости.

## References

- [Abujas et al., 2016](#) – *Abujas, Carlos R., et al.* (2016). Performance comparison of a group of thermal conductivity enhancement methodology in phase change material for thermal storage application. *Renewable energy*. 97: 434-443.
- [Amudhalapalli, Devanuri, 2022](#) – *Amudhalapalli, G.K., Devanuri, J.K.* (2022). Synthesis, characterization, thermophysical properties, stability and applications of nanoparticle enhanced phase change materials—A comprehensive review. *Thermal Science and Engineering Progress*. 28: 101049.
- [Amudhalapalli, Devanuri, 2024](#) – *Amudhalapalli, G.K., Devanuri, J.K.* (2024). Effect of fin configuration and orientation of latent heat storage system on the melting and solidification performance. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 238(5):1747-1759.
- [Boo et al., 2011](#) – *Boo, J.H., Lee, S.K., Kim, J.K.* (2011). Numerical analysis of a thermal storage system with inserted heat pipes for medium-high temperature range *The International Heat Pipe Symposium*.
- [Chinnasamy, Honghyun, 2022](#) – *Chinnasamy, V., Honghyun, C.* (2022). Thermophysical investigation of metallic nanocomposite phase change materials for indoor thermal management. *International Journal of Energy Research*. 46(6): 7626-7641.
- [Diao et al., 2019](#) – *Diao, Y.H. et al.* (2019). Numerical investigation of the thermal performance enhancement of latent heat thermal energy storage using longitudinal rectangular fins and flat micro-heat pipe arrays. *Applied energy*. 233: 894-905.
- [Dutkowski et al., 2022](#) – *Dutkowski, K. et al.* (2022). Influence of the Physical State of Microencapsulated PCM on the Pressure Drop of Slurry in a Circular Channel *Materials*. 15(19): 6719.
- [Feng, 2022](#) – *Feng, R. et al.* (2022). Experimental and numerical study on the cooling performance of heat pipe assisted composite phase change material-based battery thermal management system. *Energy Conversion and Management*. 272: 116359.
- [Gan, Hung, 2023](#) – *Gan, J.S., Hung, Y.M.* (2023). Remarkable thermal performance enhancement of micro heat pipes with graphene-nanoplatelet nano-wicks. *Nanomaterials*. 13(2): 232.
- [Giro-Paloma et al., 2019](#) – *Giro-Paloma, J. et al.* (2019). Microencapsulation of Phase Change Materials. *Applications of Encapsulation and Controlled Release*. CRC Press. 375-403.
- [Gupta, Rathod, 2023](#) – *Gupta, N., Rathod, M.K.* (2023). Numerical Investigation on Finned Latent Heat Storage Unit. *Recent Advances in Thermal Sciences and Engineering: Select Proceedings of ICAFFTS 2021*. Singapore: Springer Nature Singapore, 485-497.
- [Haya et al., 2020](#) – *Hayat, M.A. et al.* (2020). Phase change material/heat pipe and Copper foam-based heat sinks for thermal management of electronic systems. *Journal of Energy Storage*. 32: 101971.
- [Hoang et al., 2015](#) – *Hoang, H.-M. et al.* (2015). Heat transfer study of submicro-encapsulated PCM plate for food packaging application. *International Journal of Refrigeration*. 52: 151-160.
- [Höhlein et al., 2018](#) – *Höhlein, S., König-Haagen, A., Brüggemann, D.* (2018). Macro-encapsulation of inorganic phase-change materials (PCM) in metal capsules. *Materials*. 11(9): 1752.
- [Ibrahim et al., 2017](#) – *Ibrahim, N.I., et al.* (2017). Heat transfer enhancement of phase change materials for thermal energy storage applications: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 74: 26-50.

Jalil et al., 2022 – Jalil, J.M., Mahdi, H.S., Allawy, A.S. (2022). Cooling performance investigation of PCM integrated into heat sink with nano particles addition. *Journal of Energy Storage*. 55: 105466.

Kamkari, Shokouhmand, 2014 – Kamkari, B., Shokouhmand, H. (2014). Experimental investigation of phase change material melting in rectangular enclosures with horizontal partial fin. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 78: 839-851.

Khyad et al., 2016 – Khyad, A., et al. (2016). Energy storage with PCMs: Experimental analysis of paraffin's phase change phenomenon & improvement of its properties. *J. Mater. Environ. Sci.* 7(7): 2551-2560.

Kudachi et al., 2022 – Kudachi, Badal, et al. (2022). Experimental Study of PCM Based Latent Heat Thermal Energy Storage System Using Fins. *International Conference on Advances in Energy Research*. Singapore: Springer Nature Singapore.

Kumar et al., 2021 – Kumar, Anuj, et al. (2021). Numerical Simulation of PCM-Based Heat Sink with Plate Fins for Thermal Management of Electronic Components. *Theoretical, Computational, and Experimental Solutions to Thermo-Fluid Systems: Select Proceedings of ICITFES 2020*. Springer Singapore.

Li et al., 2015 – Li, W., Wang, Y.-H., Kong, C.-C. (2015). Experimental study on melting/solidification and thermal conductivity enhancement of phase change material inside a sphere. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 68: 276-282.

Liu, 2016 – Liu, Lingkun, et al. (2016). Thermal conductivity enhancement of phase change materials for thermal energy storage: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 62: 305-317.

Ma et al., 2023 – Ma, Fei, et al. (2023). A review on heat transfer enhancement of phase change materials using fin tubes. *Energies*. 16(1): 545.

Mahmood et al., 2022 – Mahmood, T. et al. (2022). Design and Fabrication of Microencapsulated Phase Change Materials for Energy/Thermal Energy Storage and Other Versatile Applications. *Nanocomposite Materials for Biomedical and Energy Storage Applications*. IntechOpen.

Mebarek-Oudina, Chabani, 2023 – Mebarek-Oudina, F., Chabani, I. (2023). Review on nano enhanced PCMs: insight on nePCM application in thermal management/storage systems. *Energies*. 16(3): 1066.

Nitsas, Koronaki, 2021 – Nitsas, M., Koronaki, I.P. (2021). Performance analysis of nanoparticles-enhanced PCM: An experimental approach. *Therm. Sci. Eng. Prog.* 25: 100963.

Parry et al., 2014 – Parry, A.J., Eames, P.C., Agyenim, F.B. (2014). Modeling of thermal energy storage shell-and-tube heat exchanger. *Heat Transfer Engineering*. 35(1): 1-14.

Patil, Chandrakishor, 2014 – Patil, R.M., Ladekar, C. (2014). Experimental investigation for enhancement of latent heat storage using heat pipes in comparison with copper pipes. *International Refereed J. of Engineering and Science*. 3(9): 44-52.

Rahim et al., 2022 – Rahim, N.C., et al. (2022). Designing a Solar Heat Storage System using Heat Pipe and Phase-Change Material (PCM). *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*. 91(1): 102-114.

Reay, 2015 – Reay, D.A. (2015). Thermal energy storage: the role of the heat pipe in performance enhancement. *International Journal of Low-Carbon Technologies*. 10(2): 99-109.

Şahan et al., 2015 – Şahan, N., Fois, M., Paksoy, H. (2015). Improving thermal conductivity phase change materials—A study of paraffin nanomagnetite composites. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 137: 61-67.

Santos, 2021 – Santos, Th. et al. (2021). Numerical Design and Laboratory Testing of Encapsulated PCM Panels for PCM-Air Heat Exchangers. *Applied Sciences*. 11(2): 676.

Sharifi et al., 2012 – Sharifi, N. et al. (2012). Heat pipe-assisted melting of a phase change material. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 55(13-14): 3458-3469.

Shchukina et al., 2018 – Shchukina, E.M. et al. (2018). Nanoencapsulation of phase change materials for advanced thermal energy storage systems. *Chemical Society Reviews*. 47(11): 4156-4175.

Tiari et al., 2015 – Tiari, S., Qiu, S., Mahdavi, M. (2015). Numerical study of finned heat pipe-assisted thermal energy storage system with high temperature phase change material. *Energy Conversion and Management*. 89: 833-842.

Tiari et al., 2017 – Tiari, S., Qiu, S., Mahdavi, M., Qiu, S. (2017). Experimental study of a latent heat thermal energy storage system assisted by a heat pipe network. *Energy Conversion and Management*. 153: 362-373.

Tyagi et al., 2014 – Tyagi, V.V. et al. (2014). Thermodynamics and performance evaluation of encapsulated PCM-based energy storage systems for heating application in building. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 115: 915-924.

Valizadeh, Torabi Angaji, 2020 – Valizadeh, S., Ehsani, M., Torabi Angaji, M. (2020). Preparation, characterization and thermal properties of PCM nanocapsules with polystyrene/nanographene oxide shell for energy storage. *Heat and Mass Transfer*. 56: 575-586.

Vallejo et al., 2018 – Vallejo, J.P., et al. (2018). Potential heat transfer enhancement of functionalized graphene nanoplatelet dispersions in a propylene glycol-water mixture. Thermophysical profile. *The Journal of Chemical Thermodynamics*. 123: 174-184.

Youssef et al., 2018 – Youssef, W., Ge, Y.T., Tassou, S.A. (2018). CFD modelling development and experimental validation of a phase change material (PCM) heat exchanger with spiral-wired tubes. *Energy conversion and management*. 157: 498-510.

Zhang et al., 2022 – Zhang, Juan, et al. (2022). Simulation of charging of PCM within a duct containing nanoparticles. *ZAMM-Journal of Applied Mathematics and Mechanics/Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*. 102.8: e202100375.

Zhang, 2020 – Zhang, C. et al. (2020). Numerical study on heat transfer enhancement of PCM using three combined methods based on heat pipe *Energy*. 195: 116809.

## Улучшение теплопроводности материалов с фазовым переходом: обзор методов

Альнассар Ашраф <sup>a, \*</sup>, Андрей Николаевич Makeev <sup>a</sup>

**Аннотация.** В настоящее время накопление тепловой энергии является важной задачей не только в традиционных теплоиспользующих энергосистемах для балансировки спроса и предложения энергии, но и системах возобновляемой энергетики, где производство энергии может варьироваться в весьма широких пределах. При этом скрытому накоплению тепловой энергии уделяется повышенное внимание. В основном это обусловливается высокой плотностью энергии, которую можно запасти в момент ее избыточной генерации и способностью поддерживать изотермический режим во время фазовых переходов. Это свойство делает материалы с фазовым переходом (МФП) особенно ценными в различных областях применения для хранения тепловой энергии. Одним из основных ограничений общей эффективности систем накопления тепловой энергии на основе МФП является относительно низкая теплопроводность используемого материала. Данное обстоятельство определяет скорость поглощения и выделения тепла в процессе фазового перехода, что в итоге значительно снижает область применения подобных накопительных систем. В настоящей статье не только рассматривается роль МФП в системах хранения тепловой энергии, но и определяются ключевые преимущества и различные инновационные стратегии для повышения теплопроводности МФП. Эти стратегии включают добавление ребер, использование наночастиц, внедрение тепловых трубок и методов инкапсуляции. Ожидается, что обозначенные разработки значительно улучшат практику устойчивого энергоменеджмента и будут способствовать более эффективному использованию возобновляемых источников энергии с использованием накопителей тепловой энергии на основе материалов с фазовым переходом. В подведении итогов исследования подчеркивается важность использования материалов с фазовым переходом для обеспечения устойчивого энергетического будущего, в котором накопление тепловой энергии является неотъемлемой частью функционирования энергетических систем.

**Ключевые слова:** скрытая теплота, накопление энергии, материалы с фазовым переходом, теплопроводность, инкапсуляция, наночастицы материалы, тепловые трубки.

\* Корреспондирующий автор

Адреса электронной почты: [ashrafnassar@yandex.ru](mailto:ashrafnassar@yandex.ru) (А. Ашраф)