

Ваньков Ю. В.  
Пономарев Р. А.  
Мурзаев А. С.

# **Многослойные аккумуляторы теплоты с фазовым переходом**

**Монография**

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Ю. В. Ваньков, Р. А. Пономарев, А. С. Мурзаев

## **МНОГОСЛОЙНЫЕ АККУМУЛЯТОРЫ ТЕПЛОТЫ С ФАЗОВЫМ ПЕРЕХОДОМ**

Монография

Санкт-Петербург  
Наукоемкие технологии  
2025

УДК 662.998

ББК 31.3

В17

Рецензенты:

*Андрей Владимирович Дмитриев* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автоматизация технологических процессов и производств» (АТПП) ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»;

*Александр Валерьевич Федюхин* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленных теплоэнергетических систем» (ПТС) Национальный исследовательский университет «МЭИ»

В17 Ваньков Ю. В., Пономарев Р. А., Мурзаев А. С. Многослойные аккумуляторы теплоты с фазовым переходом: монография / Ю. В. Ваньков, Р. А. Пономарев, А. С. Мурзаев. – СПб.: Научное издание, 2025. – 114 с.

ISBN 978-5-00271-060-7

Монография посвящена исследованиям повышения эффективности тепловых аккумуляторов с фазовым переходом. В качестве метода повышения эффективности рассмотрено использование нескольких *PCM* с различными теплофизическими параметрами одновременно при их многослойном расположении. Выполнен анализ существующих работ по тематике. Представлены методы описания процессов фазового перехода, основные уравнения и зависимости, а также методы оценки достоверности получаемых результатов. Описана методика проведения исследования. Произведена оценка достоверности экспериментальных данных. Представлено описание эффективности тепловых аккумуляторов при различных температурных режимах зарядки и изменении компоновок трех *PCM* – парафина, церезина и стеариновой кислоты. Сформулированы рекомендации по применению многослойных тепловых аккумуляторов.

Результаты исследования получены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания № 075-03-2025-458 от 17.01.2024 г.

Рекомендовано к изданию научно-техническим советом  
Казанского государственного энергетического университета

ISBN 978-5-00271-060-7

© Ваньков Ю. В., Пономарев Р. А., Мурзаев А. С., 2025

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ РАБОТ ПО ТЕМАТИКЕ ИССЛЕДОВАНИЯ .....	6
1.1 Область применения систем накопления тепловой энергии с <i>PCM</i> . Тепловые аккумуляторы с несколькими <i>PCM</i> . Применяемые материалы, геометрия и условия эксплуатации .....	6
1.2 Эффективность каскадных систем накопления тепловой энергии с <i>PCM</i> .....	11
1.3 Эффективность многослойных систем накопления тепловой энергии с <i>PCM</i> .....	21
ГЛАВА 2. МЕТОДЫ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ ПРОЦЕССОВ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА.....	33
2.1 Характеристика теплофизических параметров системы с фазовым переходом. Основные уравнения для составления теоретической модели .	33
2.2 Оценка интенсивности тепловых потерь системой. Оптимизация расчета. Энтропия системы.....	46
2.4 Методы оценки эффективности системы накопления тепловой энергии. Оценка достоверности измерений.....	52
ГЛАВА 3. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ, ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ И ВЫБОРА ИСПОЛЗУЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	57
3.1 Описание установки, комплектующих и выбора материалов .....	57
3.2 Описание методики исследований .....	64
3.3 Проверка и настройка оборудования. Оценка погрешности измерений ..	67
ГЛАВА 4. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ .....	76
4.1 Модель двухслойного теплового аккумулятора .....	76
4.2. Численная модель двухслойного каскадного аккумулятора «парафин-церезин» .....	84
4.3 Модель трехслойного теплового аккумулятора .....	89
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	102
ЛИТЕРАТУРА .....	104



## ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях развития энергетической отрасли актуальность приобретает проблема эффективного аккумулирования тепловой энергии. Одним из перспективных направлений решения данной проблемы является использование материалов с фазовым переходом (*PCM*), способных накапливать и отдавать значительное количество теплоты при изменении агрегатного состояния.

Тепловое аккумулирование энергии с использованием скрытой теплоты фазового перехода «твердое тело – жидкость» неорганических, органических соединений и эвтектических композиций открывает широкие возможности для повышения энергоэффективности различных производственных и бытовых систем. При этом многие аспекты разработки тепловых аккумуляторов с фазовым переходом остаются недостаточно исследованными.

Повышение эффективности систем аккумулирования/съема тепловой энергии достигается за счет разнообразных технологических решений, в том числе, методом одновременного использования нескольких *PCM* с различными значениями теплофизических параметров. Особую значимость приобретают вопросы оптимизации конструкций таких теплоаккумулирующих устройств, выбора совокупности рабочих сред с фазовым переходом и определения их термодинамических параметров в процессе эксплуатации (проведение экспериментальных и численных исследований). Предполагается, что информация, представленная в текущем издании, позволит снизить энергозатраты предприятий реального сектора экономики за счет использования альтернативных источников энергии и повысить эффективность работы существующего энергетического оборудования с помощью применения систем теплоаккумулирования/теплосъема с *PCM*.

Новизна исследования обоснована исследованием совокупности *PCM* не описанной в работах других авторов. Выбраны *PCM* с существенно большей разницей температур плавления. Исследуемые материалы представлены на

российском рынке и обладают существенно меньшей стоимостью относительно *PCM*, используемых в исследованиях зарубежных авторов.

Зарядка тепловых аккумуляторов проводилась при температурах, значительно выше температуры плавления *PCM*. Такой выбор температур нагрева обусловлен необходимостью изучения поведения выбранных *PCM* в более высокотемпературных системах.

Результаты исследования могут найти применение в системах солнечной энергетики, промышленных установках и других объектах, где рационально и перспективно использовать эффективное аккумулирование тепловой энергии.

## ГЛАВА 1. АНАЛИЗ РАБОТ ПО ТЕМАТИКЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 1.1 Область применения систем накопления тепловой энергии с *PCM*. Тепловые аккумуляторы с несколькими *PCM*. Применяемые материалы, геометрия и условия эксплуатации

В современном мире вопросы эффективного использования и аккумулирования энергии приобретают особую актуальность. В связи с увеличением численности населения и развитием технологий потребность в энергии постоянно растёт, что требует поиска новых решений для её рационального применения. Одним из перспективных направлений в этой области является использование материалов с фазовым переходом (*phase change materials* – *PCM*) для аккумулирования тепловой энергии. Эти материалы обладают специфическими свойствами, позволяющими эффективно накапливать и отдавать тепловую энергию, что делает их привлекательными для применения в сферах строительства, энергетики, а также системах охлаждения транспорта и микроэлектроники.

Ввиду того, что *PCM* имеют относительно низкие значения теплопроводности в твердой фазе (0,2–0,7 Вт/(м·К)), существует необходимость поиска способов интенсификации теплопередачи между теплоносителем и *PCM*. Основной задачей при создании теплообменного оборудования с использованием *PCM* становится разработка конструктивных решений, обладающих наибольшей экономической эффективностью.

Существует множество способов повышения эффективности тепловых аккумуляторов с *PCM*. Среди них часто встречаются: применение интенсификаторов теплообмена, таких как пористые пены из металлов с высокой теплопроводностью и наночастиц (в частности, кремния) и макро- и микроинкапсулирование *PCM* в полости различного объема для создания, так называемой, кажущейся пористости системы.

Кроме перечисленных методов, исследователями предлагается одновременно использовать несколько материалов с фазовым переходом при многослойном и каскадном расположении.

Использование нескольких *PCM* в системе является многообещающим методом повышения эффективности теплообменников с *PCM*. Данный метод повышения эффективности может способствовать увеличению количества накапливаемой аккумулятором тепловой энергии и расширить ее температурный диапазон. Известные исследования сосредоточены на целесообразности использования каскадных и многослойных *PCM* при изменении конструкционных параметров, параметров теплоносителя на входе в теплообменник, а также параметров и свойств используемых *PCM*. В работах представлены результаты исследований, сосредоточенных на изменении конструкции теплообменников (изменении количества ступеней с *PCM* и соотношения их объемов) и использовании *PCM* с различными значениями температуры плавления ( $T_m$ ), теплоемкости ( $C_p$ ) и теплопроводности ( $\lambda$ ).

Системы с многослойными и каскадными *PCM* могут способствовать значительному улучшению теплопередачи *PCM* при сохраненных значениях энтранса, энергии и эксергии, а также добиться повышения эффективности хранения энергии и эксергии по сравнению с одноступенчатыми системами с *PCM* [1]. *PCM* с относительно низкими  $T_m$  широко применяется для нагрева теплотой солнечного излучения, в то время как *PCM* с  $T_m$  более 90 °C чаще применяются в промышленных процессах, в энергетике и при съеме теплоты с конструктивных элементов высокотемпературных систем.

Баланс производительности системы в процессах зарядки и разрядки достигается, в большей степени, именно выбором совокупности *PCM* на основе их температур плавления. Использование в системах только одного *PCM* предполагает уменьшение характеризующей скорость теплопередачи в системе разницы температур между *PCM* и теплоносителем в направлении движения последнего. Внедрение в теплоаккумуляторы сразу нескольких *PCM* с различными  $T_m$  позволяет поддерживать практически постоянную разницу температур вдоль направления потока с течением времени [2].

Исследования эффективности теплоаккумуляторов с несколькими *PCM* проводились для материалов с фазовым переходом с различными

температурами плавления, внимание уделялось низкотемпературным *PCM* с  $T_m$  20–40°C, парафинам и кислотам с  $T_m$  50–120°C, фенолам с  $T_m$  150–200°C, нитратно-щелочным солям с  $T_m$  300–380°C, карбонатным солям с  $T_m$  400–500°C. Повышение эффективности теплопередачи в процессах зарядки и разрядки аккумуляторов при каскадном и многослойном расположении *PCM* для упомянутых материалов составляет 10–40%. Исследователями утверждается, что для получения максимальной эксергетической эффективности совокупность оптимальных  $T_m$  *PCM* должна быть экспоненциальной функцией осевого положения вдоль системы.

Значительное улучшение тепловых характеристик аккумуляторов с несколькими *PCM*, таких как скорость теплопередачи, количество запасенной энергии, равномерность теплового потока во времени в процессах зарядки и разрядки аккумуляторов, эксергетический КПД и др., ощутимо для количества ступеней в диапазоне 2–5, и лишь в некоторых исследованиях представлены методы повышения эффективности теплоаккумуляторов с большим числом ступеней. Такой эффект обуславливается двумя факторами. Во-первых, при использовании конструкций больше, чем с пятью ступенями, сохранение эксергии в результате достижения высокой теплопередачи, несущественно в сравнении с потерями в процессе теплообмена [3]. Во-вторых, увеличение количества ступеней усложняет конструкцию системы, увеличивает эксплуатационные расходы и вероятность аварии, хотя и способствует увеличению теплового КПД. Таким образом, термодинамические и экономические ограничения существенно снижают возможности модернизации теплоаккумуляторов с *PCM* с точки зрения изменения количества ступеней.

Исследования представленных в литературе моделей теплообменников позволяют утверждать, что оптимальный объем каждой ступени каскадной кожухотрубной системы должен быть обратно пропорционален времени плавления этой ступени. Таким образом, блок вблизи входа теплоносителя должен быть заполнен *PCM* с высокой  $T_m$  и низкой теплоемкостью, а  $T_m$  *PCM*

в блоке ниже по потоку должна быть ближе к температуре окружающей среды. Более высокий циклический КПД для систем с несколькими *PCM* с последовательным размещением ступеней достигим при большем, в сравнении с другими слоями, значении теплоемкости слоя, наиболее удаленного от входа теплоносителя [4].

Большие объемные доли *PCM* с низкой  $T_m$  могут значительно сократить время, необходимое для завершения фазового перехода общего объема *PCM*, но такое соотношение *PCM* способствует снижению количества саккумулированной/выделившейся теплоты в результате завершения процессов зарядки и разрядки аккумулятора.

Процесс перехода в жидкую фазу у *PCM* с наименьшей  $T_m$  происходит раньше, а дальнейший перегрев данного *PCM* только интенсифицирует теплообмен с *PCM*, имеющими большее значение температуры фазового перехода. Таким образом, доля жидкой фазы в общем объеме *PCM* в результате зарядки аккумулятора, а значит, и количество явной и скрытой теплоты в системах с каскадным расположением *PCM* во многом определяется разницей  $T_m$  последовательно расположенных материалов с фазовым переходом. Несмотря на то, что процессы перехода в жидкую фазу у *PCM* с различными значениями  $T_m$  происходят в разные временные отрезки, использование нескольких *PCM* позволяет добиться уменьшения времени плавления общего объема *PCM* [5].

Использование в системе нескольких инкапсулированных *PCM* с различными значениями  $T_m$  при наличии капсул различного диаметра также позволяет добиться повышения эффективности, которое, в большом количестве исследований, характеризуется количеством энергии, запасенной на единицу массы *PCM*. Численное значение разницы температур теплоносителя на входе и на выходе из теплообменника, в случаях с каскадным инкапсулированным и неинкапсулированным *PCM*, остается постоянным, в сравнении с использованием только одного вида *PCM*, на большем временном отрезке. Это подразумевает возможность достижения более высокой скорости

теплопередачи на протяжении зарядки аккумулятора, что способствует повышению эффективности рекуперации тепловой энергии [6].

При расположении капсул в порядке возрастания их диаметра по траектории движения теплоносителя характерно более раннее инициирование процесса плавления *PCM* [7]. Для объяснения такого эффекта стоит отметить, что для слоя с капсулами меньшего диаметра характерно более высокое соотношение площади поверхности к объему капсул, что способствует интенсификации теплообмена. Значение пористости слоя *PCM* с большим диаметром капсул существенно ниже, чем для слоя с более высоким значением плотности упаковки, а значит, граничному капсульному слою требуется меньше времени для плавления *PCM*. Расположение на дне резервуара капсул *PCM* с большим диаметром способствует уменьшению кондуктивного теплопереноса в процессе разрядки аккумулятора, что приводит к стабилизации температурного градиента по высоте резервуара после накопления тепловой энергии.

Очевидно, что в зависимости от области применения материалов с фазовым переходом рационально применять те *PCM*, чья температура плавления находится в диапазоне, близком к диапазону изменения температуры теплоносителя (греющей стенки), так как основной эффект теплоаккумулирования/тепловыделения при использовании *PCM* достигается по истечению процессов плавления/кристаллизации за счет скрытой теплоты.

Использование нескольких различных материалов с фазовым переходом позволяет эффективно использовать теплоаккумуляторы на большем диапазоне температур, что существенно расширяет область применения моделей аккумуляторов теплоты на основе *PCM*, что очень важно ввиду наличия часто встречающейся температурной нестабильности нагреваемых элементов промышленных систем и устройств [8]. Так, например, появляется возможность наиболее эффективно запасать теплоту от нагреваемых элементов промышленных систем и оборудования на всем протяжении эксплуатации при регулировании выдаваемой мощности (увеличении расхода

теплоносителя, количества оборотов двигателя и др.), что приводит к различному нагреву конструктивных элементов.

В материалах работы представлены результаты исследований, направленных на повышение эффективности накопления энергии теплоаккумуляторов с несколькими *PCM*, конструкцию которых, условно, можно разделить на каскадные и многослойные. Подразумевается, что в каскадных системах присутствует канал, по которому перемещается теплоноситель, который последовательно соприкасается с инкапсулированным *PCM* или *PCM*, расположенным по периферии канала. В каскадных системах слои *PCM* могут соприкасаться или не соприкасаться между собой, соответственно, в случае соприкосновения возрастает термический КПД ввиду дополнительной теплопередачи между слоями. В многослойных системах процесс теплопередачи происходит последовательно сначала от теплоносителя к первому слою *PCM*, от первого слоя ко второму и т.д., а теплоноситель не протекает между слоями.

## **1.2 Эффективность каскадных систем накопления тепловой энергии с *PCM***

Как правило, каскадные системы с *PCM* рационально использовать в совокупности с оборудованием, особенностью эксплуатации которого является присутствие одного или нескольких теплоносителей с различной температурой в различных «точках» оборудования (трубопроводы, холодильные системы и др.), что позволит последовательно омыwać набор нескольких *PCM* с сохранением наибольшего КПД. Большая площадь соприкосновения, в совокупности с методами улучшения теплообмена между теплоносителем и *PCM*, к которым относятся использование интенсификаторов теплообмена, разрушение пограничного слоя при течении жидкости и др. позволит грамотно определить наиболее эффективную конфигурацию системы по требуемым параметрам.



*Shamsi* с соавторами [9] подтвердили, что выбор *PCM* слоя, наиболее близкого к горячей стенке, определяется не только наивысшей  $T_m$ , но и достаточным значением теплоемкости, характеризующей дальнейший нагрев удаленных слоев *PCM*. Наибольшим значением теплоемкости должен обладать средний слой, так как в трехслойной вертикальной конструкции с применением солей  $KNO_3$ ,  $NaOH$  и  $ZnCl_2$ , именно он способен накопить наибольшее количество энергии под влиянием конвективного теплопереноса при изменении фазы нижнего слоя. Учитывая этот факт, проводилось исследование повышения эффективности теплового аккумулятора при изменении геометрических размеров контейнера среднего слоя *PCM*. Таким образом, при увеличении длины средней области с *PCM* приблизительно в 1,5 раза, удалось добиться увеличения количества запасенной тепловой энергии на 6%.

*Li* и др. предложен критерий расчета оптимальной температуры плавления по пороговым значениям температуры *PCM* на выходе, то есть по окончании зарядки теплового аккумулятора [10]. Руководствуясь этим критерием, было определено, что количество запасенной энергии в каскадной трехслойной системе может быть увеличено на 42% по сравнению с одноступенчатыми моделями аккумуляторов. Сообщается об отсутствии необходимости использования более 3 ступеней, так как теоретическое увеличение эффективности при увеличении числа ступеней для *PCM*  $Na_2CO_3 - K_2CO_3 - Li_2CO_3$  незначительно.

*Ren* и др. представили исследования, совмещающие несколько методов повышения эффективности тепловых аккумуляторов с *PCM* [11]. Так, в работе в качестве интенсификаторов теплообмена каскадной системы хранения теплоты используются частицы вспененного графита и ребра теплопередачи. Авторами численно определено компромиссное решение по количеству (геометрии) использованных материалов, позволяющее использовать перечисленные методы повышения эффективности при неизбежном сокращении количества *PCM*, а значит, и скрытой теплоемкости системы.

Определено, что каскадная модель аккумулятора с частицами графита, обладающая тремя ступенями, наиболее эффективна для высокотемпературного краткосрочного нагрева, в то время как модель с включением ребер теплопередачи при длительной зарядке позволяет добиться сокращения времени зарядки на 10 и 37 % по сравнению с использованием двухступенчатой модели и модели с одиночным *PCM*, а за равное время зарядки уменьшить среднюю разницу минимальной и максимальной температуры теплоносителя с 30 до 16 °C.

О достижении более однородной разницы температур также сообщается при каскадном расположении в качестве *PCM* гидрохинона и *d*-маннита, что позволяет обеспечить более высокую теплопередачу в течении более длительного периода [12]. Температуры фазового перехода используемых *PCM* составляли 155–162 °C и 165–172 °C. Геометрия контейнера представляла собой кожухотрубчатый теплообменник с большим значением площади поверхности соприкосновения труб с *PCM*. Численное значение повышения эффективности тепловых аккумуляторов с тремя слоями *PCM* *Peiró* и др. характеризуют как практически 20%-ое увеличение количества запасенной энергии по сравнению с одиночным *PCM*.

Особого внимания заслуживает исследование, в котором рассматривалась эффективность 45 вариантов компоновок слоев *PCM* в моделях аккумуляторов теплоты [13]. *Tehrani* и др. сообщают, что *PCM* с относительно низкими значениями температуры плавления имеют более высокую производительность зарядки, и хуже показывают себя при анализе отдаваемой теплоты при разрядке, в сравнении с высокотемпературными *PCM*. Сбалансированная производительность процессов зарядки/разрядки (одинаковое количество запасенной/отданной энергии после цикла) в каскадных системах достижима только при определенном для тепловой мощности нагрева разнице температур плавления. При создании аккумуляторов с *PCM*, обладающих максимально возможной циклической стабильностью, приоритетным является не определение количества ступеней

или объемного соотношения *PCM*, а выбор самой совокупности *PCM*. Установлено, что кожухотрубчатая модель аккумулятора, даже в случае использования наиболее энергоэффективной компоновки каскадной модели, достигает лишь 50%-ой эффективности баковой системы хранения (концентрические модели) при неизменном температурном режиме за равное время эксплуатации.

*Huang* и др. утверждают, что система с каскадной моделью блока *PCM* и емкостью, заполненной водой, может увеличить теплоаккумулирующую способность на 30%, по сравнению с одиночным баком воды для сохранения теплоты солнечного излучения. Кроме того, эффективность каскадной системы сравнивалась с моделью параллельного расположения *PCM* и бака с водой, а повышение эффективности описывается как увеличение количества запасенной энергии каскадной модели на 5 – 12 % [14]. Сравнительный анализ эффективности позволил сделать вывод, что максимальное количество запасенной энергии достигается внедрением 0,67–0,78 объемной доли *PCM* по отношению к объему воды при использовании *PCM* с  $T_m$  в диапазоне 40–50 °С.

*Kim* и др. были оценены теплофизические характеристики каскадных систем охлаждения. Сообщается, что в случае постоянного теплового потока при зарядке пиковая температура слоев *PCM* каскадных систем снизилась более чем на 13% по сравнению с одиночным блоком *PCM*. Время, необходимое для достижения максимально допустимой температуры, было сокращено в 2 раза. Таким образом, уменьшается вероятность отказа ввиду отсутствия длительного перегрева *PCM*, а срок службы системы увеличивается [15].

*Xi* и др. подтверждают, что число ступеней (слоев) *PCM*, имеющее наибольшую эффективность при практическом применении исследуемой системы не превышает трех. Утверждается, что наиболее важным аспектом для повышения эффективности аккумуляирования в многослойных аккумуляторах с *PCM* также является увеличение теплопередачи от одного слоя к другому [16]. Для интенсификации теплообмена предлагается

концентрическое расположение слоев *PCM* из-за увеличения площади соприкосновения. Авторы не рассматривают использование металлических пен из-за неизбежного уменьшения общего объема *PCM*, а значит, и количества аккумулированной системой тепловой энергии. Одним из наиболее значимых достижений авторов является определение диапазона изменения параметра теплопереноса *C* для температурных диапазонов нагрева, что позволяет охарактеризовать поведение функции температуры в зависимости от подводимой тепловой мощности.

Оптимизация скорости теплопередачи рассматривалась *Xi* и др. методом анализа генерации энтропии. Сообщается, что при теоретическом описании поведения аккумуляторов теплоты, необходимо использовать различные параметрические уравнения. Так, в случае исследования процесса зарядки, для процессов теплопередачи следует использовать энтропию, в то время как для анализа оптимизации каскадного (многослойного) хранения тепловой энергии при расчете итоговых значений аккумулированной теплоты необходимо учитывать диссипацию энтранса, являющуюся мерой необратимости теплообмена [17].

#### *Справка*

Термин «диссипация энтранса» встречается преимущественно в инженерных работах, посвящённых оптимизации теплообменных устройств.

Это технический показатель, используемый при расчёте эффективности теплопередачи. В теплообмене «диссипация энтранса» описывает потери термодинамической эффективности из-за:

- конечной разности температур между теплоносителями;
- гидравлического сопротивления потоку (потери давления);
- необратимых процессов в потоке жидкости/газа.

Это мера того, насколько реальный процесс теплообмена отклоняется от идеального (обратимого) из-за трения, перемешивания, неравномерности температур и прочих необратимых явлений.

Функция диссипации энтранса *E* представляется как сумма двух компонентов:

$$E = E_T + E_P$$

где

$E_T = \frac{1}{2} m c_p (T_{\text{in}}^2 - T_{\text{out}}^2)$	вклад от неоднородности температурного поля;
$E_P = m \frac{\Delta P}{\rho} \cdot \frac{T_{\text{in}} - T_{\text{out}}}{\ln T_{\text{in}} - \ln T_{\text{out}}}$	вклад от потерь давления $\Delta P$ при течении;
$m$ —	массовый расход теплоносителя;
$c_p$	удельная теплоёмкость при постоянном давлении;
$T_{\text{in}}, T_{\text{out}}$	температуры на входе и выходе;
$\rho$	плотность жидкости;
$\Delta P$	перепад давления.

Для анализа эффективности вводят **безразмерный критерий диссипации энтрпаса**:

$$E^* = \frac{E}{Q(T_2 - T_1)},$$

где:

- $Q$  — фактический тепловой поток;
- $T_1, T_2$  — входные температуры холодного и горячего теплоносителей.

При этом  $E^* < 1$ , и чем меньше  $E^*$ , тем ближе процесс к идеальному (меньшие потери).

*Cheng* и др. рассматривали множественный каскадный переход для накопления холодной тепловой энергии. Определено, что для равномерного распределения инкапсулированных *PCM* в объеме имеющегося аккумулятора наиболее рационально использовать 3–5 ступеней с разницей температур фазового перехода в 6 °C [18]. Описанная компоновка слоев позволяет добиться сокращения времени зарядки на 15,1% по сравнению с одноступенчатым блоком, в то время как количество аккумулированного холода остается практически равным однослойному блоку. Стоит отметить, что, полученный результат во многом объясняется дополнительным

изменением кажущейся пористости слоев *PCM*, достигаемой изменением диаметра гранул.

Циклическое поведение системы хранения тепловой энергии на основе металгидрида, окруженного каскадными *PCM*, рассматривалось *Alqahtani* и др. при использовании различного объемного соотношения *PCM* с  $T_m$ , равными 591 и 580 К [19]. Каскадная конструкция с двумя *PCM* позволила добиться подходящего температурного режима, а сокращение времени гидрирования и дегидрирования сократилось на 26 и 51% соответственно, по сравнению с процессом, использующим одиночный *PCM*.

Отдельного внимания заслуживает модель теплового аккумулятора, представленная *Elbahjaoui* с соавторами, геометрия которой заключается в концентрическом расположении нескольких *PCM* с двусторонним подводом тепловой энергии теплоносителя [20]. Исследовалась эффективность системы охлаждения фотоэлектрических модулей. Совокупность использованных *PCM* с температурой фазового перехода, отличающегося на 20 °С, при изменении сечения полостей, заполненных теплоносителями и *PCM*, а также их длины, позволили добиться уменьшения времени, требующегося для начала фазового перехода общего объема *PCM* при неизменном температурном режиме зарядки практически в 2 раза. Общее количество скрытой и явной тепловой энергии отличается несущественно, но несколько больше для каскадного аккумулятора.

*Teamah* и др. рассмотрели потенциал применения каскадных систем с *PCM* для обеспечения нужд системы ГВС, нагреваемой теплотой солнечного излучения [21]. Процесс теплообмена обеспечивался коллектором, функционирующим по принципу рекуперативного теплообменника. Было обнаружено, что каскадирование четырех 75-литровых баков, содержащих *PCM* с температурами плавления 54 °С, 42 °С, 32 °С и 16 °С, позволяет полезно использовать такую же долю солнечной энергии, как у бака, содержащего исключительно воду объемом 630 л. Практическая значимость заключается в сокращении требуемого общего объема системы *PCM* – вода более чем на 50%.

*Park* и др. представили исследование процесса зарядки тепловых аккумуляторов при неустойчивых температурных режимах теплоносителя [22]. Проводился анализ эффективности трех баков, заполненных различными *PCM*, общим объемом 834 литра при различной конфигурации подвода теплоносителя. Определено, что система с подводом теплоносителя, последовательно проходящим через баки с *PCM*, и дополнительным подводом теплоносителя к второму и третьему резервуару, позволяет увеличить количество запасенной энергии на 33%, по сравнению с тремя баками, заполненными высокотемпературным *PCM*. Время, затраченное на аккумуляцию одинакового количества теплоты наиболее выгодной компоновкой по сравнению с компоновкой на основе одного вида *PCM*, уменьшилось на 47%.

*Hasan* и др. сообщают о сокращении времени зарядки теплового аккумулятора с каскадным *PCM* на 39% по сравнению с моделью, использующей лишь один *PCM* [23]. Утверждается, что при увеличении длины каскадно используемых ступеней *PCM* наблюдается значительное улучшение теплопередачи. Авторами оценено влияние скорости теплоносителя, в качестве которого использовался нагретый воздух, на разницу температур теплоносителя на входе и на выходе из системы. По диаграмме температурного поля, полученного в результате численных расчетов, определено, что каскадное расположение *PCM* способствует более равномерному распределению высоких температур вблизи горячей стенки по направлению движения теплоносителя.

*Li* и др. сравнивали количество запасенной энергии одно- и двухступенчатыми накопителями с *PCM* для сбора и использования теплоты дымовых газов. Экспериментальные исследования проводились с использованием дизельного двигателя *DGS*. Результаты показали, что накопитель с одним *PCM* способен сохранить 56,4% энергии и 48,3% эксергии входящего дымового газа, тогда как интеграция низкотемпературного модуля в систему позволила повысить эффективность хранения до тепловой энергии

до 62,3% и эксергии до 50,8%. Установлено, что включение третьей ступени несущественно повышает эффективность системы, по сравнению с теплоаккумулятором с двумя *PCM* [24]. Сделан вывод, что, при доказанной эффективности использования одного *PCM*, каждая последующая ступень, начиная со второй, нуждается в оценке экономической целесообразности, так как требует затрат на изготовление и включение в технологию процесса.

*Mawire* и др. представили исследование, в котором особое внимание уделяется определению значения стратификации, то есть распределения разницы температур *PCM* по высоте теплового аккумулятора при каскадном расположении [25]. При увеличении количества слоев *PCM* с 1 до 3 наблюдается увеличение среднего значения стратификации до 30%. Кроме того, трехслойная модель системы обладала более высокой скоростью накопления тепловой энергии при исследовании зарядки на температурах 260, 280 и 300 °C при изменении скорости теплоносителя по сравнению с одиночным *PCM*, и двухслойной моделью (на 4 и 30% выше соответственно). Для исследуемого диапазона температур зарядки трехслойного аккумулятора минимальной стоимости системы соответствует использование в качестве *PCM* каскадных капсул эвтектического припоя *Sn63Pb37*, эритрита и адипиновой кислоты.

*Khor* и др. уделяли внимание исследованию циклической стабильности *PCM* при многократной перезарядке тепловых аккумуляторов с уплотненным слоем [26]. Утверждается, что высокая циклическая эффективность достигается при использовании определенного соотношения геометрических размеров контейнеров в каждом температурном диапазоне зарядки, что, позволяет добиться приблизительно равного времени зарядки для слоев при использовании нескольких *PCM*. Представленные методы расчета геометрии контейнеров, основанные на оптимизированном масштабировании, позволяют достигнуть отношения времени зарядки к времени разрядки, обратно пропорционального циклической эффективности, близкой к единице.



Одновременное использование нескольких гранулированных каскадно расположенных *PCM* способно сократить время зарядки аккумулятора на 17-32% по сравнению с использованием одиночного *PCM*. *Elfeku* и др. представили результаты исследования, направленные на повышение эффективности теплоаккумулятора для термоклинного резервуара тепловой электростанции [27]. В модели аккумулятора использовались высокотемпературные *PCM* с температурами плавления выше 382,1 °С. В качестве теплоносителя, передающего энергию слоям гранул с *PCM*, использовался раствор расплавленной соли. Утверждается, что одна из рассмотренных компоновок слоев *PCM* позволяет добиться значения энергетической эффективности  $\eta$  равного 0,97 для процесса зарядки и 0,85 – для разрядки аккумулятора.

*Sodhi* и др. провели исследования по повышению эффективности теплоаккумуляторов с *PCM*, температуры плавления которых составляют 360, 355,8 и 305,4 °С [28]. Геометрия модели контейнера создана по принципу ректификационной колонны и имеет несколько этажей с тарелками (ребрами) для увеличения теплопередачи. В ранее представленных работах авторы подтвердили эффективность геометрии и размеров контейнера, когда исследовалась эффективность одиночного *PCM*. Эффективность численно рассчитывалась для нескольких температурных режимов теплоносителя, протекающего вдоль оси цилиндрического многослойного контейнера. Сообщается, что система с тремя *PCM* способна запастись большее количество энергии, чем с одиночным *PCM* за равный промежуток времени. Одновременное использование нескольких *PCM* вместе с неравномерным распределением ребер теплопередачи в общем объеме контейнера позволило сократить время плавления и затвердевания *PCM* на 30% и 9% соответственно.

Исследования, направленные на сокращение времени зарядки аккумулятора с помощью различного расположения *PCM*, представленные *Elsanusi* с соавторами, позволяют утверждать, что, в зависимости от каскадной компоновки *PCM* относительно траектории движения теплоносителя

(компоновка с одним *PCM*, последовательная и параллельная компоновки с тремя *PCM*), механизмы теплообмена оказывают различное влияние на время плавления. Таким образом, вклад естественной конвекции для последовательного расположения оказался значительнее, в то время как при параллельном расположении больший вклад приносит механизм кондукции [29]. Вариант с последовательным расположением *PCM* при уменьшении температуры их плавления по мере удаления от греющей стенки оказался наилучшим для хранения энергии. Данная компоновка позволила достигнуть сокращения времени полного плавления на 15,5% по сравнению с вариантом компоновки из одного *PCM*.

### **1.3 Эффективность многослойных систем накопления тепловой энергии с *PCM***

Многослойные системы, в отличие от каскадных, не обладают сложностью конструкции, монтажа и внедрения в технологический процесс. Отсутствие каналов для теплоносителя способствует снижению КПД системы ввиду уменьшения площади теплообмена. Но устройства могут устанавливаться в условиях ограниченного объема на уже эксплуатируемое оборудование (закрытые вентиляционные установки, трубчатые теплообменники, паропроводы, конденсатные насосы, поверхности деаэратора и др.) без изменения технологической схемы и эксплуатационных параметров с минимальным количеством подготовительных мероприятий.

Исследования, представленные *Galione* и др. [30], содержат информацию, что система теплового аккумулятора с многослойным *PCM* уменьшает высокую термодинамическую деградацию, существенно влияющую на процесс теплопередачи и аккумулирования энергии в случаях использования только одного *PCM*. Таким образом, многослойные аккумуляторы позволяют повысить эффективность использования тепловой мощности охлаждаемой системы. Численные исследования зарядки аккумуляторов с изменением соотношения используемой совокупности *PCM* позволили добиться

увеличения значения удельной сохраненной энергии (с 65 до 84%) при уменьшении количества (массы) используемых *PCM* на 80 и 28% для рассматриваемых моделей системы хранения энергии.

В литературе представлены модели многослойных теплоаккумуляторов с *PCM* для остекления фасадов и крыш зданий. Результаты одной из работ показывают, что при исследовании совокупности компоновок слоев *PCM*/воздух именно толщина слоя *PCM* имеет решающее значение на изменение теплового поведения системы [31]. Результаты, полученные при изменении свойств используемого *PCM* (с температурами плавления 16-18 °C и 20-22 °C) не оказали существенного влияния на процесс теплопередачи, разницу температур внутренней и внешней поверхностей слоев воздушной массы и количество запасенной энергии. Представленная *Liu* и др. модель аккумулятора способна снизить теплопотребление здания и улучшить тепловой комфорт помещений.

Определение эффективности зарядки и разрядки аккумулятора с *PCM* проводилось *Sadeghi* и др. с помощью численной модели для коаксиальных цилиндров. Для всех случаев компоновок из семи различных *PCM* с температурами плавления 304 – 343 К определено соотношение количества сэкономленной энергии к объему подведенной теплоты [32]. Анализ результатов позволил сделать вывод, что, в случае однослойного *PCM RT65*, система может сэкономить 23,28% входной энергии, в то же время, при определенной толщине и расположении трехслойного *PCM* количество сэкономленной энергии аккумулятором достигает значения 41,67%. Авторы сообщают, что расположение *PCM* со значениями температуры плавления, уменьшающимися по мере удаления от горячей стенки, способствует увеличению доли жидкой фракции в процессе зарядки аккумулятора. В исследовании имеется методическая информация по определению наиболее эффективной конструкции теплоаккумулятора в зависимости от потребностей в сборе низкопотенциальной теплоты (сокращение времени зарядки/увеличение количества сохраненной теплоты).

Использование трех *PCM* с температурами плавления 299 – 316 К способно увеличить время плавления общего объема *PCM* на 18% по сравнению с моделью аккумулятора с одиночным *PCM*. Данный факт можно использовать для регулирования температуры фотоэлектрических модулей. *Mahdi* и др. представили результаты исследования влияния расположения теплоаккумулятора в пространстве (под углами 30, 60 и 90° к горизонту) с различными компоновками *PCM* на мгновенную долю жидкой фазы. Сообщается, что уменьшение угла наклона, в дополнение к трехслойной компоновке, увеличивает потенциал терморегулирования модулей за счет сокращения времени плавления общего объема *PCM* при сокращении временного интервала начала плавления слоев. Авторы сообщают о необходимости проведения дальнейших исследований с применением интенсификаторов теплообмена (наночастиц и пористых пен) для определения наибольшей эффективности исследуемой модели аккумулятора [33].

*Abandani* и др. с помощью численного моделирования исследовали эффективность использования нескольких *PCM* для компенсации их низкой теплопроводности и сокращения времени зарядки аккумулятора [34]. Модель теплового аккумулятора представляла из себя шайбу, объем которой ограничен двумя концентрическими окружностями. Теплота подводилась к поверхностям внутренней и наружной окружностей одновременно. Результаты показали, что для данной геометрии аккумулятора компоновка с тремя *PCM*, температура плавления которых находится в диапазоне 330-340 К, способствует снижению скорости плавления общего объема *PCM* по сравнению с единичным *PCM*. Время зарядки аккумулятора с внедренной металлической пеной для трехслойной компоновки меньше, чем при использовании одного *PCM* на 14,6%, что при большем объеме *PCM* может оказать существенное влияние на сокращение времени зарядки и эффективность сбора низкопотенциальной теплоты.

*Sefidan* и др. в целях обеспечения равномерности мгновенного распределения жидкой фазы в общем объеме *PCM* для повышения

эффективности передачи запасенной теплоты численно моделировали различные конструкции теплоаккумуляторов при изменении их конструктивных параметров. Представлены расчеты для различных компоновок теплоносителя с двумя *PCM*, с различной толщиной слоев *PCM*, с различным количеством ребер теплопередачи и значением их длины. Согласно результатам, использование двух *PCM* (*RT 35* и *RT 50*) способствует более равномерному и одновременному процессу затвердевания *PCM*. Включение *PCM* с более низкой температурой плавления в сектор, близкий к горячей поверхности, обеспечивает сокращение времени затвердевания *PCM* и разрядки аккумулятора [35].

*Pasupathy* и др. занимались исследованием, направленным на уменьшение колебаний температуры воздуха внутри помещения для всех сезонов года [36]. Утверждается, что использование панелей с двухслойным *PCM* позволяет эффективно запастись теплоту во время ее избытка и передавать ее при суточном периодическом снижении температуры. По значениям средней мощности солнечного излучения (г. Ченнаи, Индия) определено, что температура внешнего слоя *PCM* должна быть как минимум на  $6 - 7$  °C выше средней температуры окружающей среды для обеспечения полного затвердевания *PCM* и, соответственно, сохранения циклической эффективности.

Эффективная система терморегулирования является условием безопасной эксплуатации и увеличения срока службы электромобилей. Многослойное расположение трех *PCM* позволило снизить максимальное значение температуры и разницу распределения температур на поверхности аккумулятора на  $13,6$  и  $2,5$  °C по сравнению с системой без *PCM* соответственно. *Kang* и др. представили оптимальные геометрические размеры комплектующих системы, при которых обеспечиваются самые низкие значения максимальной температуры, составляющей  $T_{max} = 43,02$  °C [37].

*Moraga* и др. сообщают, что использование многослойной системы с *PCM* позволило снизить максимальную температуру аккумулятора гоночного

автомобиля на 23,2 °C [38]. Использование трех слоев *PCM*, чьи значения  $T_m$  отличаются незначительно, а теплота плавления находится в диапазоне 153 – 254 Дж/кг, является перспективным способом терморегулирования аккумуляторов электромобилей и небольших транспортных средств, где важными факторами являются ограниченное пространство, вес и аэродинамическая составляющая. Многослойная конфигурация способствует более раннему инициированию процесса фазового перехода и равномерному распределению температурных полей *PCM* в двухфазном состоянии.

*Jilte* и др. представили исследование, в котором сравнивалась эффективность радиального и каскадного расположения нескольких *PCM* [39]. Руководствуясь полученными данными по распределению температур на литиевой батарее, авторы сделали вывод, что радиальной ориентации *PCM* соответствует наименьшая температура батареи при расположении *PCM* с наименьшей  $T_m$  в качестве наиболее близкого к батарее слоя. Многослойная компоновка позволила добиться уменьшения разницы температуры батареи в процессе эксплуатации до 5 °C при температуре окружающей среды в 30 °C.

*Song* и др. с помощью численного моделирования сравнивали эффективность использования одинарной и двухслойной конфигураций системы терморегулирования литий-ионного аккумулятора [40]. Авторы утверждают, что использование двух слоев *PCM* позволяет лучше адаптироваться к температуре окружающей среды. В качестве дальнейшего способа увеличения эффективности системы было решено использовать комбинирование использования многослойного *PCM* с воздушным охлаждением. Анализ моделирования позволил сделать вывод, что  $T_{max}$  снизилась на 21% по сравнению с одиночным *PCM*, а комбинирование методов позволяет поддерживать однородность температуры корпуса аккумулятора с разницей 2,5 °C.

Графические материалы, характеризующие геометрию контейнеров, с *PCM* представлены в табл. 1.1. В ней содержится информация о эффективности

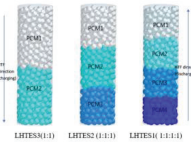
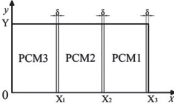
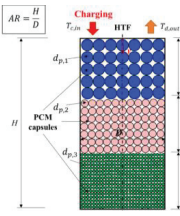
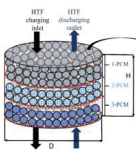
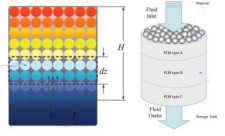
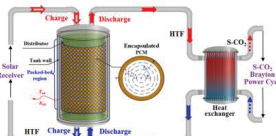
представленных в литературе моделей систем аккумулирования/отвода теплоты с несколькими РСМ.

Данные исследования должны сопровождаться анализом предполагаемого срока службы таких систем.

Определенная в исследованиях эффективность тепловых аккумуляторов с несколькими РСМ при единичной зарядке (либо при небольшом повторении циклов) меньше значения циклической эффективности ввиду деградации РСМ. РСМ обладают стабильными теплофизическими свойствами на температурах, превышающих  $T_m$ , только при непродолжительном воздействии высоких температур. Кроме того, продолжительный нагрев способствует различному поведению при образовании кристаллической решетки в процессе кристаллизации, что приводит к сдвигу температур плавления/кристаллизации и большему сдвигу этих температур относительно друг друга.

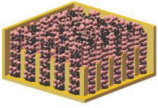
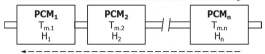
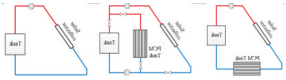
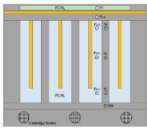
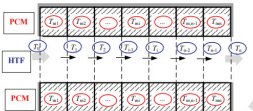
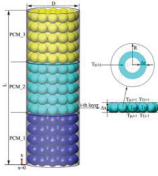
Разработка более эффективных теплообменников требует дополнительных исследований по поиску оптимального объемного соотношения РСМ с различными  $T_m$  и определению оптимальной подводимой тепловой мощности. Несмотря на то, что авторы представленных в литературе исследований пришли к единому мнению относительно способов решения некоторых проблем проектирования теплоаккумуляторов с каскадным и многослойным расположением РСМ, анализ теплового поведения экспериментальных и численных моделей теплообменников не позволяет универсализировать подбор оптимальных параметров комплектующих системы.

Таблица 1.1 – Геометрия систем теплосъема с *PCM* и их эффективность в материалах представленных исследований

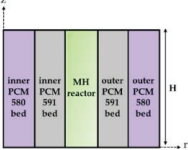
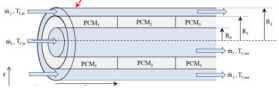
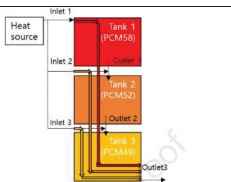
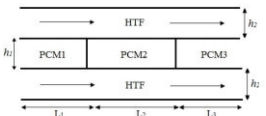
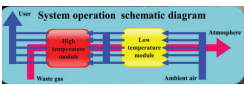
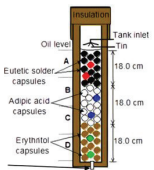
Изображение конструкции системы	Количество слоев (ступеней)	Полученные результаты в повышении эффективности	Источник
	4	<p>Увеличение количества запасенной энергии на 20%.</p> <p>Улучшение мощности тепловыделения на 33%.</p> <p>Увеличение энергетической эффективности на 30%.</p>	Zhang и др. [3]
	3	<p>Сокращение времени зарядки до 45%.</p> <p>Улучшение теплового потока через нагревательную стенку для многослойной конструкции до 30%.</p>	Li и др. [5]
	3	<p>Стабилизация температурного градиента по высоте резервуара для инкапсулированного <i>PCM</i>.</p> <p>Представлены оптимальные значения скорости потока теплоносителя при совокупности используемого диаметра гранул.</p> <p>Сокращение времени зарядки на 15,6 – 30,3 % в зависимости от конфигурации системы (собственный расчет по графическим материалам авторов).</p>	Majumdar и др. [7]
	3	<p>Увеличение коэффициентов емкости и хранения энергии трехуровневой модели теплообменника с 85,8 до 87,3% и с 85,6 до 87,4% соответственно при изменении диаметра капсул с 0,6 до 0,1 см.</p>	Mao и др. [8]
	3	<p>Увеличение количества запасенной энергии на 5,12%.</p> <p>Увеличение теплопередачи от теплоносителя к <i>PCM</i> при длительной зарядке.</p> <p>Увеличение КПД возврата энергии в процессах зарядка/разрядка до 96%.</p>	Shamsi и др. [9]
	3	<p>Увеличение коэффициента эффективного использования объема <i>PCM</i> при использовании трехступенчатой модели с 16 до 84%.</p> <p>Более раннее инициирование процесса плавления.</p>	Li и др. [10]



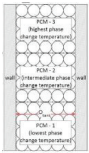
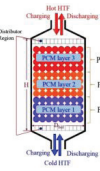
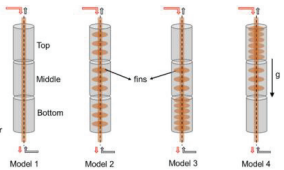
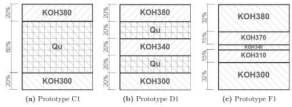
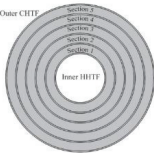
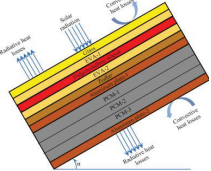
Продолжение таблицы 1.1

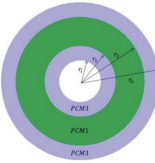
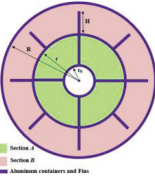
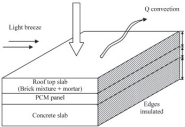
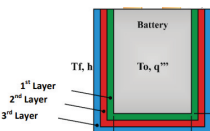
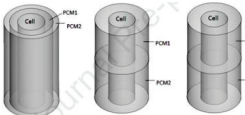
	3	<p>Сокращение времени плавления объема <i>PCM</i> до 30%.</p> <p>Сокращение времени зарядки до 37% при использовании ребер теплообмена.</p> <p>Уменьшение разницы максимальной и минимальной температуры <i>PCM</i> по высоте емкости с 30 до 16 °С.</p>	Ren и др. [11]
	до 5	<p>Среднее увеличение эффективности теплового аккумулятора превышает 19%.</p> <p>Уменьшение разницы температур <i>PCM</i>, улучшение теплопередачи на всем протяжении зарядки/разрядки.</p> <p>Увеличение количества запасенной энергии на единицу массы более, чем на 35%.</p>	Peiró и др. [12]
	2	<p>Эффективность запасания энергии на 5 – 12 % выше в модели последовательной системы хранения с несколькими <i>PCM</i> по сравнению с параллельной. Использование дополнительного бака с <i>PCM</i> позволило увеличить КПД солнечной энергии до 24%.</p>	Huang и др. [14]
	4	<p>Увеличение эффективности и производительности охлаждения на 13,1 и 45,0% соответственно.</p> <p>Достижение лучшей равномерности температурных полей <i>PCM</i> в многоступенчатой конструкции.</p>	Kim и др. [15]
	до 10	<p>Увеличение эксергетической эффективности с 0,6 до 0,85.</p> <p>Увеличение термического КПД системы на 28%.</p> <p>Уменьшение дельты разниц температур между <i>PCM</i> и теплоносителем по длине канала.</p>	Xu и др. [16]
	5	<p>Сокращение времени зарядки на 44% при снижении эффективности использования энергии на 10% при увеличении расхода теплоносителя с 50 до 250 л/ч.</p> <p>Сокращение времени зарядки без снижения эффективности до 15%.</p>	Cheng и др. [18]

Продолжение таблицы 1.1

	4	Сокращение времени зарядки и разрядки (процессов гидрирования и дегидрирования) составило 16 и 30%, а также 26 и 51% для многослойных односторонней и двухсторонней конфигураций <i>PCM</i> соответственно.	Alqahtani и др. [19]
	3	Сокращение времени зарядки системы составило более 22%. Достижение более равномерного возрастания средней температуры <i>PCM</i> . Увеличение общего коэффициента теплопроводности слоев <i>PCM</i> , основываясь на уменьшении температуры теплоносителя на выходе. Увеличение количества запасенной скрытой теплоты.	Elbahjaoui и др. [20]
	3	Увеличение количества запасенной и отданной тепловой энергии на 33 и 44% соответственно Обеспечение равномерности возрастания/убывания функции теплового потока от времени. Увеличение количества запасенной энергии более, чем на 16%.	Park и др. [22]
	3	Уменьшение времени зарядки на 27% по сравнению с системой с единичным <i>PCM</i> . Сокращение времени разрядки на 5 – 8 %. Достижение равномерности распределения температуры на периферии канала теплоносителя.	Hasan и др. [23]
	2	Конфигурация с двумя блоками <i>PCM</i> может способна увеличить среднюю эффективность хранения энергии на 28,7%, по сравнению с одиночным <i>PCM</i> . На протяжении процесса зарядки (5,5 ч) 56,4% тепловой энергии дымовых газов может быть сохранена системой с двумя <i>PCM</i> . Добились равномерной теплоотдачи на протяжении процесса разрядки аккумулятора. Увеличение теплового КПД дизельного двигателя с 35,8 до 41,9%.	Li и др. [24]
	3	Увеличение эксергетической и энергетической мощностей трехступенчатой системы по сравнению с одноступенчатой системой на 10% и 3% соответственно. Улучшение стратификации в конструкции с двумя и тремя <i>PCM</i> .	Mawire и др. [25]

Продолжение таблицы 1.1

	3	<p>Сокращение времени зарядки до 23% по сравнению с единичным <i>PCM</i>. Уменьшение количества используемых в системе капсул с 15000 до 5300 при незначительном снижении циклической эффективности. Достижение циклической эффективности в 73,8% от единичного цикла.</p>	Khog и др. [26]
	3	<p>Результаты исследования позволяют определить совокупность наиболее эффективных <i>PCM</i> (а именно их <math>T_m</math>) по температуре теплоносителя на входе и выходе из системы. Увеличение энергетической эффективности с 55 до 83% при трехуровневой нагрузке.</p>	Elfeky и др. [27]
	3	<p>Сокращение времени плавления и затвердевания на 24,5 и 16,5% соответственно при использовании трех <i>PCM</i> по сравнению с одиночным <i>PCM</i>. Внедрение интенсификаторов теплообмена (ребер) позволило дополнительно уменьшить время зарядки и разрядки на 30 и 9% по сравнению с одиночным <i>PCM</i> без использования интенсификаторов теплообмена.</p>	Sodhi и др. [28]
	5	<p>Добились увеличения теплового КПД с 65 до 84% при сокращении количества используемого <i>PCM</i> на 20%. Система с пятью слоями <i>PCM</i> позволила добиться увеличения количества запасенной энергии на 20%.</p>	Galione и др. [30]
	5	<p>Система с 5 слоями <i>PCM</i> способна запасти на 20% больше теплоты, по сравнению с однослойной моделью. Увеличение количества жидкой фракции <i>PCM</i> за равный временной промежуток позволяет утверждать о сокращении времени зарядки аккумулятора при увеличении количества используемых <i>PCM</i>.</p>	Sadeghi и др. [32]
	3	<p>Увеличение емкости хранения при трехслойной компоновке на 3,4%. Увеличение теплового управления до 33% по сравнению с единичным <i>PCM</i>. Увеличение времени зарядки на 18% при увеличении угла наклона системы до 90°. Увеличение эффективности выработки э/э при трехслойной компоновке с 14,6 до 15,0%.</p>	Mahdi и др. [33]

	3	<p>Увеличение эффективности на 11,6 и 4,8% при значениях пористости 0,96 – 0,94 и 0,97 – 0,93 соответственно. Сокращение времени плавления трехслойной компоновки с металлической пеной по сравнению с однослойной на 14,6%.</p>	Abandani и др. [34]
	2	<p>Увеличение доли жидкой фракции и раннее инициирование процесса плавления при комбинировании многослойного PCM и ребер теплообмена. Увеличение скорости затвердевания при использовании двух PCM по сравнению с конфигурациями.</p>	Sefidan и др. [35]
	2	<p>Улучшение терморегулирования в помещении за счет использования двух PCM. Возможность управления и оптимизации системы за счет использования нескольких PCM с различными параметрами. Ускорение плавления общего объема PCM до 15%.</p>	Pasupathy и др. [36]
	3	<p>Снижение максимальной температуры батареи во время эксплуатации на 10°C. Уменьшение средней температуры корпуса батареи за счет раннего инициирования и ускорения плавления PCM при трехслойной компоновке. Сохранение эффективности отвода теплоты различных компоновок при изменении толщины слоя PCM.</p>	Moraga и др. [38]
	2	<p>Уменьшение дельты температуры нагрева батареи до 6°C. Улучшение теплопередачи от центра к периферии. Использование двух PCM способствует более раннему инициированию процесса плавления по высоте ячейки. Увеличение доли жидкой фракции при использовании PCM с наибольшей теплопроводностью и наименьшей теплоемкостью в качестве верхнего слоя.</p>	Jilte и др. [39]

Используемые при создании многослойных и каскадных аккумуляторов PCM имеют достаточно высокую стоимость, а внедрение таких систем в технологические процессы часто не обосновано с экономической точки зрения. Применяемые в литературе PCM достаточно агрессивны по

отношению к металлам, часто требуют применения средств защиты, а утилизация требует дополнительных затрат на реагенты нейтрализации. Немногочисленные исследования при использовании тепловых аккумуляторов с более доступными на рынке РСМ не обладают достаточной информацией, позволяющей свободно применять средства аккумулирования/съема теплоты в существующих промышленных и энергетических процессах и использовать аккумуляторы в целях обеспечения нужд бытового хозяйства. Кроме того, интерес вызывает оценка экономической целесообразности интегрирования теплоаккумуляторов с многослойными РСМ при использовании наиболее доступных и менее агрессивных РСМ на различных температурных режимах.

## ГЛАВА 2. МЕТОДЫ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ ПРОЦЕССОВ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА

### 2.1 Характеристика теплофизических параметров системы с фазовым переходом. Основные уравнения для составления теоретической модели

При численном моделировании процессов теплопередачи и изменения фазового состояния *PCM* применяется методика исследования, подразумевающая наличие определенной температуры перехода полного объема *PCM* в жидкую фазу [34], [59].

Температура плавления и кристаллизации может отличаться в зависимости от вида *PCM*. Недостаточная циклическая стабильность *PCM* и различные условия технологических параметров при изготовлении материала, не позволяют точно определить температуру плавления (каплепадения) веществ, а ее значение представляется производителями и исследователями в виде рабочего температурного диапазона.

Для возможности проведения исследования и обеспечения большей точности расчетов за  $T_m$  ( $T$ ) исследователями принимается некоторая температура из диапазона, а доля жидкой фракции *PCM*  $\gamma$ , Дж/кг, в полном объеме *PCM* определяется как кусочно-заданная функция:

$$\gamma = \frac{\Delta H}{L}, \quad \text{где } \gamma = \begin{cases} \frac{\Delta H}{L} = 0 & \text{при } T < T_s; \\ \frac{\Delta H}{L} = \frac{(T - T_s)}{(T_l - T_s)} & \text{при } T_l > T > T_s; \\ \frac{\Delta H}{L} = 1 & \text{при } T > T_l \end{cases}, \quad (2.1.1)$$

где  $\Delta H$  – доля полной энтальпии системы, характеризующая энтальпию фазового перехода, Дж/кг;  $L$  – удельная теплота фазового перехода, Дж/кг;  $T_s$  и  $T_l$  – температуры кристаллизации и плавления (каплепадения) соответственно, °С.

Если речь идет об использовании нескольких контейнеров, то средняя доля жидкой фракции во время процессов зарядки и разрядки аккумулятора определяется как среднее значение доли расплава общего числа контейнеров  $N_{form}$ , равного в представленном исследовании двум и трем [60]:

$$\gamma_{av} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{form}} \gamma_{N_{form}}}{N_{form}} \quad (2.1.2)$$

Доля полной энтальпии системы  $\Delta H$ , в свою очередь, является слагаемым уравнения полной энтальпии, которое вытекает из общего уравнения энергии [61]:

$$\frac{\partial}{\partial T}(\rho H) + \nabla \cdot (\rho \vec{V} H) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T), \quad (2.1.3)$$

где  $\rho$  – плотность  $PCM$ , кг/м<sup>3</sup>;  $V$  – мера скорости потока, характеризующая перенос энтальпии в процессе плавления, м/с;  $\lambda$  – теплопроводность вещества, Вт/(м·К).

Полная энтальпия, рассчитываемая как сумма явной и скрытой теплоты  $PCM$  в режиме плавления представляется в виде, Дж/кг [33], [62]:

$$H = H_{ref} + H_T + \Delta H = H_{ref} + \int_{T_{ref}}^T C_p dT + \gamma L, \quad (2.1.4)$$

где  $H_{ref}$  – энтальпия при начальной температуре (в момент начала зарядки аккумулятора), Дж/кг.

Для расчета количества теплоты, запасенной в результате зарядки аккумулятора с  $PCM$ , используется формула [63]:

$$Q_m = \frac{Q}{t_m} = \frac{m_{PCM} \left( \int_{solid} C_p dT + L + \int_{liquid} C_p dT \right)}{t_m}, \quad (2.1.5)$$

где  $m_{PCM}$  – масса  $PCM$ , кг;  $L$  – удельная теплота фазового перехода, Дж/кг;  $t_m$  – время, необходимое для плавления, с;  $C_p$  – теплоемкость вещества, Дж/(кг·К).

Уравнение для нескольких слоев  $PCM$  обобщается следующим образом:

$$Q_m = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{m,i}}{t_m} = \frac{\sum_{i=1}^n (m_{PCM})_i \left( (C_p)_{PCM} (T_s - T_{unit}) + L + (C_p)_{PCM} (T_{end} - T_l) \right)_i}{t_m}, \quad (2.1.6)$$

где  $n$  – общее количество слоев  $PCM$ , шт;  $T_{unit}$  и  $T_{end}$  – начальная и конечная средняя температура слоев  $PCM$ , °C.

Количество теплоты, переданное системе в результате теплообмена, рассчитывается исходя из значения плотности теплового потока через горячую стенку  $q$ , Вт/м<sup>2</sup>, определяемого с помощью значений среднего коэффициента теплопередачи  $\bar{h}_{(t)}$ , Вт/(м<sup>2</sup> К), температуры стенки теплообмена  $T_w$ , °C, и температуры фазового перехода  $PCM$ ,  $T_m$ , °C [5]:

$$q = \bar{h}_{(t)} (T_w - T_m); \quad (2.1.7)$$

$$\bar{h}_{(t)} = \frac{Q_{tot}}{A_w (T_w - T_m) \Delta t}; \quad (2.1.8)$$

$$Q_{tot} = Q_{sen} + Q_{lat}; \quad (2.1.9)$$

$$Q_{sen} = \sum_{i=1}^N m_i \left\{ C_{p,l,i} \left[ \gamma_i (T_{l,i} - T_{m,i}) - \gamma_{i,ini} (T_{l,i,ini} - T_{m,i}) \right] + C_{p,s,i} \left[ (1 - \gamma_i) T_{s,i} - (1 - \gamma_{i,ini}) T_{s,i,ini} \right] + C_{p,s,i} T_{m,i} (\gamma_i - \gamma_{i,ini}) \right\}; \quad (2.1.10)$$

$$Q_{lat} = \sum_{i=1}^N m_i h_{sf} f_i, \quad (2.1.11)$$

где  $Q_{tot}$  – мощность эффективной теплоты, переданной от источника за время зарядки, Вт;  $Q_{sen}$  и  $Q_{lat}$  – мощность явной и скрытой теплоты соответственно, Вт;  $A_w$  – площадь поверхности теплообмена (горячей стенки), м<sup>2</sup>;  $\Delta t$  – время нагрева (зарядки), с; индексы  $i$ ,  $ini$ ,  $l$  и  $s$  обозначают номер  $PCM$ , значение величины при начальных условиях, жидкую и твердую фазу  $PCM$  соответственно.



В уравнениях может присутствовать поправка на изменение теплоемкости веществ при переходе в другое агрегатное состояние. Поскольку теплоемкость при перестраивании кристаллической решетки изменяется скачкообразно и более существенно, чем при нагревании вещества в той же фазе, в расчетах для одного *PCM* используется не более двух значений теплоемкости (по одному для каждой фазы). Таким образом, для моделирования процессов плавления и затвердевания *PCM* используют метод эффективной теплоемкости, когда в качестве основы расчета используются значения теплоемкости *PCM* в твердой и жидкой фазе –  $(C_p)_s$  и  $(C_p)_l$ , Дж/(кг·К), соответственно [64], [65], [66]:

$$C_p = \begin{cases} (C_p)_s & \text{при } T < T_s; \\ (C_p)_{eff} = \frac{(C_p)_s + (C_p)_l}{2} + \frac{\Delta H}{T_l - T_s} & \text{при } T_s \leq T \leq T_l; \\ (C_p)_l & \text{при } T > T_l \end{cases} \quad (2.1.12)$$

Предлагается выражение для расчета теплоемкости  $(C_p)_{eff}$  *PCM*, Дж/(кг·К), во время фазового перехода, учитывающее скрытую теплоту плавления материала  $L_{lat}$ , Дж/кг, и долю расплава в смеси [7], [67]:

$$C_p = (C_p)_{eff} = (1 - \gamma)(C_p)_s + \gamma(C_p)_l + \frac{L_{lat}}{T_l - T_s} \quad (2.1.13)$$

Также представлена корреляция для определения значений теплоемкости *PCM*  $C_{PCM}(T)$ , Дж/(кг·К), ведущей себя как бинарная смесь [68], [69]:

$$C_{PCM}(T) = \begin{cases} C_{PCM,S} + (C_{PCM,L} - C_{PCM,S}) \left( \frac{T_A - T_m}{T_A - T} \right) + \\ + L_{lat} \left( \frac{T_A - T_m}{(T_A - T)^2} \right) & \text{при } T < T_m; \\ C_{PCM,L} & \text{при } T_m \leq T \end{cases}, \quad (2.1.14)$$

где  $T_m$  является температурой в конце неизотермического плавления, °C;  $T_A$  – температура плавления чистого  $PCM$ , °C.

Первые два члена выражения отражают изменение теплоемкости из-за явной теплоты, а последний член описывает изменение процесса плавления в течение фазового перехода  $PCM$ , учитывая скрытую теплоту системы.

Повышение температуры  $PCM$  приводит к изменению плотности и вязкости вещества. Кроме того, процесс перехода фазы протекает с оседанием на дне контейнера твердой фракции  $PCM$  ввиду ее большей плотности (например, для парафина плотность вещества в твердой и жидкой фазе составляет 880 – 915 и 800 – 870 кг/м<sup>3</sup> соответственно). Для повышения точности расчетов процесса теплопередачи, а также для моделирования, приближенного к реальному поведению  $PCM$  в имитационную численную модель включают приближение Буссинеска, позволяющее оценить изменение плотности вещества при известных значениях коэффициента расширения [70], [71]:

$$\rho_l = \rho(\beta(T - T_l) + 1), \quad (2.1.15)$$

в котором  $\rho_l$  – плотность жидкого  $PCM$ , кг/м<sup>3</sup>;  $\beta$  – коэффициент температурного расширения в результате нагрева и измерения фазового состояния;  $T$  и  $T_l$  – температуры твердого и жидкого  $PCM$  соответственно, °C.

Плотность смеси  $\rho_c$ , кг/м<sup>3</sup>, в которой присутствует и жидкая, и твердая фаза  $PCM$ , рассчитывается с помощью интерполяции теплофизических свойств материалов, основываясь на объемной (массовой) доле компонентов смеси, причем выражение также справедливо для расчета средней плотности смеси при добавлении интенсификаторов теплообмена и при использовании двух и более  $PCM$  (при смешивании) [11]:

$$\rho_c = \phi \rho_l + (1 - \phi) \rho_s; \quad (2.1.16)$$

$$\rho_c = \phi \rho_{PCM1} + (1 - \phi) \rho_{PCM2}; \quad (2.1.17)$$

$$\rho_c = \phi \rho_{PCM} + (1 - \phi) \rho_{in}, \quad (2.1.18)$$

где  $\rho_l$  и  $\rho_s$  – значения плотности жидкого и твердофазного *PCM* соответственно, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{PCM}$  и  $\rho_m$  – значения плотности *PCM* и интенсификатора соответственно, кг/м<sup>3</sup>;  $\phi$  – объемная (массовая) доля компонентов смеси (фаз *PCM*, используемых *PCM* и интенсификаторов теплообмена).

Теплопроводность *PCM* задается как функция локальной жидкой фракции  $\gamma$ , эффективной теплопроводности жидкой фазы  $k_e$ , Вт/(м·К), и теплопроводности твердой фазы  $k_{p,s}$ , Вт/(м·К), по следующему выражению [72, 73]:

$$k_p = \gamma k_e + (1 - \gamma) k_{p,s}, \quad (2.1.19)$$

где  $\gamma$  обозначает количество жидкой фракции в общем объеме *PCM*.

Теплопроводность жидкой фазы  $k_e$ , Вт/(м·К), учитывающая эффект естественной конвекции внутри многослойных и каскадных *PCM*, определяется, согласно [72, 73], следующим выражением:

$$k_e = C \left[ Ra^m \left( \frac{\delta_{p,l}}{\delta_{PCM}} \right)^n \right] k_{p,l}, \quad (2.1.20)$$

где  $\delta_{p,l}$  – средняя толщина расплавленного слоя *PCM* (жидкой фракции), м;  $\delta_{PCM}$  – толщина слоя *PCM*, м;  $k_{p,l}$  – теплопроводность жидкого *PCM*, Вт/(м·К);  $m$  и  $n$  – константы, равные  $m = 0,25$  и  $n = 0,8$ , а  $C$  – коэффициент, значение которого определяется исходя из температуры теплоносителя, либо нагревательного элемента на входе  $T_f$ , °C (в момент начала процесса зарядки) [72], [74]:

$$C = \begin{cases} 0,24 & \text{при } T_f < 310,7 \text{ К;} \\ 0,18 & \text{при } 310,7 \text{ К} \leq T_f \leq 320,7 \text{ К;} \\ 0,16 & \text{при } T_f > 320,7 \text{ К.} \end{cases} \quad (2.1.21)$$

При расчете коэффициента теплопроводности смеси *PCM* в процессе зарядки/разрядки прибегают к упрощению, таким образом, теплопроводность смеси *PCM*  $k_{PCM}$ , Вт/(м·К), в котором присутствует и твердая, и жидкая фазы, рассчитывается исходя из значения температуры смеси *PCM*  $T$ , °C [75]:

$$k_{PCM} = \begin{cases} k_{p,s} & \text{при } T < T_m; \\ \frac{k_{p,s} + k_e}{2} & \text{при } T_m \leq T \leq T_m + \Delta T_m; \\ k_e & \text{при } T > T_m + \Delta T_m, \end{cases} \quad (2.1.22)$$

где  $(T_m + \Delta T_m)$  – температурный диапазон плавления вещества, °С.

Существует множество материалов с фазовым переходом, широко применяемых в практических целях. Ввиду этого, физические величины, характеризующие поведение *PCM*, могут находиться в достаточно большом диапазоне. Так, гидраты солей имеют в 2 – 4 раза больший коэффициент теплопроводности в твердой фазе, чем жирные кислоты и парафины [41]. Таким образом, использование *PCM* со схожими значениями температуры плавления и теплоемкости, но различной природы, и, как следствие, существенно большим значением коэффициента теплопроводности, может способствовать нецелесообразности использования имеющейся конструкции теплового аккумулятора ввиду изменения его аккумулирующей способности и требуемого времени зарядки.

В случае использования «сыпучих» интенсификаторов теплообмена в *PCM* при расчете общей теплопроводности смеси необходимо также учитывать коэффициент теплопроводности материала интенсификатора. Поскольку в качестве интенсификаторов может быть использованы материалы, чьи значения теплопроводности в несколько раз превышают теплопроводность *PCM* (металлы, частицы кремния и др.), при расчете общей теплопроводности смеси рекомендуется использовать пропорциональный метод расчета, основанный на объемном соотношении материалов смеси [76].

В случае необходимости определения сопротивления теплопередаче  $R$ , ( $\text{м}^2 \cdot \text{К}$ )/Вт, системы с *PCM* используют следующее выражение [17]:

$$R = R_{PCM} + R_w + R_{HTF} = \frac{1}{h_{PCM}A} + \frac{\delta}{k_w A} + \frac{1}{h_{HTF}A}, \quad (2.1.23)$$

где  $h_{PCM}$  и  $h_{HTF}$  – коэффициенты конвективного теплообмена  $PCM$  и теплоносителя, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $A$  – площадь теплообмена, м<sup>2</sup>;  $k_w$  – коэффициент теплопроводности стенки (стенок), Вт/(м·К).

## 2.2 Особенности численного моделирования фазового перехода

Создание численной модели подразумевает имитацию каких-либо физических процессов или явлений с использованием чисел и математических формул. Эти уравнения часто принимают форму дифференциальных, которые описывают, как переменные изменяются во времени и пространстве.

Создание численных моделей производится в специализированных программах, таких как *Ansys Fluent*, *OpenFoam*, *SolidWorks*, *Comsol Multiphysics* и т.д.

Этапы создания численной модели во всех программах очень схожи, и состоят из:

- создания геометрии;
- описание используемых материалов;
- задания граничных условий (выбор физических процессов и задание численных значений);
- создание расчетной сетки;
- выбор решателя.

Из рассмотренных программных платформ *Comsol Multiphysics* обладает наиболее простым интерфейсом и мощным решателем для моделирования сложных систем, учитывающих несколько физических процессов.

Разберем модель аккумулятора, в которой выполнен учет свободной конвекции. Для ускорения расчета геометрия АТФП выполнена осесимметричной. На рисунке 2.1 представлены модуль «Geometry» дерева модели, а также 2D модель аккумулятора.

АТФП представляет из себя медную трубку вокруг которой находится теплоаккумулирующий материал (ТАМ). Для повышения эффективности АТФП используют продольное оребрение, нанодобавки повышающие

коэффициент теплопроводности ТАМ. В данном примере к медной трубке присоединены медные поперечные ребра.

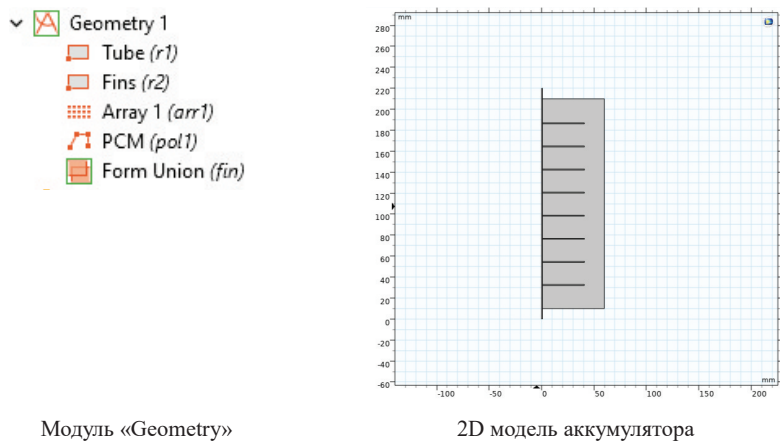


Рисунок 2.1 – Построение геометрии АТФП

Физические параметры материалов (плотность, теплоемкость, коэффициент теплопроводности и. т. д.) можно выбрать из библиотеки материалов *Comsol*, однако в ней нет материалов, используемых в качестве ТАМ, поэтому их параметры нужно заполнить самостоятельно во вкладке «*Add material*». Пример заполненных свойств материалов представлен на рисунке 2.2. Агрегатные состояния требуется задавать как отдельный материал так как при изменении фазового состояния физические свойства меняются.

»	Property	Variable	Value	Unit	Property group
<input checked="" type="checkbox"/>	Density	rho	775	kg/m³	Basic
<input checked="" type="checkbox"/>	Dynamic viscosity	mu	2	Pa·s	Basic
<input checked="" type="checkbox"/>	Heat capacity at constant pressure	Cp	2440	J/(kg·K)	Basic
<input checked="" type="checkbox"/>	Thermal conductivity	k_iso ; ki...	0.15	W/(m·K)	Basic

Рисунок 2.2 – Физические свойства ТАМ

В процессе зарядки/разрядки АТФП происходит теплообмен между теплоносителем и теплоаккумулирующим материалом через теплообменник. При достижении некоторой температуры, происходит фазовый переход, поэтому для описания теплообмена необходимо использовать модуль «*Heat Transfer in Solids and Fluids*», вид модуля представлен на рисунке 2.3.

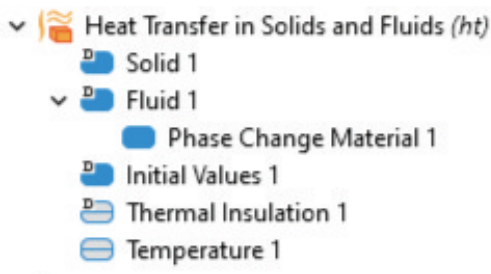


Рисунок 2.3 – Модуль «*Heat Transfer in Solids and Fluids*»

В элементе «*Solid 1*» выбирается компонент, который будет в твердом агрегатном состоянии в течении всего эксперимента, в данном случае теплообменник. В элементе «*Fluid 1*» выбирается область ТАМ и для учета фазового перехода используется функция «*Phase Change Material*». Здесь задаются такие параметры как температура фазового перехода, интервал температур на границе раздела фаз, и скрытая теплота плавления. Кроме этого выбираются материалы первой и второй фазы. Формулы, используемые для учета фазового перехода, выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned}
 \rho &= \theta_1 \rho_1 + \theta_2 \rho_2 \\
 c_p &= \frac{1}{\rho} (\theta_1 \rho_1 c_{p,1} + \theta_2 \rho_2 c_{p,2}) + L_{1 \rightarrow 2} \frac{\partial \alpha_m}{\partial T} \\
 \alpha_m &= \frac{1}{2} \frac{\theta_2 \rho_2 - \theta_1 \rho_1}{\theta_1 \rho_1 + \theta_2 \rho_2} \\
 k &= \theta_1 k_1 + \theta_2 k_2 \\
 \theta_1 + \theta_2 &= 1
 \end{aligned} \tag{2.2.1}$$

Здесь  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  - доли фазового состояния ТАМ, сумма которых равна 1;  $\alpha_m$  - массовый коэффициент, характеризующий разницу в распределении, в данном случае, масс твердого и жидкого ТАМ;  $\rho$  – плотность смеси, которая зависит от плотностей компонентов и их долей;  $c_p$  - удельная теплоемкость смеси;  $L_{1 \rightarrow 2}$  - скрытая теплота фазового перехода (плавления).

Для упрощения расчета не учитывается теплообмен с окружающей средой, а источник тепловой энергии задается как температура внутренней стенки трубы функцией «*Temperature 1*».

Для учета свободной конвекции область ТАМ представляется как ламинарный поток, на который действует сила тяжести. Возникновение движения конвективных потоков происходит из-за изменения плотностей жидкого ТАМ при нагреве/остывании. Дерево модели «*Laminar Flow*» представлено на рисунке 2.4.

В уравнениях Навье-Стокса для несжимаемого потока давление входит не как абсолютное значение, а через градиент ( $\nabla p$ ). Это приводит к тому что будет существовать бесконечное число полей давления, удовлетворяющих уравнениям при одном и том же поле скорости. Поэтому в данной модели используется функция «*Pressure Point Constraint*», которая фиксирует значение давления в одной точке, тем самым устраняет неопределенность константы, а также обеспечивает единственность решения.



Рисунок 2.4 – Модуль «*Laminar Flow*» описывающий движение свободно-конвективных потоков



Связь модулей теплообмена и движения жидкости осуществляется с помощью функции «*Nonisothermal Flow*». Кроме этого здесь задается приближение Буссинеска, которое используется для упрощения моделирования конвективных течений, где плотность среды зависит от температуры, но эта зависимость учитывается только в слагаемом массовых сил (силе тяжести). Однако при расчете фазовых переходов таких как газ-жидкость, приближение Буссинеска не рекомендуется использовать ввиду того что процессы с резкими изменениями плотности будут выходить за рамки модели.

После задания граничных условий строится расчетная сетка. Построение расчетной сетки подразумевает разбиение модели на множество малых подобластей (конечных элементов). Правильность построения сетки напрямую влияет на сходимость расчетов, а также на достоверность полученной модели. Важно помнить, что большее количество конечных элементов увеличивает точность модели, однако сильно усложняет расчет.

На рисунке 2.5 представлена расчетная сетка модели аккумулятора. Для упрощения расчета плотность сетки была больше в пристеночных областях ТАМ. Для рассмотрения фронта плавления в разные моменты времени используется решатель «*Time Dependent*». Здесь выбирается начальное и конечное время процесса, а также временной шаг измерений.

Пример результатов моделирования представлен на рисунке 2.6. На нем представлено движение фронта плавления ТАМ в процессе зарядки аккумулятора с шагом 10 минут. Видно, что движение фронта плавления происходит неравномерно ввиду возникновения свободно конвективных потоков.

По результатам численного моделирования можно создать приложение с помощью модуля «*Application Builder*», что является еще одним плюсом платформы *Comsol*. По данному приложению можно определять время зарядки АТФП с разным количеством ребер, не используя больших

вычислений. Такие приложения можно использовать в инженерных расчетах, демонстрациях результатов, а также для обучения новых инженерных кадров.

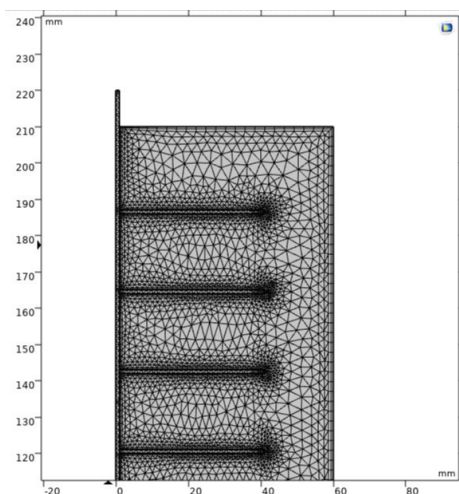


Рисунок 2.5 – Расчетная сетка модели аккумулятора

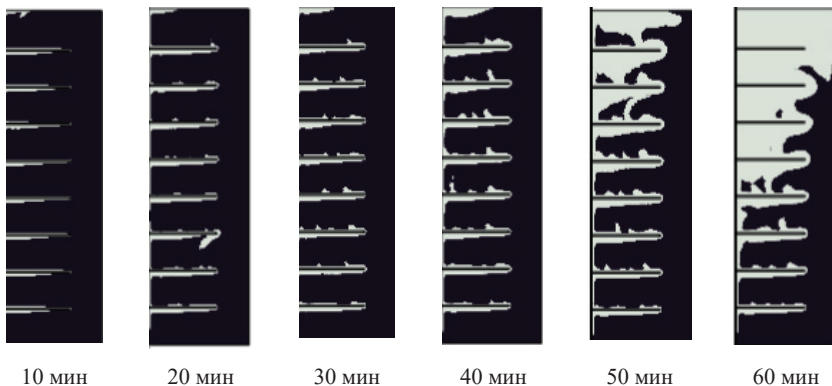


Рисунок 2.6 – Движение фронта плавления ТАМ

## 2.3 Оценка интенсивности тепловых потерь системой. Оптимизация расчета. Энтропия системы

Принято задаваться уравнениями теплового баланса для границ расчетной зоны. Уравнения индивидуальны для каждой системы ввиду различной совокупности используемых материалов и конструктивных особенностей аккумуляторов. В уравнениях учитывается теплообмен естественной и вынужденной конвекцией, теплопередачей и лучистым теплопереносом (излучением). При необходимости уточнения промежуточных параметров системы (в процессе переходной фазы или для расчета отдельного элемента конструкции) используются дополнительные уравнения и расчет производится в несколько этапов.

При проведении исследований, направленных на повышение эффективности тепловых аккумуляторов, необходимо учитывать потери теплоты системы, что позволит оптимизировать затраты энергоресурсов и рационально подойти к проектированию систем. При оценке интенсивности диссипации энергии и потерь теплоты наиболее часто оценивается мощность потерь лучистого и конвективного теплообмена.

На мощность лучистого теплообмена  $q_{rad}$ , Вт, оказывают влияние температура окружающей среды  $T_e$ , °С, излучающая способность поверхности (коэффициент излучения)  $\epsilon$ , угол наклона системы в пространстве  $\alpha$ , град, и температура излучающей поверхности  $T_{form}$ , °С. Общий теплоперенос излучением определяется из выражения [77, 78]:

$$q_{rad} = \epsilon_{form} F \sigma A (T_{form}^4 - T_e^4), \quad (2.3.1)$$

где  $\sigma$  – коэффициент Стефана – Больцмана, равный  $5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);  $F$  – коэффициент формы излучения, учитывающий угол расположения системы в пространстве  $\alpha$ ,  $A$  – площадь теплообмена, м<sup>2</sup>.

Поскольку рассматриваемая система не имеет конструктивных элементов, способствующих появлению вынужденной конвекции, потому

мощность конвективных теплопотерь  $q_{conv}$ , Вт, рассчитывается только как величина потерь от естественной конвекции [79]:

$$q_{conv} = h_{free} A (T_{form} - T_{top}), \quad (2.3.2)$$

где  $h_{free}$  – коэффициент теплопередачи естественной конвекцией;  $T_{form}$  – наибольшая температура нагретого контейнера по высоте (вблизи нагревательного элемента), °С;  $T_{top}$  – наименьшая температура нагретого контейнера по высоте (температура крышки верхнего контейнера), °С.

Коэффициент  $h_{free}$  является эмпирическим и в зависимости от числа Рэлея равен:

$$h_{free} = \left( \frac{0,67 \cdot \cos \alpha \cdot Ra^{0,25}}{\left( \left( \frac{0,492k}{\mu C_p} \right)^{\frac{9}{16}} + 1 \right)^{0,44}} + 0,68 \right) \frac{k}{l} \quad \text{при } Ra \leq 10^9; \quad (2.3.3)$$

$$h_{free} = \left( \frac{0,378 \cdot Ra^{0,167}}{\left( \left( \frac{0,492k}{\mu C_p} \right)^{\frac{9}{16}} + 1 \right)^{0,44}} + 0,825 \right) \frac{k}{l} \quad \text{при } Ra > 10^9, \quad (2.3.4)$$

где  $\mu$  – динамический коэффициент вязкости воздуха, Па/с, а  $C_p$  – теплоемкость воздуха, Дж/(кг·К).

Число Рэлея, определяющее поведение жидкости под воздействием градиента температуры, рассчитывается исходя из значений коэффициента расширения воздуха  $\beta_{air}$ , длины (высоты) теплового аккумулятора  $l$ , м, а также средней температуры внутренней поверхности аккумулятора  $T_{form}$ , °С,

температуры воздуха  $T_{air}$ , °C, (при расположении контейнера в воздушной среде) и его плотности  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>:

$$Ra = \frac{g\beta_{air}l^3\rho^2C_p}{k\mu}(T_{form} - T_{air}); \quad (2.3.5)$$

$$\beta_{air} = \left( \frac{\partial \rho}{\partial T_{form}} \right) \frac{1}{\rho} \quad (2.3.6)$$

Расчет тепловых потерь вынужденной конвекцией необходим, если в системе присутствует оборудование для принудительного нагнетания газообразной массы или жидкости, которые могут быть представлены как в качестве теплоносителя, так и в качестве внешней среды, обволакивающей корпус теплового аккумулятора с *PCM*. Поскольку используемая в ходе исследования совокупность материалов и *PCM* позволяет допустить эксплуатацию теплового аккумулятора в системах с использованием жидкого/газообразного теплоносителя при сохранении основных конструктивных элементов, необходимо иметь метод расчета теплотерь вынужденной конвекцией. В этом случае коэффициент тепловых потерь вынужденной конвекцией  $h_{forced}$  определяется исходя из корреляций для чисел Прандтля ( $Rr$ ) и Рейнольдса ( $Re$ ) [33, 80]:

$$h_{forced} = 2 \frac{k}{l} \frac{0,3387 \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \cdot Re^{\frac{1}{2}}}{\left( 1 + \left( \frac{0,0468}{Pr} (Re)^{\frac{2}{3}} \right)^{\frac{1}{4}} \right)} \quad \text{при } Re \leq 10^5; \quad (2.3.7)$$

$$h_{forced} = 2 \frac{k}{l} Pr^{\frac{1}{3}} \left( 0,037 Re^{\frac{4}{5}} - 871 \right) \quad \text{при } Re > 5 \cdot 10^5; \quad (2.3.8)$$

$$Re = \frac{\rho V l}{\mu}; \quad (2.3.9)$$

$$Pr = \frac{C_p \mu}{k}, \quad (2.3.10)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости (нагнетаемого теплоносителя), кг/м<sup>3</sup>;  $V$  – скорость течения жидкости, м/с;  $l$  – геометрические размеры канала в сечении, м<sup>2</sup>;  $\mu$  – динамический коэффициент вязкости жидкости, Па·с;  $k$  – коэффициент теплопроводности жидкости, Вт/(м·К).

Далее мощность конвективных тепловых потерь, обоснованных наличием вынужденной конвекции, рассчитывается аналогично мощности теплопотерь при естественной конвекции по формуле (2.3.2).

Расчет тепловых потерь наиболее целесообразен при определении времени зарядки тепловых аккумуляторов большего объема *PCM*, и, соответственно, больших геометрических размеров контейнера, когда площадь поверхности аккумулятора кратно возрастает. Поскольку в представленном исследовании внимание акцентируется на определении эффективности одного и того же теплового аккумулятора с различной совокупностью используемых *PCM* при идентичном наборе используемых средств и материалов, было принято решение об отсутствии необходимости расчета тепловых потерь системой.

В численных моделях процессов, протекающих в тепловых аккумуляторах с *PCM*, для упрощения расчетов неизбежно прибегают к ряду допущений.

Для большинства исследований процессов зарядки и разрядки *PCM*, справедливы следующие положения [17], [81], [82]:

- не учитывается разница температур в каждом блоке *PCM* в момент начала зарядки;
- теплофизические свойства *PCM* и теплоносителя (при наличии) не зависят от температуры (в пределах конкретного агрегатного состояния);
- пренебрегается явной теплотой *PCM*, ввиду существенно меньших значений по сравнению со скрытой теплотой *PCM*;

- пренебрегается переохлаждением/перегревом в процессах хранения/высвобождения тепловой энергии;

- пренебрегается изменением температуры теплоносителя (при наличии) в направлении, перпендикулярном направлению потока;

- температура теплоносителя (при наличии)/ горячей стенки (нагревательного элемента) не подвержена колебаниям и не зависит от времени.

Необходимо отметить, что представленная совокупность допущений не является обязательной и универсальной. В зависимости от цели исследования те или иные допущения могут не учитываться при описании теоретического базиса модели для оценки работы системы. Однако, в большом количестве исследований принятие описанных выше допущений позволяет оптимизировать расчет системы. Например, при наличии принятых допущений, упомянутых выше, изменение энтальпии теплоносителя, либо количество передаваемой нагревательным элементом энергии, определяется скоростью теплопередачи от теплоносителя/нагревательного элемента к *PCM* [83, 84]:

$$Q_i = mC_p |T_{i-1} - T_i| = U_i A_i \frac{(T_{i-1} - T_{m,i}) - (T_i - T_{m,i})}{\ln \left| \frac{T_{i-1} - T_{m,i}}{T_i - T_{m,i}} \right|} \quad 1 \leq i \leq n, \quad (2.3.11)$$

где  $U$  – значение общего коэффициента теплопроводности, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $A$  – площадь теплообмена, м<sup>2</sup>;  $T_i$  – температура теплоносителя вблизи  $i$ -ой ступени *PCM*, либо (при отсутствии теплоносителя) средняя температура слоя *PCM*, °С;  $T_{m,i}$  – температура фазового перехода *PCM*  $i$ -ой ступени теплового аккумулятора,  $n$  – количество ступеней.

Выражение упрощается введением коэффициента  $C$ :

$$\frac{T_{i-1} - T_{m,i}}{T_i - T_{m,i}} = \exp \left( \frac{U_i A_i}{mC_p} \right) = C \quad 1 \leq i \leq n \quad (2.3.12)$$

Таким образом, температура фазового перехода *PCM* может быть выражена с помощью температуры теплоносителя, либо при учете количества подведенной теплоты от нагревателя как:

$$T_{m,i} = \frac{C_i T_i - T_{i-1}}{C_i - 1} \quad 1 \leq i \leq n \quad (2.3.13)$$

В исследованиях оценивается энтропия системы  $S$ , Дж/К, определяющая меру необратимого рассеивания энергии. На основании второго закона термодинамики скорость генерации энтропии  $S_g$ , Вт/К, с членом выражения, учитывающим поступление тепловой энергии от жидкого/газообразного теплоносителя, определяется как [85, 86]:

$$S_g = \frac{dS}{dt} + m(s_2 - s_1) - \frac{Q}{T_{source}}, \quad (2.3.14)$$

где  $m$  – массовый расход теплоносителя, кг/с;  $s_1$  и  $s_2$  – удельные энтропии системы (блока *PCM*) в моменты времени 1 и 2 соответственно, Дж/(кг·К);  $Q$  – количество поглощенной теплоты от источника, Вт;  $T_{source}$  – температура источника (в случае использования теплоносителя – его начальная температура вблизи определенного блока *PCM*), °С.

В таком случае удельное изменение энтропии  $s_2 - s_1$ , Дж/(кг·К), при переходе из состояния 1 в состояние 2 определяется:

$$s_2 - s_1 = C_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R_g \ln \frac{p_2}{p_1}, \quad (2.3.15)$$

где  $C_p$  – изобарная теплоемкость теплоносителя, Дж/К;  $R_g$  – приведенное сопротивление теплопередаче стенок (канала с теплоносителем, стенок контейнера с *PCM* и т.д.), (м²·К)/Вт;  $p_1$  и  $p_2$  – давление потока теплоносителя в моменты времени 1 и 2 соответственно, Па.

Для  $i$ -й ступени *PCM* каскадной (многослойной) системы хранения тепловой энергии скорость генерации энтропии может быть получена, без учета изменения давления, из выражения:

$$S_{g,i} = m C_p \ln \frac{T_i}{T_{i-1}} + \frac{m C_p (T_{i-1} - T_i)}{T_{m,i}}, \quad (2.3.16)$$



которое, используя параметр  $C$ , упрощается как:

$$S_{g,i} = mC_p \left\{ \ln \frac{T_i}{T_{i-1}} + \frac{(C_i - 1)^2}{C_i} \frac{T_{i-1}}{C_i T_i - T_{i-1}} - \frac{C_i - 1}{C_i} \right\} \quad (2.3.17)$$

Общая скорость генерации энтропии системой с несколькими  $PCM$ , в таком случае, равна:

$$S_{g,tot} = mC_p \sum_{i=1}^n \left\{ \ln \frac{T_i}{T_{i-1}} + \frac{(C_i - 1)^2}{C_i} \frac{T_{i-1}}{C_i T_i - T_{i-1}} - \frac{C_i - 1}{C_i} \right\} \quad (2.3.18)$$

## 2.4 Методы оценки эффективности системы накопления тепловой энергии. Оценка достоверности измерений

При проведении исследований, направленных на повышение производительности тепловых аккумуляторов в случае изменения размеров конструкции и использования различных материалов, принято рассчитывать отношение запасенной энергии  $E_{PCM}$  к энергии на входе  $E_{inlet}$  [87]:

$$\psi = \frac{E_{PCM}}{E_{inlet}} \cdot 100\% = \frac{E_{inlet} - E_{out}}{E_{inlet}} \cdot 100\%, \quad (2.4.1)$$

где  $E_{PCM}$  в данной работе представлена как количество энергии, полученной основанием нижнего контейнера с учетом температурного режима электронагревателя, Дж; а количество энергии на входе и на выходе предлагается рассчитывать, используя поверхностный интеграл теплового потока  $J_q$  по поверхности подведения и рассеивания тепловой энергии  $S$ :

$$E_{inlet} = \int_t \int_{S,in} J_q \, dtdS \quad (2.4.2)$$

$$E_{out} = \int_t \int_{S,out} J_q \, dtdS \quad (2.4.3)$$

Для оценки способности теплового аккумулятора запастись энергией и дальнейшего ее использования составляется общий эксергетический баланс системы. В отличие от энергетического баланса, эксергетический баланс учитывает потери энергии ввиду необратимости процессов и рассеивания энергии. Этот метод наиболее предпочтителен в термодинамических системах,

а при наличии предполагаемого фазового перехода обеспечивает возможность определить наиболее целесообразные параметры потока теплоносителя и температурный режим зарядки для конкретной компоновки теплового аккумулятора с индивидуальным набором *PCM*.

При наличии жидкого, либо газообразного теплоносителя выражения для эксергии теплоносителя на входе  $Ex_{in}$ , Дж, и на выходе из системы  $Ex_{out}$ , Дж, имеют вид [18, 27]:

$$Ex_{in} = \int_0^t m_f C_f \left( T_0 \ln \frac{T_0}{T_{in}} - T_0 + T_{in} \right) dt; \quad (2.4.4)$$

$$Ex_{out} = \int_0^t m_f C_f \left( T_0 \ln \frac{T_0}{T_{out}} - T_0 + T_{out} \right) dt; \quad (2.4.5)$$

$$Ex_{sup} = Ex_{in} - Ex_{out} = \int_0^t m_f C_f \left( T_0 \ln \frac{T_{out}}{T_{in}} - T_{out} + T_{in} \right) dt, \quad (2.4.6)$$

где  $m_f$  – масса (расход) теплоносителя, кг;  $C_f$  – изобарная теплоемкость жидкого/газообразного теплоносителя, Дж/(кг·К),  $T_0$  – температура окружающей среды, °С.

Выражение для эксергии *PCM*  $Ex_{PCM}$ , Дж, имеет вид [88]:

$$\begin{aligned} Ex_{PCM} = & \sum_i m_{PCM, in} C_{p, s} \left( T_{s, i} - T_{ini} - T_0 \ln \frac{T_{s, in}}{T_{ini}} \right) + \\ & + \sum_i m_{PCM, in} C_{p, s} \left( T_{p, in} - T_{l, i} - T_0 \ln \frac{T_{p, in}}{T_{l, in}} \right) + \\ & + \sum_i m_{PCM, in} C_p \left( T_{l, in} - T_{s, i} - T_0 \ln \frac{T_{l, in}}{T_{s, in}} \right), \end{aligned} \quad (2.4.8)$$

где три члена выражения справа определяют эксергию во время фазового перехода для *PCM* в жидком, твердом и двухфазном состояниях соответственно;  $T_0$  – расчетная опорная температура, °С,  $T_{ini}$  – начальная температура, °С.

Эксергия массового расхода теплоносителя  $Ex_{HTF}$ , Дж, определяется исходя из выражения:

$$Ex_{HTF} = \sum_i m_{HTF,in} C_{HTF} \left( T_{HTF,in} - T_{ini} - T_0 \ln \frac{T_{HTF,in}}{T_{ini}} \right), \quad (2.4.9)$$

где  $m_{HTF,in}$ ,  $C_{HTF}$  и  $T_{HTF,in}$  – масса (расход), кг (кг/с); теплоемкость, (Дж/(кг·К)), и температура, °С, теплоносителя соответственно.

Общая эксергия системы в результате завершения процессов зарядки/разрядки  $Ex_{char}$ , Дж:

$$Ex_{char} = Ex_{HTF} + Ex_{PCM} \quad (2.4.10)$$

Как и в случае с количеством запасенной энергии, эффективность использования эксергии в процессе теплообмена определяется отношение общей запасенной эксергии в тепловом баке-аккумуляторе к скорости передачи эксергии от теплоносителя к  $PCM$  [89]:

$$\eta_{Ex} = \frac{Ex_{HTF} + Ex_{PCM}}{Ex_{sup}} \quad (2.4.11)$$

Для оценки отклонений между результатами моделирования и результатами, полученными в ходе проведения экспериментальных исследований, наиболее часто используются корень из среднеквадратической ошибки ( $RMSE$  – *root-mean-square error*) и средняя абсолютная процентная ошибка ( $MAPE$  – *mean absolute percentage error*) [18].

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (T_k - \bar{T}_k)^2}; \quad (2.4.12)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left| \frac{T_k - \bar{T}_k}{\bar{T}_k} \right|, \quad (2.4.13)$$

где  $n$  – общее количество пар сравниваемых данных;  $T_k$  и  $\bar{T}_k$  – значения смоделированной и экспериментальной температуры, °С, определенные на временном шаге  $k$ .

В случаях, когда требуется повышенная чувствительность к выбросам и большим ошибкам измерения, используется среднеквадратическая ошибка ( $MSE$ ), расчет которой производится аналогично  $RMSE$  без использования квадратного корня [90].

В случаях, когда исследователями не производится экспериментальных измерений, а фиксирование параметров системы определяется в результате решения уравнений численной модели, авторами используется оценка вероятности значения одного или нескольких параметров системы на временном шаге  $\Delta t$ . Определение вероятности необходимо для достижения достаточного уровня правдивости расчетов и исключения возможной ошибки, появляющейся ввиду несовершенства численных моделей. Так, например, при определении значения эффективной удельной теплоемкости смеси  $C_{eff}(T)$ , Дж/(кг·К), зависящей от температуры [91], используется функция  $\beta(T)$  [92, 93]:

$$C_{eff}(T) = (C_p)_{eff} + L \cdot \frac{\sqrt{2}\gamma}{\Delta T \sqrt{\pi}} \cdot e^{\frac{2\gamma(T-T_m)^2}{\Delta T^2}}; \quad (2.4.14)$$

$$\beta(T) = 0,5 + \left[ erf\left(\frac{\sqrt{2}\gamma(T-T_m)}{\Delta T}\right) + 1 \right], \quad (2.4.15)$$

где  $\Delta T$  – диапазон шага измерения температуры, °С;  $erf$  – функция ошибки, позволяющая определить вероятность нахождения нормально распределенных величин в указанном диапазоне.

Функция  $\beta(t)$  принимает значения от 0 до 1, где 0 соответствует состоянию системы, при котором весь *PCM* находится в твердофазном состоянии, а 1 – состоянию, когда весь *PCM* перешел в жидкую фазу. Функция вероятности может применяться и для определения значений других физических величин и состояний системы в зависимости от задач исследования.

Существует множество методов оценки эффективности тепловых аккумуляторов с фазовым переходом, и, в зависимости от направления исследования, в расчетах используются различные физические величины. Необходимо понимать, что особенности конструкции, совокупность используемых в системе материалов и цели исследования не позволяют использовать один конкретный метод для определения эффективности.

В расчетах обычно используются такие величины, как энтальпия  $H$ , Дж (Дж/кг); энтропия  $S$ , Дж/К; количество теплоты  $Q$  ( $E$ ), Дж; и эксергия  $Ex$ , Дж.

Анализ представленных в литературе методик расчета позволяет наиболее рационально подойти к созданию численной модели, оперируя материалами исследований и акцентируя внимание на совокупности используемых параметров. Использование представленных зависимостей предоставляет возможность объяснить совокупность результатов экспериментального исследования, ссылаясь на различие значений определенных физических величин. Однако, ввиду различия  $PCM$  по значению нескольких параметров одновременно, оценить степень влияния определенного физического параметра на поведение системы во время протекания процессов зарядки и разрядки не представляется возможным. Таким образом, анализ результатов экспериментального исследования представлен как сравнительный анализ зарядки нескольких компоновок аккумулятора при характеристике степени влияния той или иной физической величины на конкретный «изолированный» процесс (линейные нагрев, плавление и др.)

## ГЛАВА 3. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ, ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ И ВЫБОРА ИСПОЛЪЗУЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ

### 3.1 Описание установки, комплектующих и выбора материалов

Целью работы является исследование повышения эффективности тепловых аккумуляторов с *PCM*. В качестве метода повышения эффективности выбран метод использования в тепловом аккумуляторе одновременно нескольких *PCM* с различными температурами плавления. Предполагается, что последовательное расположение слоев *PCM* позволит либо сократить время зарядки аккумулятора, либо, в случае равного времени зарядки (в пределах погрешности измерений) для различных компоновок слоев с *PCM*, получить в результате экспериментальных измерений различное количество запасенной энергии для различных компоновок. Кроме того, предполагается, что применение многослойной конструкции позволит расширить температурный диапазон применения теплоаккумуляторов с *PCM*, а результаты анализа экспериментальных данных будут являться базисом для формирования методики, позволяющей создавать тепловые аккумуляторы с *PCM*, наиболее подходящие для применения в индивидуальной системе (производственном, техническом процессе) в зависимости от ее эксплуатационных условий, таких как выдаваемая тепловая мощность, продолжительность подвода тепловой энергии и равномерность ее подачи в течение расчетного периода.

В качестве материалов с фазовым переходом для проведения исследования были выбраны парафин П2, церезин марки М75 и стеариновая кислота. Выбор *PCM* объясняется необходимостью подбора материалов с явным отличием только по одному теплофизическому параметру, в данном случае – по температуре плавления. Парафин П2 и церезин М75 соответствуют этому требованию и являются хорошей парой *PCM* для проведения заявленного исследования. Ориентируясь на потребность в использовании третьего *PCM* с необходимым значением температуры плавления, было принято решение использовать стеариновую кислоту. Таким образом,

поскольку значения удельной теплоемкости, теплопроводности в твердой фазе и теплоты фазового перехода парафина и церезина отличаются от значений аналогичных параметров стеариновой кислоты, в трехслойных компоновках необходимо учитывать и вклад этих параметров в процесс зарядки аккумулятора. Также стоит отметить, что выбранные *PCM* наиболее удобны для проведения исследования ввиду относительно невысоких значений температуры плавления, невысокой стоимости и доступности приобретения. В табл. 3.1 отражены значения удельной теплоемкости, теплопроводности и температуры плавления для выбранных *PCM*.

Таблица 3.1 – Значения теплофизических параметров, используемых *PCM*

Материал <i>PCM</i>	Удельная теплоемкость в твердой фазе $C_{PCM}$ , Дж/(кг·К)	Теплопроводность в твердой фазе $\lambda_{PCM}$ , Вт/(м·К)	Температура плавления $T_m$ , °C	Удельная теплота фазового перехода $\mu_{PCM}$ , · 10 <sup>3</sup> Дж/кг
Парафин П2	2190; 2100[41] – 2200[42]	0,212; 0,210[42] – 0,272[43]	54	163 – 170; 150[44] – 195[42]
Стеариновая кислота	1760 – 1800; 2590[45] – 2830[46]	0,27; 0,290[47] – 0,350[48]	69	199 – 205; 191[49] – 216[50]
Церезин М75	2100 – 2250; 2900[51]	0,200 – 0,220; 0,250[51]	75	172 – 183; 160[2] – 184[52]

Для проведения экспериментального исследования были изготовлены цилиндрические металлические контейнеры из нержавеющей стали. Выбор материала контейнеров определен исходя из необходимости получения системы, обладающей стойкостью к коррозионным разрушениям [53]. Несмотря на то, что сами *PCM* обладают нейтральной химической средой по отношению к большинству металлов, влага, содержащаяся в воздухе, способна негативно воздействовать на материал контейнеров со временем и способствовать появлению ржавчины.

Контейнеры, в которые помещались *PCM*, имеют цилиндрическую форму, изготовлены из листовой нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т толщиной  $\sigma_{cm} = 0,0015$  м с коэффициентом теплопроводности  $\lambda_{cm} = 16$  Вт/(м·К) с помощью аргоновой сварки. Днища контейнеров были приварены к боковой части, а крышки изготовлены съемными для возможности заполнения

контейнеров *PCM*. Контейнеры имеют следующие размеры: высота  $h_k = 0,035$  м, диаметр основания  $d_k = 0,14$  м. Измеренная масса изготовленных контейнеров  $m_k$  составила от 0,368 до 0,371 кг. Диаметр основания контейнеров был выбран исходя из диаметра внешней тарелки электронагревателя. Контейнер должен полностью помещаться на нагревательном элементе для обеспечения равномерной теплопередачи. Цилиндрическая форма контейнера была определена для исключения возможных застойных зон по углам контейнера и свободного перемещения (всплывания/оседания) твердой фракции *PCM* на этапе частичного фазового перехода.

В научной литературе по тематике *PCM* представлена информация, что, для стабильной теплопередачи и равномерного распределения жидкой фазы *PCM* в процессе зарядки целесообразно использовать емкости с соотношением сторон 1/3–1/5 [54, 55]. Это являлось фактором при определении геометрических размеров контейнеров.

На крышки контейнера, имеющие окружность в сечении, были приварены два ребра для увеличения скорости теплопередачи. Высота ребер контейнеров определена исходя из методики измерения, подразумевающей замер температуры только верхнего слоя *PCM*. Таким образом, ребра теплопередачи не касаются днища контейнера и имеют высоту  $h_{кр} = 0,012$  м. Ребра также не касаются стенок контейнера для исключения теплопередачи от поверхности металла. Диаметр крышки контейнера  $d_{кр} = 0,0142$  м. Все крышки контейнеров, вместе с термопарами, также имеют одинаковую массу  $m_{кр} = 0,276$  кг.

В случае прилегания крышки контейнера к его стенкам (основному корпусу) нельзя было бы объективно оценить температуру слоев *PCM* из-за высокой теплопередачи от корпуса к крышке, поэтому необходимо было обеспечить прослойку из материала с низкой теплопроводностью, на которой бы располагалась крышка. Для обеспечения этих целей на крышки с помощью термостойкого герметика были приклеены по четыре прокладки из



термостойкого паронита с коэффициентом теплопроводности  $\lambda_{\text{пар}} = 0,25 \text{ Вт/(м К)}$  толщиной  $\sigma_{\text{пар}} 0,002 \text{ мм}$ . На рис. 3.1 отображены изготовленные контейнеры для *PCM*, выполненные в количестве трех штук.

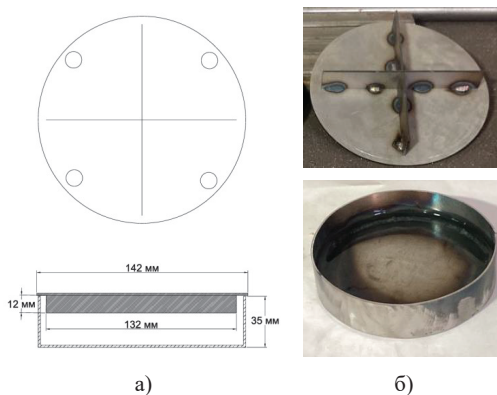


Рисунок 3.1 – Изготовленные контейнеры: а) геометрические размеры; б) внешний вид

Измерение температуры осуществлялось с помощью модулей измерения температуры *MAX6675*. Датчик распознает и корректирует изменения температуры окружающей среды с помощью компенсации холодного спая термопары. Устройство преобразует показания температуры окружающей среды в напряжение с помощью чувствительного к температуре диода. Модуль состоит из одной микросхемы *MAX6675ISA* фирмы *Maxim Integrated Products*, конденсатора и нескольких разъемов. Микросхема имеет 12 битный *ACP, SPI* интерфейс. В качестве измерителя температуры использовались термопары типа *K* в количестве четырех штук. Термопары были прикреплены с помощью термостойкого клея-герметика, область применения которого находится в температурном диапазоне применения ( $-15 - 400 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Термопары прикреплялись на внутреннюю стенку крышки контейнеров таким образом, чтобы концевой спай примыкал к ее центру (к месту пересечения ребер теплопередачи). Четвертый комплект термопары и модуля был предназначен для измерения температуры нагревательного элемента в процессе зарядки, в качестве которого использовался электрический нагреватель.

Регистрация температуры, определенной модулями *MAX6675* и перевод данных из цифрового сигнала в аналоговый обеспечивался использованием микроконтроллерной платы *Arduino UNO*. Корпус модулей имеет пять выходов предполагающих подключение к пяти портам микроконтроллера (рис. 3.2). Ввиду необходимости подключения большого количества модулей *MAX6675* к микроконтроллеру дополнительно использовалась макетная плата. На рис. 3.3 отображено подключение к портам микроконтроллера. Несмотря на достаточно большое количество модулей в процессе подключения удалось обойтись без использования расширительной базы для *Arduino*.



Рисунок 3.2 – Модули *MAX6675*, *Arduino UNO* и термопары, установленные на крышки контейнеров

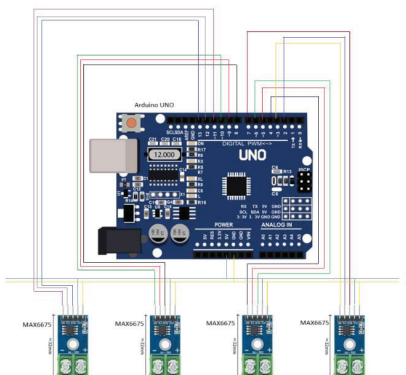


Рисунок 3.3 – Схема подключения модулей к микроконтроллеру

Встроенные библиотеки позволили написать программный код на языке *Arduino C*, обеспечивающий функцию измерения температуры на протяжении всей длительности экспериментальных исследований. Значение температуры фиксировалось каждые 30 секунд. Столь небольшой временной шаг измерения был определен потому, что в результате анализа данных планировалось не только определить время зарядки аккумулятора, но и оценить поведение функции температуры от времени в процессе зарядки для контейнеров с различным *PCM* на различных температурах нагрева. На рис. 3.4 представлен код, загруженный в память микроконтроллера.

Встроенная функция регулировки мощности электрического нагревателя не позволяла должным образом регулировать мощность подаваемого на оборудование напряжения. Для решения этой проблемы было решено использовать регулятор мощности электрического тока (симисторный диммер), рассчитанный на номинальную мощность 2,2 кВт. Для охлаждения греющихся элементов диммера была произведена замена встроенного алюминиевого радиатора охлаждения на радиатор с большим значением площади поверхности. Дополнительно радиатор диммера охлаждался воздушным потоком, нагнетаемым кулером, предназначенным для охлаждения электроники системного блока компьютера.

```
#include <GyverMAX6675.h>

#define CLK_PIN1 6    #define DATA_PIN1 4    #define CS_PIN1 5
#define CLK_PIN2 8    #define DATA_PIN2 10   #define CS_PIN2 9
#define CLK_PIN3 13   #define DATA_PIN3 11   #define CS_PIN3 12
#define CLK_PIN4 7    #define DATA_PIN4 3    #define CS_PIN4 2

GyverMAX6675<CLK_PIN1, DATA_PIN1, CS_PIN1> sensor1;
GyverMAX6675<CLK_PIN2, DATA_PIN2, CS_PIN2> sensor2;
GyverMAX6675<CLK_PIN3, DATA_PIN3, CS_PIN3> sensor3;
GyverMAX6675<CLK_PIN4, DATA_PIN4, CS_PIN4> sensor4;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
}

void loop()
{
  static uint32_t timer = millis();
  if (millis() - timer >= 30000)
  {
    timer = millis();

    if (sensor1.readTemp() )
    {float temp1 = sensor1.getTemp();
    Serial.print(temp1);}

    if (sensor2.readTemp() )
    {float temp2 = sensor2.getTemp();
    Serial.print(" ");
    Serial.print(temp2);}

    if (sensor3.readTemp() );
    {float temp3 = sensor3.getTemp();
    Serial.print(" ");
    Serial.print(temp3);}

    if (sensor4.readTemp() );
    {float temp4 = sensor4.getTemp();
    Serial.print(" ");
    Serial.println(temp4);}}}
```

Рисунок 3.4 – Программный код определения температуры на базе микроконтроллера *Arduino* с использованием пользовательской библиотеки

Установка настроек *REX-C100*, цифрового ПИД-регулятора температуры SSR, рассчитанного на регулировку до 400 °С, позволила, используя регулятор совместно с термореле, прекращать питание электрического нагревателя из сети при достижении требуемой температуры поверхности нагревателя. Настройки терморегулятора сбрасывались до заводских настроек с помощью встроенной функции после завершения каждого эксперимента, после чего требуемые настройки выставлялись заново ввиду увеличения критических значений температуры нагрева регулятора (и, соответственно, электронагревателя) с течением времени. Терморегулятор напрямую подключался в электрическую сеть, оставшиеся имеющиеся разъемы подключались к термореле и диммеру. Терморегулятор в комплекте также имеет термопару типа К для фиксирования температуры с последующим анализом данных и разрывом электрической цепи. На рисунке 3.5 отображена принципиальная схема установки, используемой для проведения экспериментального исследования.

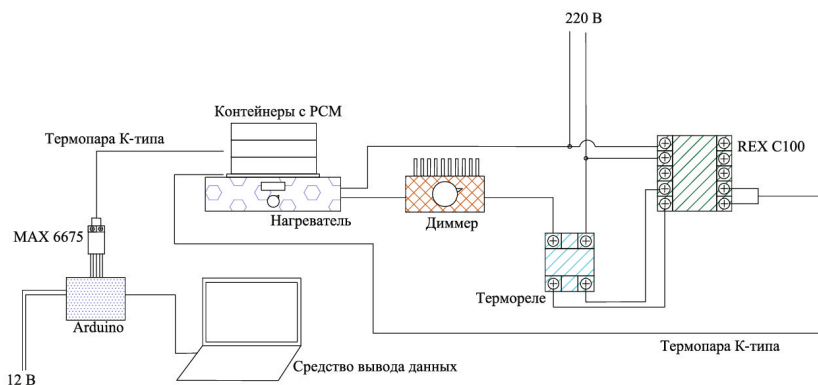


Рисунок 3.5 – Принципиальная схема экспериментальной установки

Длительность экспериментов на низких температурах могла достигать шести часов, для сокращения времени зарядки экспериментов был изготовлен теплоизолятор для контейнеров, устанавливаемый на них в процессе зарядки. В качестве теплоизолирующего материала использовалось одеяло из

кремнеземного волокна с коэффициентом теплопроводности  $\lambda_{од} = 0,03 \text{ Вт/(м·К)}$  и толщиной  $\delta_{од} = 0,013 \text{ м}$ . Поскольку теплоизоляция такого типа склонна осыпаться при механических нагрузках, а теплоизолирующие качества ухудшаются при продолжительном воздействии высоких температур, волокно было помещено в чехол из брезента, устойчивого к длительному воздействию температур до  $380^\circ\text{C}$ .

### 3.2 Описание методики исследований

Экспериментальные исследования по достижению повышения эффективности теплоаккумуляторов проводились при одновременном использовании двух и трех контейнеров с различным *PCM*. В первом случае использовались парафин П2 и церезин М75, во втором случае в третий контейнер помещалась стеариновая кислота.

В качестве параметров, определяющих эффективность компоновок аккумулятора, рассматриваются общее время зарядки, потенциальная циклическая стабильность системы, конечная температура слоев *PCM* и количество запасенной энергии.

Ввиду того, что контейнеры из непрозрачного материала не позволяют визуально оценить завершение процесса зарядки аккумулятора (зафиксировать переход всего объема нескольких *PCM* в жидкую фазу), появилась необходимость определения условий, согласно которым процесс зарядки аккумулятора можно считать завершенным.

Были определены условия, идентичные для процесса зарядки всех компоновок контейнеров на всех температурах нагрева: при достижении температур верхнего слоя  $T_{кон}$  в  $60$ ,  $75$  и  $80^\circ\text{C}$  для парафина, стеариновой кислоты и церезина соответственно нагрев (зарядка) аккумулятора прерывался. Температура слоев различных *PCM* при завершении зарядки превышает температуру плавления каждого *PCM* приблизительно на  $5^\circ\text{C}$ .

Такой выбор температуры слоев, требуемый для прекращения зарядки аккумулятора, был определен экспериментально путем зарядки контейнеров

на различных температурах с шагом в 25 °С. Анализ экспериментальных данных показал, что достижение верхних слоев *PCM* меньшей температуры (ближе к температуре плавления) не обязательно обеспечивает переход всего объема *PCM* в жидкую фазу. Выбранные же значения температуры соответствуют полному расплавлению всего объема *PCM*, подразумевающему переход материалов с фазовым переходом в однородное жидкое вещество с отсутствием мелкодисперсной фракции, которая может как равномерно распределена по всему объему *PCM*, так и представлена в виде осадка на дне контейнера (встречается чаще). После прекращения подачи теплоты к контейнерам, факт полного расплавления *PCM* дополнительно фиксировался визуально при съеме крышек контейнеров.

Материалы с фазовым переходом склонны к увеличению объема при переходе их в жидкую фазу, причем для каждого материала коэффициент расширения по объему имеет различное значение. Экспериментальным путем для всей совокупности имеющихся *PCM* было определено, что парафин в твердой фазе занимает на 15% меньше от объема в жидкой фазе, церезин – на 8 – 10%, а стеариновая кислота – в среднем на 5% [56]. Количество *PCM*, погруженного в контейнеры, определялось исходя из объема *PCM* именно в жидкой фазе для недопущения переливания *PCM* из контейнеров в процессе расплавления. Таким образом, объем *PCM* в каждом контейнере, учитывая объем, занимаемый ребрами теплопередачи, составил 0,0034 м<sup>3</sup>, для чего потребовалось 0,294; 0,289 и 0,290 кг парафина, церезина и стеариновой кислоты соответственно.

Контейнеры устанавливались друг на друга, сооружалась башенная конструкция. Поскольку днища контейнера изготавливались с помощью лазерной резки металла, удалось избежать прогиба металла и добиться плотного прилегания крышек к днищам контейнеров при многослойном расположении, обеспечивая равномерность теплопередачи. Измерения времени зарядки проводились при трех температурах поверхности нагревательного элемента – 90, 120 и 150 °С. Во время нагрева контейнеры

были теплоизолированы от окружающего воздуха для уменьшения потерь теплоты в окружающую среду.

В процессе исследования выяснилось, что продолжительный нагрев *PCM* на температурах, выше 100 °С приводит к уменьшению его объема в результате испарения наиболее легкой фракции. Самому большому испарению подвержен парафин П2 и церезин М75. Масса стеариновой кислоты практически не уменьшалась. Помимо химического состава *PCM*, такое поведение в процессе продолжительного нагрева на высоких температурах может объясняться температурой плавления веществ. Ввиду того, что переход парафина в жидкую фазу осуществляется раньше, время испарения летучих веществ у парафина более продолжительно. Данное утверждение подтверждается тем фактом, что уменьшение массы всех *PCM* при увеличении времени зарядки (при уменьшении температуры электронагревателя) проявляется сильнее. Ввиду этого, потребовалось измерять массу загруженных *PCM* контейнеров после каждого цикла экспериментов и, при необходимости, добавлять *PCM*, в среднем по 2 – 3 грамма.

По завершению зарядки теплового аккумулятора, состоящего из двух или трех слоев контейнеров с *PCM*, нагрев прекращался, контейнеры снимались с электронагревателя и остывали при комнатной температуре. Попытки ускорить процесс охлаждения горячих контейнеров привели к неожиданному результату – условия охлаждения *PCM* приводят к различному их поведению при следующих экспериментальных исследованиях. Во-первых, при помещении в среду с резким перепадом температур в процессе кристаллизации *PCM* приобретает различную форму, образуется воронка с существенным уменьшением высоты слоя в центре контейнера [57]. Во-вторых, охлаждение при таких условиях негативно сказывается на термической стабильности *PCM*, проявляемой в сдвиге температуры плавления (точки начала каплепадения) при многократном разрушении кристаллической решетки, что выясняется только после проведения эксперимента при анализе функции температуры. Учитывая эти факторы,

процесс охлаждения осуществлялся при комнатной температуре, занимал значительное количество времени в зависимости от температуры нагрева, и мог достигать 8 – 15 часов.

В процессе исследования проводились эксперименты для двух- и трехслойных тепловых аккумуляторов. Для двух слоев осуществлялась зарядка компонок контейнеров парафин П2 – церезин М75 и церезин М75 – парафин П2 при температуре нагревателя 90, 120 и 150 °С.

В случае с тремя контейнерами количество экспериментов кратно увеличивается. Ввиду большого массива требуемых исследований и невозможности параллельного измерения нескольких компонок, определяемого количеством имеющихся контейнеров и экземпляров измерительного оборудования, было решено проводить исследования только при температурах нагревателя для 120 °С. Достоверность полученных данных определялась размером доверительного интервала показаний температуры согласно ГОСТ 8.736-2011.

Важно отметить, что ввиду фиксирования температуры только верхнего слоя *PCM*, подтверждающего осуществление перехода полного объема *PCM* в жидкую фазу, необходимо определить разброс температур  $\Delta T$  по высоте по истечению зарядки на всех установочных температурах нагревателя. Определение значений  $\Delta T$  и  $T_{cp}$  по высоте контейнеров необходимо для расчета количества запасенной энергии  $Q_{сакк}$ .

### **3.3 Поверка и настройка оборудования. Оценка погрешности измерений**

Перед проведением измерений производилась предварительная поверка выходных значений температуры канала преобразования сигнала модуль–микроконтроллер–компьютер. В качестве эталонного прибора использовался галистановый лабораторный термометр с верхним порогом измерения температуры 200 °С. Согласование значений производилось при измерении температуры в сосудах с нагреваемой водой до 80 °С и с *PCM* выше 120 °С в



случае поддерживаемой температуры на нагревательном элементе в 200 °С. В качестве *PCM* при калибровке использовался церезин. Выбор *PCM* определен ввиду его меньшей склонности к испарению в процессе нагрева.

Поверка производилась для температур в диапазоне (0 – 160) °С с шагом измерения в 40 °С.

Поверка производилась при десятикратном измерении для каждой температуры, «выпадающие» результаты измерения модулем *MAX6675*, неизбежные при периодическом некорректном считывании термоЭДС и конвертации цифрового сигнала в аналоговый при резком изменении температуры, отсеивались. Их количество не превышало 10 % от общего количества измерений.

Руководствуясь абсолютной погрешностью жидкостного термометра, сделан вывод о том, что абсолютные значения отклонения выходного сигнала модуля от показаний эталонного термометра практически тождественны для всех температур жидкостей и в диапазоне (80–160) °С и не превышают половины цены деления эталонного термометра, соответствующей значению в  $\Delta t_m = \pm 1^\circ\text{C}$ . При температуре жидкости 40 °С абсолютная погрешность имеет самое большое значение среди всех установочных температур поверки ( $\Delta t_m = \pm 2^\circ\text{C}$ ). Это может объясняться слабым и нестабильным сигналом ввиду низких значений термоЭДС, считываемых со спая термопары.

Рассчитанная ошибка измерений температуры модулем измерения *MAX6675* согласуется со значением погрешности, представленной в паспортных данных изделия, составляющим ( $\Delta t_{m,пасп} = \pm 1-3$ ) °С в зависимости от подаваемого на питание микроконтроллера напряжения в рассматриваемом температурном диапазоне калибровки.

Установленная в техническом паспорте терморегулятора *REX-C100* абсолютная погрешность при температуре окружающей среды ( $23 \pm 3$ ) °С имеет значение  $\Delta t_{p,пасп} = \pm 3$  °С. Поверка термопары терморегулятора производилась аналогично поверке термопар модулей *MAX6675*. Абсолютная

погрешность, установленная в результате собственного исследования  $\Delta t_p$ , составила, при округлении в большую сторону, 1,5 °С.

В процессе экспериментального исследования использовались электронные весы, позволяющие оценить массу материалов и изделий. Значение паспортной абсолютной погрешности составляет  $\Delta t_e = \pm 1$  г. Самостоятельных исследований, определяющих точность измерения массы, не производилось, ввиду чего при расчете общей погрешности системы будет использована паспортная величина погрешности.

Анализ изменения температуры нагревательного элемента при установке различных настроек терморегулятора позволил определить оптимальные значения верхнего и нижнего предела регулировки температуры, а также температуру гистерезиса. Для используемой совокупности используемого оборудования оптимальные значения настроек пределов температуры были определены как: 89 °С и 92 °С, 119 °С и 122 °С, а также 149 °С и 153 °С для достижения устойчивой температуры нагревателя в 90, 120 и 150 °С соответственно. Значения гистерезиса для каждого случая равны 3 °С, 3 °С и 4 °С. Оценка целесообразности настроек терморегулятора, заключающаяся в фиксации изменения температуры нагревательного элемента на протяжении двух часов, позволила установить краткосрочное изменение температуры в диапазонах (88,75 – 91) °С и (118,5 – 121,75) °С для установочных температур нагревателя в 90 и 120 °С соответственно и в диапазоне (148,5 – 153,5) °С при температуре нагревателя 150 °С. Высокая инертность нагревателя, заключающаяся в длительной теплопередаче от ТЭНа к поверхности, не позволила добиться более равномерного температурного режима, однако, рассчитанная относительная погрешность установочной температуры нагревателя для всех режимов не превышает 2,5%.

При расчете погрешности в случае использования более одного оборудования необходимо учитывать их тип. Погрешности могут быть определены как случайные или систематические. Случайные погрешности возникают из-за случайных факторов, таких как цифровой шум или вибрация,

а систематические — из-за постоянных факторов (смещение нуля, неправильная калибровка приборов). В представленном исследовании ошибки измерений температуры датчиками модулей *MAX6675* и терморегулятора *REX-C100*, а также измерения массы расценивались как случайные погрешности, поскольку представлены не систематически, и определен лишь интервал рассеивания значений измеряемой величины (в том числе из-за приборного округления).

Поведение используемого оборудования может отличаться из-за температуры внутреннего воздуха и напряжения в питающей сети на всем протяжении одного конкретного эксперимента. Процесс плавления *PCM* при одинаковых условиях проведения эксперимента может отличаться от одного эксперимента к другому. На такое поведение *PCM* при изменении фазы влияют множество факторов: равномерность поверхности твердого *PCM* при кристаллизации; различное распределение твердой и жидкой фаз *PCM* в общем объеме; температура и влажность внутреннего воздуха в течение зарядки аккумулятора.

Представленные приборные погрешности, учитывая влияние перечисленных факторов, приводят к появлению погрешности  $\delta_{\text{общ}}$ , определяемой как сумма погрешностей совокупности использованного оборудования: терморегулятора *REX-C100*  $\delta_p$ , модуля *MAX6675*  $\delta_m$ , весов  $\delta_v$  и электрического нагревателя  $\delta_{\text{нагр}}$ . Поскольку абсолютные погрешности совокупности средств измерений представлены в различных единицах измерения, над ними отсутствует возможность выполнять математические операции. Таким образом, предварительный расчет относительной погрешности измерений по паспортным значениям абсолютной погрешности для всего оборудования позволил рассчитать максимальную относительную погрешность измерений  $\delta_{\text{общ.макс}}$  для системы в целом:

$$\begin{aligned} \delta_{\text{общ.макс}} &= \sqrt{(\delta_{p.\text{макс}}^2 + \delta_{m.\text{макс}}^2 + \delta_v^2 + \delta_{\text{нагр}}^2)} = \\ &= \sqrt{\left(\left(\frac{3}{25} \cdot 100\%\right)^2 + \left(\frac{3}{25} \cdot 100\%\right)^2 + \left(\frac{1}{291} \cdot 100\%\right)^2 + 2,5^2\right)} = 17,16\%, \end{aligned} \quad (3.3.1)$$

где относительные погрешности  $\delta_{p, \max}$  и  $\delta_{m, \max}$  рассчитаны для значений температуры РСМ, равной температуре внутреннего воздуха  $T_{\text{вн.возд}} = 25^\circ\text{C}$  и справедливы для измеряемой величины в момент начала экспериментального исследования (зарядки аккумулятора), а  $\delta_\theta$  определена из измерения среднего арифметического масс нагружаемых в контейнеры РСМ и округлена до 1%.

В то же время минимальное значение относительной погрешности совокупности используемого оборудования  $\delta_{\text{общ. мин}}$  на протяжении экспериментального исследования, рассчитанное для максимальной температуры рассматриваемого диапазона, равной  $150^\circ\text{C}$ :

$$\begin{aligned} \delta_{\text{общ. мин}} &= \sqrt{(\delta_{p, \min}^2 + \delta_{m, \min}^2 + \delta_\theta^2 + \delta_{\text{нагр}}^2)} = \\ &= \sqrt{\left(\left(\frac{3}{150} \cdot 100\%\right)^2 + \left(\frac{3}{150} \cdot 100\%\right)^2 + \left(\frac{1}{291} \cdot 100\%\right)^2 + 2,5^2\right)} = 3,79\% \end{aligned} \quad (3.3.2)$$

Таким образом, значение относительной погрешности системы  $\delta_{\text{общ}}$  находится в диапазоне 4–18%.

В результате полученных значений температуры от времени для возможности проведения анализа были построены графики, позволяющие оценить скорость зарядки тепловых аккумуляторов. На этом этапе первостепенной задачей являлось отсеивание «выпадающих» результатов измерений, появляющихся из-за погрешности измерения системы и недостаточной стабильности РСМ.

Многократные измерения, необходимые для более точного анализа, подлежат оценке погрешности согласно ГОСТ 8.736 – 2011 [58]. Руководствуясь представленной методикой, были определены доверительные границы погрешности для отклонения моментальных значений функции температуры. Расчет производился по графику изменения температуры двухслойного аккумулятора, содержащему 5 функций изменения температуры парафина.

Определена оценка измеряемой величины для произвольной точки 1 графика зарядки аккумулятора на  $120^\circ\text{C}$  для слоя парафина (рис. 3.5):

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{(65 + 60,75 + 63,75 + 65,5 + 64,5)}{5} = 63,9 \text{ }^{\circ}\text{C}, \quad (3.3.3)$$

где  $x_i$  –  $i$ -ый результат измерений,  $n$  – число исправленных результатов измерений.

Среднее квадратическое отклонение  $S$  группы, содержащей  $n$  результатов измерений:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}{n-1}} = \left[ \frac{(65 - 63,9)^2 + (60,75 - 63,9)^2 + (63,75 - 63,9)^2}{5-1} + \frac{(65,5 - 63,9)^2 + (64,25 - 63,9)^2}{5-1} \right]^{\frac{1}{2}} = 1,86 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (3.3.4)$$

Среднее квадратическое отклонение среднего арифметического (оценка измеряемой величины)  $S_{\bar{X}}$ :

$$S_{\bar{X}} = \frac{S}{\sqrt{n}} = \frac{1,86}{\sqrt{5}} = 0,83 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (3.3.5)$$

Критерий Граббса, позволяющий исключить грубые погрешности, на основе предположения о нормальном распределении результатов измерений:

$$G_1 = \frac{abs(x_{max} - \bar{X})}{S} = \frac{abs(65,5 - 63,9)}{1,86} = 0,86 \quad (3.3.6)$$

$$G_2 = \frac{abs(\bar{X} - x_{min})}{S} = \frac{abs(63,9 - 60,75)}{1,86} = 1,69 \quad (3.3.7)$$

Значения  $G_1$  и  $G_2$  меньше критического значения для пяти измерений ( $0,86 < 1,764$ ;  $1,69 < 1,764$ ), ввиду чего  $x_{max}$  и  $x_{min}$  не считаются промахом, а значение сохраняют в ряду результатов измерений.

При числе результатов измерений  $n < 15$ , принадлежность их к нормальному распределению не проверяют. Доверительные границы  $\varepsilon$  случайной погрешности оценки измеряемой величины определены по формуле:

$$\varepsilon = t \cdot S_{\bar{X}} = 2,571 \cdot 0,83 = 2,13 \text{ }^{\circ}\text{C}, \quad (3.3.8)$$

где  $t$  – коэффициент Стьюдента, который для доверительной вероятности 0,95 равен 2,571 при числе измерений  $n = 5$ .

Граница неисключенной систематической погрешности (НСП) оценки измеряемой величины  $\theta$ , для данного исследования определяется как  $\Delta T$  изменения температуры внутреннего воздуха и равна 2  $^{\circ}\text{C}$ .

Среднее квадратическое отклонение НСП:

$$S_{\theta} = \frac{\theta_{\Sigma}}{\sqrt{3}} = \frac{2}{\sqrt{3}} = 1,15 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (3.3.9)$$

Суммарное среднее квадратическое отклонение  $S_{\Sigma}$  оценки измеряемой величины:

$$S_{\Sigma} = \sqrt{S_{\theta}^2 + S_x^2} = \sqrt{1,15^2 + 0,83^2} = 1,42 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (3.3.10)$$

Доверительные границы погрешности оценки измеряемой величины:

$$\Delta = K \cdot S_{\Sigma} = 2,09 \cdot 1,42 = 2,96 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (3.3.11)$$

где  $K$  – коэффициент, определяемый принятой доверительной вероятностью 0,95, числом составляющих НСП и их соотношением:

$$K = \frac{\varepsilon + \theta_{\Sigma}}{S_x + S_{\theta}} = \frac{2,13 + 2}{0,83 + 1,15} = 2,09 \quad (3.3.12)$$

Согласно расчетам, доверительные границы интервала для определения функции температуры равны 2,96  $^{\circ}\text{C}$ . Это означает, что функция температуры пяти серий измерений, моментальные значения которой определяются как среднее арифметическое моментальных значений пяти измеренных функций, в каждой точке способна иметь отклонение на  $\pm 2,96 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , в пределах которых значения функций будут определяться как действительные с вероятностью 95 %.

Поскольку поведение функций температуры для измерения зарядки одной и той же компоновки слоев различно, а отклонение ее моментальных значений на протяжении измерения отличается, при расчете границ доверительного интервала была выбрана точка с максимальным отклонением моментальных значений (рис. 3.6). Как выяснилось из анализа полученных

функций температуры для зарядки других компоновок *PCM* (наблюдаемого расхождения моментальных значений функции), рассчитанная граница доверительного интервала справедлива для всей совокупности представленных в работе измерений и равна  $\pm 2,96$  °C. Ввиду того, что шаг измерения температуры с помощью используемого оборудования составляет 0,25 °C, будем считать, что граница доверительного интервала при округлении в меньшую сторону составляет 2,75 °C.

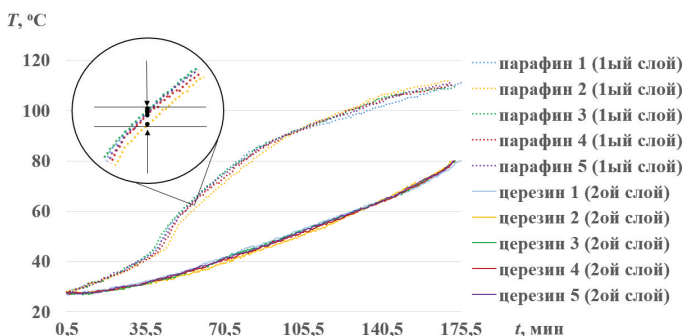


Рисунок 3.6 – Фиксирование моментальных значений функции на основе графика измерения температуры для зарядки компоновки парафин – церезин на 120 °C

Калибровка имеющегося оборудования, в совокупности с расчетом погрешности измерительных приборов и границ доверительного интервала многократных измерений позволяет объективно оценить различное поведение компоновок тепловых аккумуляторов при установочных температурах нагрева. Анализ выявленной эффективности зарядки, представленной в виде совокупности численных значений фиксируемых параметров, а также их сравнения для различных компоновок подлежит согласованию с результатами, представленными в научной литературе по тематике исследования.

Невозможность визуального наблюдения за поведением *PCM* в процессе зарядки, ввиду непрозрачности контейнера, существенно затрудняет процесс экспериментальных исследований, но позволяют проводить измерения при более высоких температурах. Выбранный материал контейнеров обеспечивает

необходимость принятия дополнительных допущений, характеризующих время окончания зарядки, а значит, не позволяет более точно зафиксировать факт полной зарядки контейнера при вероятном случае, когда *PCM*, ввиду различной мощности подведения тепловой энергии на различных температурных режимах и недостаточной циклической стабильности, переходит в жидкую фазу и имеет температуру верхнего слоя, отличную от принятой температуры, характеризующей полное расплавление *PCM* (в зависимости от используемого *PCM* принятая температура окончания зарядки различна). Учитывая вышесказанное, необходимо уточнить методику определения времени зарядки тепловых аккумуляторов – за время, необходимое для окончания зарядки слоя *PCM*, принимается время фазового перехода полного объема *PCM* и его нагрева до принятой температуры, даже если фазовый переход произошел при достижении температуры, меньшей, чем принятая экспериментально определенная температура, подтверждающая факт полного расплавления *PCM* с вероятностью, стремящейся к 100 %.



## ГЛАВА 4. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

### 4.1 Модель двухслойного теплового аккумулятора

При анализе полученных результатов измерений предлагается оценить (сравнить) полученные данные с точки зрения времени, необходимого для полной зарядки аккумулятора, с точки зрения скорости возрастания функции температуры от времени, с точки зрения температуры слоев *PCM* по завершению процесса зарядки и количества запасенной энергии. В первую очередь анализу подлежат функции температуры для двухслойных компоновок на всех температурах нагрева.

Компоновка теплоаккумулятора церезин – парафин (ЦП) при зарядке на 90 °С имеет меньшее время зарядки, чем компоновка парафин-церезин (ПЦ) (рис. 4.1, 4.2). Среднее время зарядки аккумулятора для компоновок ПЦ и ЦП на 90 °С соответственно равняется 337 и 214 минутам. Сокращение времени зарядки составило 36,4% при расположении церезина, то есть *PCM* с большей температурой плавления, ближе к нагревательному элементу.

Стоит отметить различный характер возрастания функций температуры от времени для верхнего слоя церезина и парафина для двух компоновок. В случае компоновки ПЦ первый слой парафина имеет резкое возрастание температуры на 90 минуте (в среднем) и продолжается до 130 минуты, за это время температура слоя изменилась с 48 до 65 °С. Зарядка же аккумулятора до 90 минуты и после 130 минуты происходила более равномерно, а функция  $F=T(t)$  была практически идентична линейной функции. В это же время первый слой церезина компоновки ЦП нагревается более равномерно на всем протяжении процесса зарядки и не имеет резкого возрастания значений температуры при нагреве. Предполагается, что в момент резкого возрастания температуры происходит соприкосновение ребер теплопередачи с жидким *PCM*, всплывающим из-за увеличения объема при переходе в жидкую фазу. Поскольку значения температуры жидкого *PCM* несколько выше температуры твердофазного *PCM*, происходит непродолжительное резкое возрастание

температуры на крышке контейнера, фиксируемое датчиком, после чего температура выравнивается, а дальнейший нагрев снова происходит равномерно.

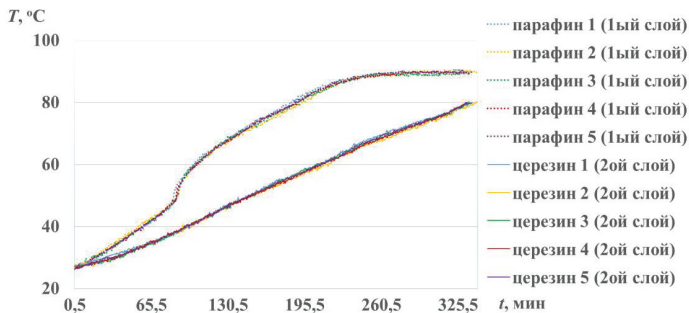


Рисунок 4.1 – График изменения температуры для зарядки компоновки парафин – церезин на 90 °C

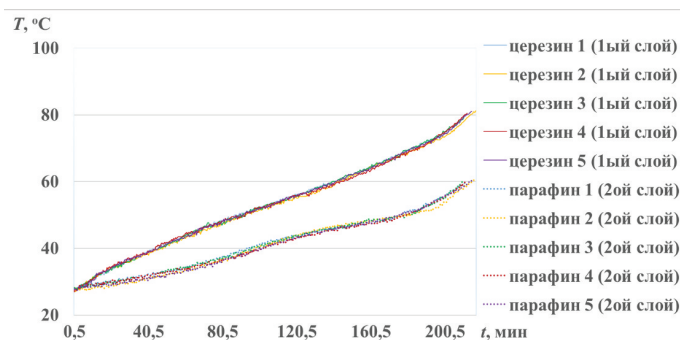


Рисунок 4.2 – График изменения температуры для зарядки компоновки церезин – парафин на 90 °C

Несмотря на то, что приблизительно на 240 минуте первый слой парафина при нагреве компоновки ПЦ на 90 °C приближается к максимальной температуре (установочной температуре нагревателя), а функция температуры для слоя парафина практически выравнивается с горизонталью, функция температуры для слоя церезина (второго слоя) практически не изменяет характер возрастания и сохраняет угол наклона. Это можно объяснить тем, что

количества теплоты, передаваемого от нагревательного элемента, при условии перехода всего объема парафина в жидкую фазу, достаточно для такого нагрева слоя церезина, при котором температура слоя изменяется равномерно, а функция температуры при нагреве соответствует функции изменения температуры для твердого тела.

По завершению процесса зарядки компоновки ПЦ и ЦП имеют следующие средние температуры слоев *PCM*: 89 °С для парафина и 80 °С для церезина, а также 80,75 °С для церезина и 60,5 °С для парафина соответственно. Примечательно, что при зарядке компоновки ЦП на 90 °С, подобранные материалы *PCM* позволили при последовательном расположении слоев добиться практически одновременного достижения слоями *PCM* экспериментально определенных значений температуры, устанавливающих факт полного расплавления *PCM*. Зарядка компоновки ПЦ на 90 °С способствовала длительному сохранению слоев парафина температуры, близкой к установочной температуре нагревательного элемента, что привело к большему испарению (разрушению) *PCM* вследствие перегрева при увеличении времени зарядки.

Сокращение времени зарядки двухслойного аккумулятора с компоновкой ЦП по сравнению с компоновкой ПЦ при нагреве на 120 °С составило 35,3%, при том, что для завершения процесса зарядки потребовалось (в среднем) 112 и 173 минуты соответственно (рис. 4.3,4.4).

Кривой функции температуры для слоя парафина компоновки ПЦ также характерно изменение характера возрастания функции. Таким образом, начиная с 40 минуты, повышение температуры слоя парафина происходит стремительнее. Поскольку нагрев происходит при большей температуре нагревательного элемента, точка начала резкого возрастания температуры сдвинулась по оси абсцисс влево. В остальном график зарядки компоновки ПЦ на 120 °С практически идентичен графику зарядки компоновки ПЦ на 90 °С, за исключением того, что при зарядке на 120 °С, контейнер с парафином не достиг

установочной температуры нагревательного элемента, ввиду чего на графике отсутствует горизонтальный участок кривой.

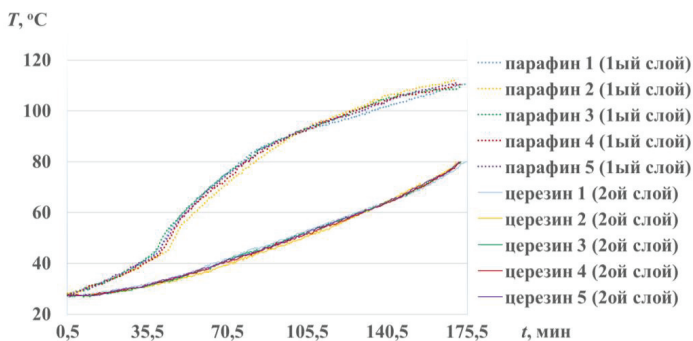


Рисунок 4.3 – График изменения температуры для зарядки компоновки парафин – церезин на  $120\text{ }^\circ\text{C}$

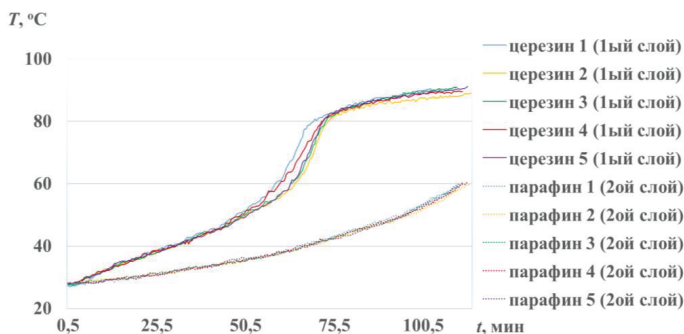


Рисунок 4.4 – График изменения температуры для зарядки компоновки церезин – парафин на  $120\text{ }^\circ\text{C}$

График зарядки компоновки ЦП на  $120\text{ }^\circ\text{C}$  существенно отличается от графика зарядки на  $90\text{ }^\circ\text{C}$ . В данном случае после равномерного нагрева церезина, продолжающегося до 55 минуты, происходит стремительное возрастание функции, продолжающееся до 70 минуты, когда температура слоя достигла значения  $80 - 82\text{ }^\circ\text{C}$ . Начиная с 70 минуты и до момента окончания зарядки аккумулятора температура церезина возрасла значительно медленнее, и более чем за 40 минут увеличилась всего лишь на  $8 - 10\text{ }^\circ\text{C}$ . В то

же время температура парафина на всем протяжении процесса зарядки возрастала по зависимости, близкой к линейной. Можно сделать вывод, что на интервале от 70 минут и до завершения процесса зарядки, большая часть теплоты, получаемой контейнером с церезином от нагревателя, затрачивается на расплавление парафина (второго слоя *PCM*). Система стремится к равновесию и выравниванию температурных полей, и, поскольку  $\Delta T_{\text{кк}}$  средних температур контейнеров с *PCM* существенно больше  $\Delta T_{\text{нк}}$  температуры нагревательного элемента и температуры контейнера с церезином, то теплота, в первую очередь, затрачивается именно на нагрев контейнера с парафином.

В момент окончания процесса зарядки на 120 °С слои церезина и парафина имели температуру верхнего слоя в 80 и 111 °С, а также 90,75 и 60,25°С для компоновок ЦП и ПЦ соответственно.

Зарядка компоновки ПЦ теплового аккумулятора при температуре нагревательного элемента в 150 °С завершилась по истечению 105 минут (в среднем), в то время как для компоновки ЦП – 70 минут, уменьшение времени зарядки составило 33,3% (рис. 4.5, 4.6).

Можно заметить, что на кривой температуры слоя парафина в компоновке ПЦ практически на всем протяжении зарядки сохраняется угол наклона кривой, в отличие от зарядки на 90 и 120 °С. Аналогично, кривая  $T(t)$  для церезина при зарядке компоновки ЦП более сглаженная, чем при нагреве на 120 °С. Такой эффект объясняется тем, что при большей температуре нагревателя, большее количество сообщаемой контейнерам теплоты позволяет нивелировать эффект, когда кривая температуры наклоняется к горизонту ввиду уменьшения теплопроводности *PCM* при переходе в жидкую фазу. Однако, стоит отметить, что наклон кривой температуры для рассматриваемого графика также начинается при достижении слоев церезина порядка 80 °С, аналогично графику нагрева на 120 °С.

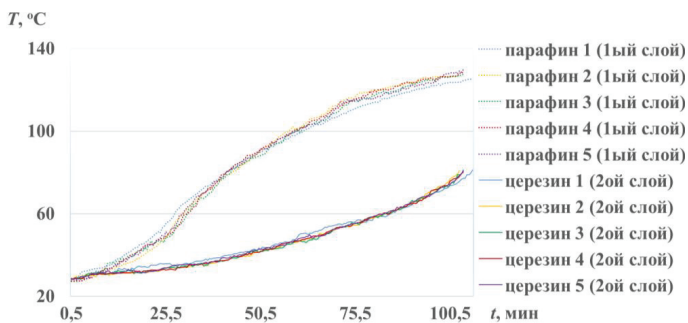


Рисунок 4.5 – График изменения температуры для зарядки компоновки парафин – церезин на 150 °C

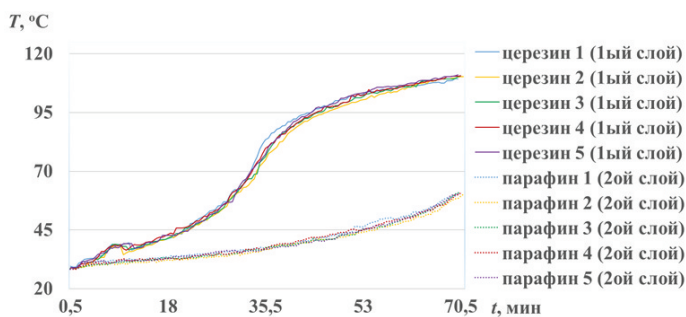


Рисунок 4.6 – График изменения температуры для зарядки компоновки церезин – парафин на 150 °C

Было определено количество запасенной тепловой энергии различными компоновками. Важно отметить, что температура *PCM* по высоте контейнера отличается, но при расчете количества теплоты будет использоваться измеренная температура верхнего слоя каждого *PCM* как наиболее низкая температура по высоте контейнера.

Расчет количества запасенной системой теплоты производится по формулам 3.1.5 и 3.1.6. В процессе расчета принимаются допущения, что значения температуры затвердевания фазопереходных материалов равны значениям их температуры плавления, а значения теплоемкости для твердой и жидкой фазы *PCM* идентичны. Таким образом, рассчитываемое количество запасенной теплоты состоит из тепловой энергии, определяемой разницей

температур нагреваемой массы  $m_{PCM}$  и теплоемкостью  $C_{PCM}$ , а также теплотой фазового перехода, определяемой удельной теплотой плавления вещества  $\mu_{PCM}$  (см. табл. 3.1). Поскольку в процессе измерений использовался теплоизолирующий чехол, потерями тепловой энергией решено было пренебречь. Рассчитанные значения теплоты позволяют утверждать, что в результате полного перехода всех видов используемых в аккумуляторе  $PCM$  в жидкую фазу, то есть по завершению процесса зарядки аккумулятора, компоновка слоев существенно влияет на количество запасенной энергии, и компоновкам ЦП свойственно меньшее количество запасенной энергии, по сравнению с заряженным теплоаккумулятором компоновки ПЦ на 10,8 – 11,5 % (табл. 4.1).

Таблица 4.1 – Количество запасенной энергии компоновками ЦП и ПЦ двухслойного аккумулятора

90 °C			$Q$ , Дж		$\Delta Q$ , %
	Температура верхнего слоя $PCM$ , °C		ЦП	ПЦ	
Парафин П2	60	90	69 836,9	88 824,2	10,8
Церезин М75	80	80	87 612,0	87 612,0	
$\Sigma$			157 448,9	176 436,2	
120 °C			$Q$ , Дж		
	Температура верхнего слоя $PCM$ , °C		ЦП	ПЦ	
Парафин П2	60	109	69 836,9	100 849,4	13,0
Церезин М75	90	80	94 080,0	87 612,0	
$\Sigma$			163 916,9	188 461,4	
150 °C			$Q$ , Дж		
	Температура верхнего слоя $PCM$ , °C		ЦП	ПЦ	
Парафин П2	60	127	69 836,9	112 241,8	11,5
Церезин М75	110	80	107 016,0	87 612,0	
$\Sigma$			176 852,9	199 853,8	

Можно сделать вывод, что выбор материала  $PCM$  и выбор компоновки теплового аккумулятора зависит от индивидуальных условий процесса или

технологии, в которых будет использоваться система с РСМ. Потребность в аккумулировании максимально возможного количества теплоты за установленный временной интервал, не меньший, чем экспериментально определенное время зарядки аккумулятора, способна удовлетворить компоновка ПЦ, когда, в то же время, при данной компоновке РСМ подвергается более высоким температурам, что, как следствие, приводит к ухудшению циклической стабильности РСМ (уменьшению числа циклов без уменьшения эффективности).

При зарядке двухслойного теплового аккумулятора сокращение времени плавления *PCM* для компоновки ЦП по сравнению с компоновкой ПЦ составляет 33,3 – 36,5% на рассматриваемом диапазоне температур. Однозначно, что в зависимости от используемых *PCM* с определенными значениями температуры плавления и теплоемкости, уменьшение времени плавления при зарядке аналогичного объема *PCM* при тех же температурах нагревателя будет отличаться от полученных значений для церезина и парафина. Процесс зарядки нагревателя при температурах, находящихся ближе к температуре плавления *PCM* с наибольшей температурой плавления, способствует еще большему сокращению времени зарядки при расположении *PCM* по принципу уменьшения температур плавления по мере удаления от греющей стенки. Для подтверждения представленного в литературе эффекта о возможности управления процессом аккумулирования теплоты при большем числе слоев *PCM* было решено провести экспериментальное исследование трехслойного аккумулятора. Использование совокупности из двух *PCM*, чьи значения температуры плавления отличаются на 26 °С, может применяться в системах теплосъема и теплоаккумулирования аналогично совокупности *PCM* с меньшими различиями в температуре плавления, представленными в литературе. Отличительной особенностью процессов зарядки с используемой совокупностью *PCM* является наличие бóльших возможностей в изменении времени зарядки и количестве запасенной тепловой энергии за равный промежуток времени при изменении компоновки слоев, что характеризует, в



перспективе, наличие лучшей способности управления тепловым режимом основного оборудования и систем, где рационально использовать тепловые аккумуляторы и системы теплосъема.

#### 4.2 Численная модель двухслойного каскадного аккумулятора «парафин-церезин»

Создание численной модели начинается с построения 3Д геометрии. По размерам реального образца построена модель каскадного аккумулятора в программе SolidWorks. Модель состоит из трех частей: Корпус, ТАМ, крышка с ребрами. На рисунке 4.7. представлена готовая сборка аккумулятора. Далее построенная 3Д загружается в Comsol Multiphysics с помощью функции «Import». Для создания второго слоя аккумулятора используется функция «Сору», в которой выбирается объект копирования, а также расположение в координатной плоскости.

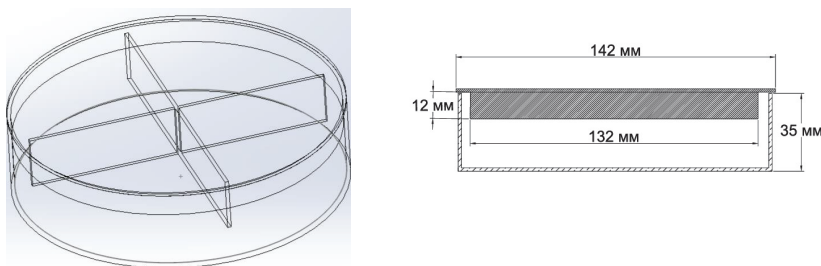


Рисунок 4.7 – 3D модель каскадного аккумулятора

При рассмотрении крышки аккумулятора можно увидеть, что соединение ребер с крышкой осуществляется сваркой не по всей области. Построение этих областей осуществляется методом размещения плоскости «Work Plane» на высоте места присоединения ребра, и уже на ней вырисовываются зоны сварного соединения. Схема расположения сварных швов представлен на рисунке 4.8.

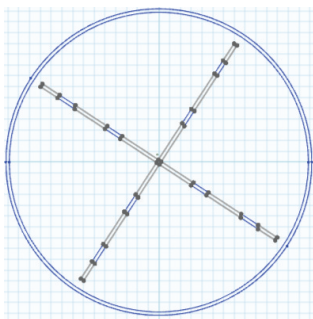


Рисунок 4.8 – Расположение сварных соединений

В данной модели использовался один физический процесс, а именно нагрев. Для его описания использовался модуль «Heat Transfer in Solids and Fluids», дерево модуля представлено на рисунке 4.9. Задача граничных условий теплообмена осуществлялось по методике, описанной во второй главе. Дополнительным условием является добавление второго фазопереходного ТАМ, соответственно включающий второй элемент «Phase Change Material», в данном случае для церезина. Также для того, чтобы исключить теплообмен между местом соприкосновения крышки и корпуса, а также места неповаренных участков соединения ребер использовалась функция «Thermal Contact» где задавались нулевые значения коэффициента теплопередачи.

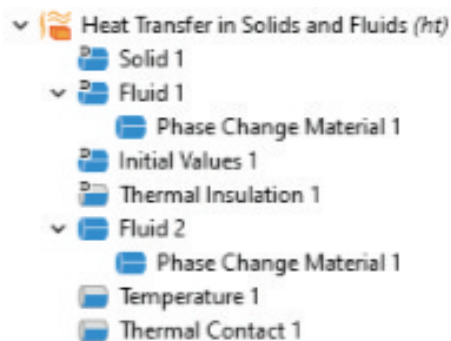


Рисунок 4.9 – Общий вид элементов модуля «Heat Transfer in Solids and Fluids»

Сетка модели была выбрана «Extremely Fine» и включает 13459518 элементов тетраэдральной формы. Расчет модели осуществлялся на сервере (2.6 ГГц, ОЗУ 128 Гб) и занял 41 минуту.

На рисунке 4.10 представлен график изменения температуры АТФП с течением времени нагрева, в месте присоединения термопар реального образца. Места измерения температуры изображены на Рисунке 4.11. На графике видно, что линии изменения температур аккумуляторов, при нагреве 120°C, имеют схожую форму с результатами реального эксперимента. Повышение температуры аккумулятора с церезином происходит равномерно, а достижение температуры плавления церезина достигается только в конце эксперимента. Линия температуры парафина имеет точку перелома при времени нагрева 48 мин, что также сходится с результатами эксперимента. Однако, в конце численного эксперимента температура парафина составляет 92°C, что разнится с реальными данными на 18°C. Это может быть обусловлено тем, что при задании материалов были использованы усредненные теплофизические параметры (теплоемкость, теплопроводность, скрытая теплота плавления) без учета их температурной зависимости. Также в расчетной модели не учитывается свободная конвекция, которая ускоряет теплоперенос в расплавленной фазе ТАМа. На рисунке 4.11 показано распределение температур по стенкам АТФП, на котором можно заметить, что тепловая энергия не передается на крышку через боковые стенки корпуса.

Результаты численного моделирования представлены на рис. 4.13. На нем представлено движение фронта плавления в разные моменты времени нагрева. Для отображения изменения фазового состояния ТАМ в объемном объекте использовалась функция «*Slice*», которая разделяет 3D объект на заданное количество плоскостей. По результатам видно, что движение фронта плавления парафина начинается уже с первой минуты нагрева. Жидкая фаза сначала образуется на днище контейнера, после этого происходит плавление пристеночных слоев. Фронт имеет дугообразную форму и движется к центру. Полное расплавление парафина происходит через 57 минут нагрева.

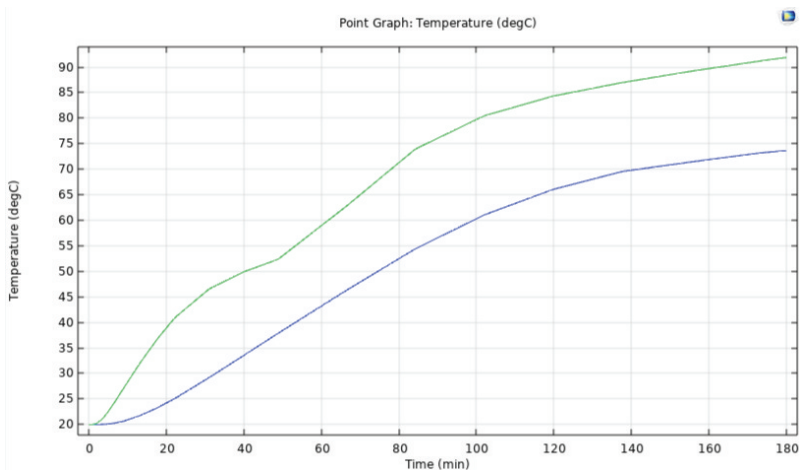


Рисунок 4.10 – График изменения температур АТФП  
(верхняя линия - парафин; нижняя линия- церезин)

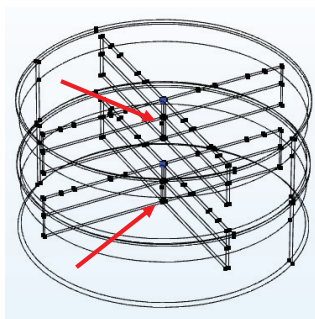


Рисунок 4.11 – Точка измерения температур

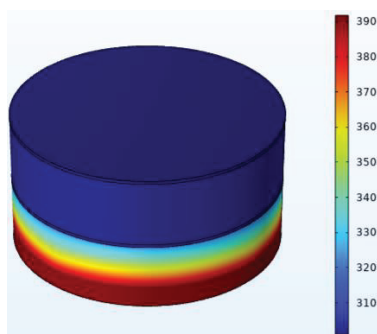


Рисунок 4.12 – Распределение температур по стенкам корпусов АТФП

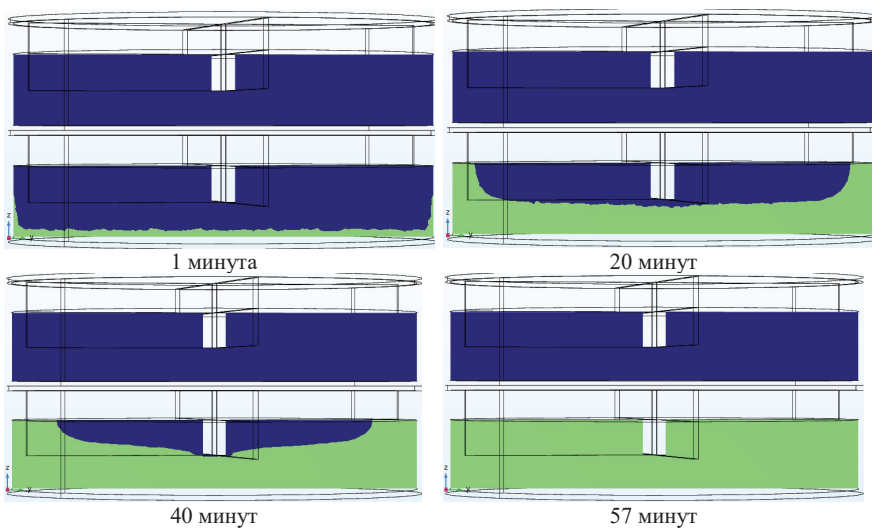


Рисунок 4.13 – Фронт нагрева в разные моменты времени

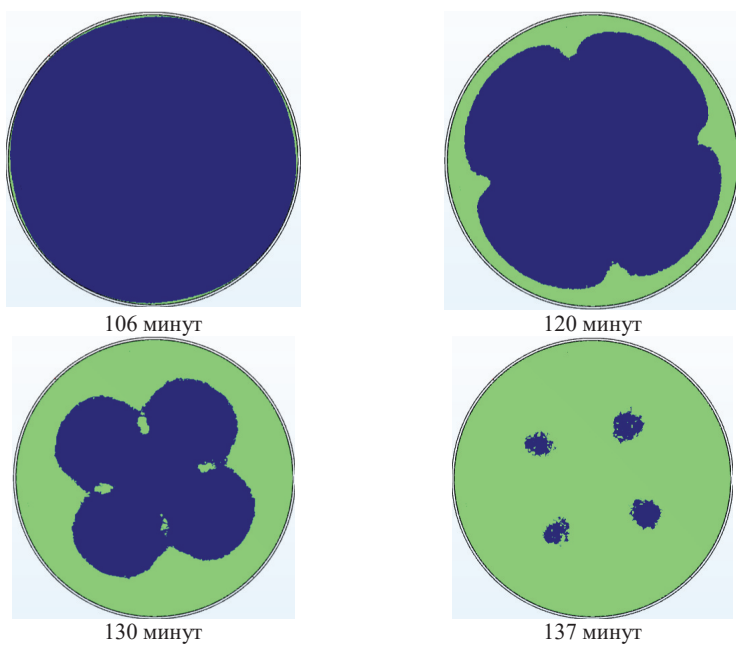


Рисунок 4.14 – Фронт плавления в разные моменты времени

Плавнение церезина М75 началось через 106 минут нагрета. Для визуализации передачи тепловой энергии к днищу второго аккумулятора на рис. 4.14 представлено движение фронта плавления слоя парафина, расположенного около днища контейнера. Движение фронта плавления начинается с пристеночных областей, расположенных перпендикулярно ребрам, расположенным на крышке первого контейнера. При дальнейшем нагрете фронт плавления движется, как и у нижнего контейнера, от стенок к центру. Однако в областях церезина, расположенных над ребрами, плавление происходит быстрее, это можно увидеть на снимках после 120 и 130 минут нагрета. Плавление нижней области церезина произошло после 138 минут нагрета.

### 4.3 Модель трехслойного теплового аккумулятора

Измерения температуры в процессе зарядки трехслойного теплового аккумулятора, где в качестве *PCM* для слоев использовались церезин, парафин и стеариновая кислота, производился до получения совокупности трех удовлетворяющих доверительному интервалу функций температуры для перечисленных слоев *PCM*. Такое заведомое уменьшение количества повторений эксперимента обосновано увеличением количества компоновок теплового аккумулятора ввиду увеличения количества слоев, и, как следствие, существенного увеличения времени, необходимого для получения результатов измерений, обладающих достаточным коэффициентом сходимости.

Зарядка трехслойного теплового аккумулятора производилась при установочной температуре нагревателя в 120 °С аналогично методике проведения эксперимента для двухслойного теплоаккумулятора. Всего было исследовано шесть возможных компоновок контейнеров. Измерения температуры также производились аналогично измерениям для двухслойного теплоаккумулятора.

Анализ графиков изменения температуры в процессе зарядки позволил установить время зарядки тепловых аккумуляторов, которое отражено на

гистограмме (рис. 4.15). Как и в случае с зарядкой тепловых аккумуляторов, состоящих из двух слоев *PCM*, наибольшее время зарядки соответствует компоновке с увеличением  $T_m$  по мере удаления от горячей стенки, таким образом, компоновка ПСЦ имеет среднее время зарядки приблизительно 324 мин. В отличие от двухслойного теплового аккумулятора, где наименьшее время зарядки теплоаккумулятора соответствовало компоновке в случае расположения *PCM* при уменьшении температуры плавления по мере удаления от горячей стенки для всех температур зарядки, время зарядки компоновки ЦСП (рис. 4.16) приблизительно равняется, и даже несколько больше, времени зарядки компоновки СЦП (рис. 4.17). Таким образом, предполагаемый эффект уменьшения времени зарядки теплового аккумулятора несправедлив при рассмотрении двух конкретных компоновок ЦСП и СЦП. Несмотря на это, первый слой *PCM* в компоновке СЦП на 178 минуте нагрелся до максимальной температуры, и длительное время (около 30 минут) подвергался воздействию максимальной установочной температуры, в отличие от компоновки ЦСП, когда по завершению процесса зарядки первый слой *PCM* (церезина) имел температуру 110 °С.

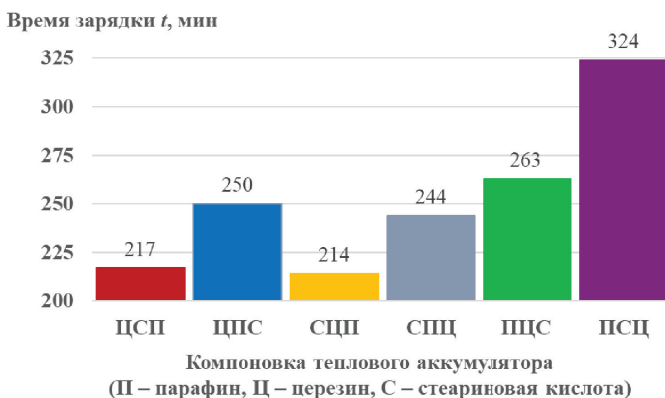


Рисунок 4.15 – Гистограмма времени зарядки трехслойного аккумулятора шести компоновок на 120 °С

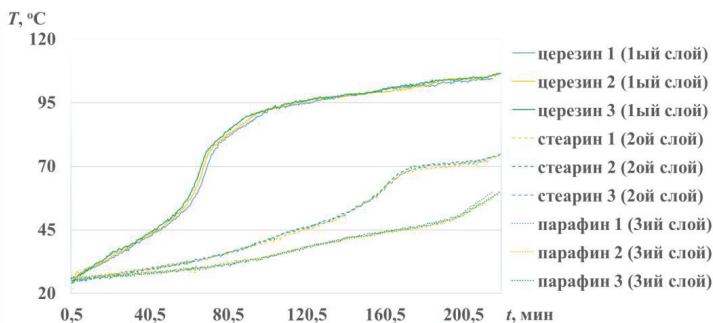


Рисунок 4.16 – График изменения температуры для зарядки компоновки церезин – стеариновая кислота – парафин на 120 °C

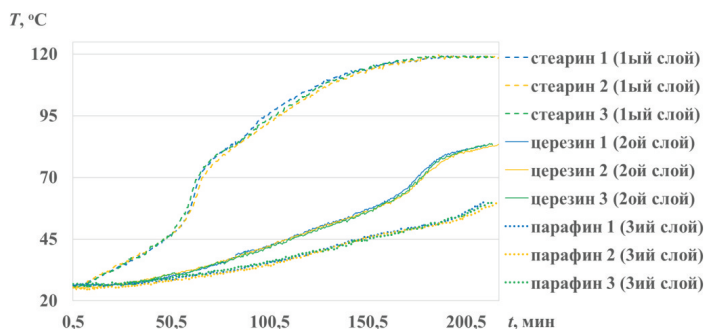


Рисунок 4.17 – График изменения температуры для зарядки компоновки стеариновая кислота – церезин – парафин на 120 °C

Представленный на графиках характер функции температуры первых слоев *PCM* в компоновках ЦСП и СЦП, можно объяснить тем, что стеариновая кислота имеет большую теплопроводность, чем церезин (см. табл. 3.1). Это способствует лучшей теплопередаче от нагревательного элемента (для первого слоя стеариновой кислоты), несмотря на небольшое различие в температуре плавления церезина и стеарина. Несмотря на то, что активный процесс нагрева первых слоев церезина и стеариновой кислоты для рассматриваемых компоновок начался приблизительно в одно и то же время (65 минута), далее больший угол наклона имеет кривая стеарина, что, кроме большей теплопроводности, может объясняться меньшим значением теплоемкости.



Компоновки ЦПС и СПЦ также имеют приблизительно одинаковое время зарядки – 250 и 244 мин соответственно (рис. 4.18, 4.19). Кривые температур слоев стеарина и церезина для зарядки аккумулятора указанных компоновок практически идентичны на всем протяжении процесса зарядки. Замена слоев церезина на стеариновую кислоту (и наоборот) не приводит к существенному изменению графика. Сохраняется как угол наклона функции, так и ее геометрия на всем протяжении зарядки в целом. Различие заключается лишь в том, что нагрев до максимально возможной температуры для стеариновой кислоты произошел на 20 минут раньше и, как следствие, продолжался на 35 минут дольше.

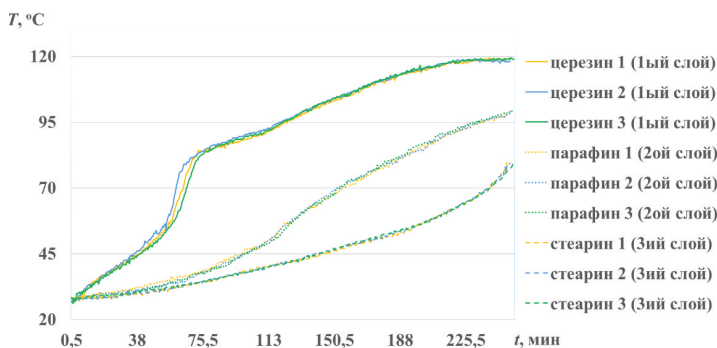


Рисунок 4.18 – График изменения температуры для зарядки компоновки церезин – парафин – стеариновая кислота на 120 °C

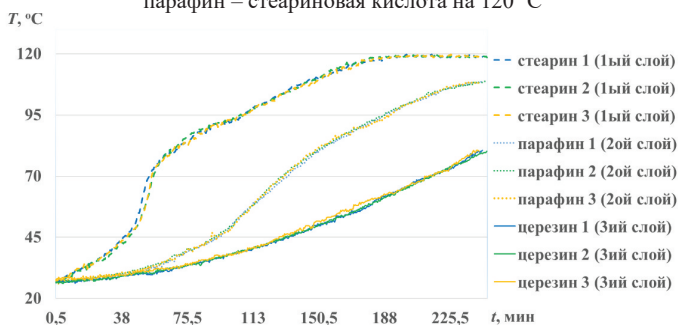


Рисунок 4.19 – График изменения температуры для зарядки компоновки стеариновая кислота – парафин – церезин на 120 °C

Несмотря на то, что кривые температуры стеарина и церезина в компоновках очень схожи, второй слой *PCM* (слой парафина) в компоновке ЦПС по завершению процесса зарядки имеет температуру слоя, более чем на 10 °С превышающую температуру аналогичного слоя для компоновки СПЦ. Церезин, являющийся первым слоем *PCM* в компоновке ЦПС, в результате процесса зарядки нагрелся до установочной температуры горячей стенки, а существование при максимальной температуре имело продолжительность в 38 минут, в то время как церезин в компоновке ЦСП нагрелся всего лишь до 110°С. Слой стеариновой кислоты в обоих случаях (компоновки СПЦ и СЦП) нагрелся до установочной температуры горячей стенки, но при компоновке СЦП находился под воздействием максимальной температуры более чем на 10 минут дольше. Различия в температурах слоев в момент завершения процесса зарядки, опять же, наиболее вероятно, обуславливаются меньшей теплоемкостью и большей теплопроводностью стеариновой кислоты, по сравнению с церезином.

Зарядка теплового аккумулятора компоновок ПЦС и ПСЦ требует наибольшей продолжительности и занимает 263 и 324 минуты соответственно (рис 4.20, 4.21).

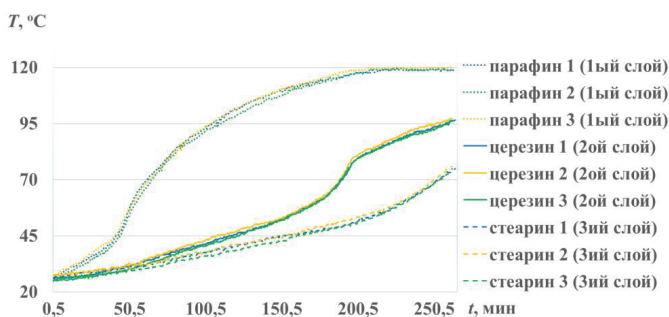


Рисунок 4.20– График изменения температуры для зарядки компоновки парафин – церезин –стеариновая кислота на 120 °С

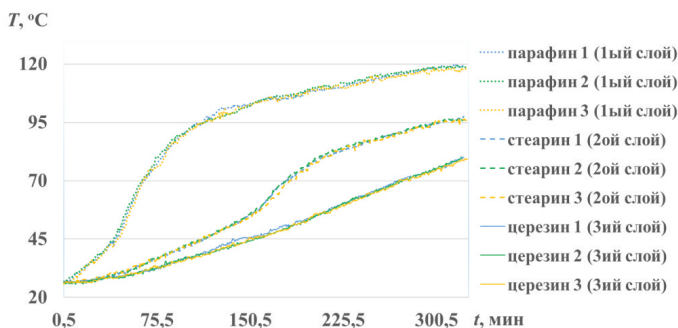


Рисунок 4.21 – График изменения температуры для зарядки компоновки парафин – стеариновая кислота – церезин на 120 °C

Несмотря на наибольшее время зарядки компоновки ПЦС, температура парафина приблизилась к установочной температуре нагревателя лишь к концу процесса зарядки (более, чем на 300 минуте), когда, в то же время зарядка двухслойных компоновок показала, что парафин за равный промежуток времени способен нагреться на большую температуру, чем церезин. Полученный эффект объясняется высокой теплопроводностью стеарина, когда интенсивность теплопередачи при подводе теплоты от первого контейнера ко второму позволяет быстрее снимать теплоту с металлической поверхности контейнеров для передачи последующим слоям *PCM*. Стоит отметить, что температура второго слоя в момент окончания зарядки компоновок ПЦС и ПСЦ (стеариновой кислоты и церезина соответственно) равна приблизительно 95 °C при одинаковой разнице температур первого и второго слоев  $\Delta T_{1-2}$ , равной 25 °C. Для этого компоновке ПЦС потребовалось на один час меньше времени, что соответствует практически 20% от общей продолжительности зарядки. После 150 минуты температура стеариновой кислоты в компоновке ПСЦ начала возрастать стремительнее, в то время кривая температуры церезина в компоновке ПЦС приобретает больший угол наклона лишь после 190 минуты. Такое поведение слоев *PCM* дает возможность управления процессом аккумулирования энергии за счет использования *PCM* с

определенными значениями теплофизических параметров (см. табл. 3.1), совокупность которых позволяет, в данном случае, добиться схожей  $\Delta T$  между слоями *PCM* и одинаковой температуре слоев *PCM* на выходе для различных компоновок при сокращении времени зарядки аккумулятора.

Циклическая стабильность системы с *PCM* во многом зависит от характера протекания процессов затвердевания (кристаллизации) при разрядке аккумулятора. В литературе утверждается, что уменьшение разницы температуры слоев *PCM* в момент завершения процесса зарядки, способствует улучшению циклической стабильности *PCM* за счет равномерного затвердевания всех слоев *PCM* по высоте емкости. Ввиду того, что исследование направлено на повышение эффективности тепловых аккумуляторов, необходимо определить компоновки трехслойного аккумулятора, потенциально обладающие большим сроком эксплуатации при сохранении термической эффективности. Определение разницы температур слоев *PCM* показало, что наименьшей максимальной  $\Delta T$  ( $\Delta T_{1-3}$ ) между первым и третьим слоями *PCM* обладают компоновки ЦПС, СПЦ и ПСЦ, несколько большая  $\Delta T_{1-3}$  справедлива для компоновок ЦСП и ПЦС (табл. 4.2). Наибольшей разницей температур первого и третьего слоя обладает компоновка СЦП. Также стоит отметить, что заряженный аккумулятор компоновки ПЦС имеет равные  $\Delta T_{1-2}$  и  $\Delta T_{2-3}$ , в то время как в компоновках ЦПС и ПСЦ  $\Delta T_{1-2}$  и  $\Delta T_{2-3}$  имеют близкие значения. Таким образом, используемые в работе *PCM*, являющиеся основными компонентами теплоаккумулятора, предположительно, при прочих равных условиях эксплуатации, будут обладать лучшей термической и циклической стабильностью в компоновках ЦПС, ПЦС и ПСЦ, что позволит эксплуатировать тепловой аккумулятор более продолжительное время без необходимости замены *PCM* ввиду снижения эффективности использования. Компоновка СПЦ, несмотря на наименьшее значение  $\Delta T_{1-3}$ , обладает относительно большим значением  $\Delta T_{1-2}$  (29 °C), что не позволяет охарактеризовать компоновку как потенциально обладающую высокой циклической стабильностью.

Таблица 4.2 – Разница температур слоев *PCM* по завершению зарядки трехслойных компоновок

	$\Delta T, ^\circ\text{C}$					
	ЦСП	ЦПС	СЦП	СПЦ	ПЦС	ПСЦ
1–2	31	21	36	10	22	22
2–3	14	18	23	29	22	17
<i>MAX</i> (1–3)	45	39	59	39	44	39

Как видно из расчета количества запасенной тепловой энергии трехслойными компоновками аккумулятора (табл. 4.3), компоновка СПЦ в момент окончания зарядки обладает наибольшим количеством запасенной энергии. Компоновки ЦПС, ПЦС и ПСЦ способны запасти на 0,74%, 1,77% и 1,62% меньше тепловой энергии соответственно. Значительно меньшее количество тепловой энергии было аккумулировано компоновками СЦП и ЦСП (приблизительно на 10,0% и 13,1% меньше относительно компоновки СПЦ соответственно). Компоновки ЦСП и СЦП имеют наименьшее время зарядки, и, поскольку в процессе зарядки им было сообщено меньшее количество теплоты, то для данных компоновок *PCM* справедливо отсутствие неоправданного перегрева *PCM* в процессе зарядки и меньшее количество запасенной энергии.

Среди компоновок *PCM*, аккумулировавших наиболее количество тепловой энергии отдельного внимания заслуживает компоновка СПЦ, обладающая меньшим времени зарядки среди четырех компоновок при большем количестве запасенной энергии. Примечательно, что компоновка ЦПС, находящаяся на втором месте по количеству  $Q_{акк}$  имеет в качестве второго слоя *PCM* слой парафина, аналогично компоновке СПЦ. В то же время, отличие компоновок СПЦ и ЦПС состоит в том, что компоновке СПЦ характерно более равномерное количество запаасаемой слоями *PCM* тепловой энергии, что положительно сказывается на процессе теплоотдачи при разрядке и образовании кристаллической решетки при затвердевании *PCM*. Количество

запасенной энергии в компоновке СПЦ слоями стеариновой кислоты и парафина имеет близкие значения, существенно большие, чем количество запасенной энергии слоем церезина, в то время как наименьшее количество в компоновке ЦПС аккумулировано слоем стеариновой кислоты. Это может объясняться тем, что нагрев второго и третьего слоя в компоновке СПЦ начинается раньше и происходит интенсивнее ввиду большей теплопроводности и меньшей теплоемкости стеарина, что позволяет сообщить большее количество теплоты слою парафина и церезина, и, соответственно, увеличить количество запасенной энергии этими слоями *PCM*. Недостаточная теплопроводность церезина, в совокупности с высокой теплоемкостью, не позволяет добиться более равномерного нагревания слоев *PCM* в процессе зарядки компоновки ЦПС.

Таблица 4.3 – Количество запасенной энергии компоновками трехслойного аккумулятора

120 °C							$Q$ , Дж					
	Температура верхнего слоя <i>PCM</i> , °C						ЦСП	ЦПС	СЦП	СПЦ	ПЦС	ПСЦ
	ЦСП	ЦПС	СЦП	СПЦ	ПЦС	ПСЦ						
Парафин П2	60	98	60	109	119	119	71 045,1	95 511,8	71 045,1	102 594,2	109 032,8	109 032,8
Церезин М75	105	119	83	80	97	80	102 017,0	110 918,2	88 029,4	86 122,0	96 930,6	86 122,0
Стеариновая кислота	74	80	119	119	75	97	83 299,6	86 362,0	106 267,6	106 267,6	83 810,0	95 038,8
$\Sigma$							256 361,7	292 792,0	265 342,1	294 983,8	289 773,4	290 193,6

Компоновки ПЦС и ПСЦ, аккумулировавшие практически одинаковое количество тепловой энергии, позволяют в очередной раз убедиться в эффективности использования *PCM* с большими значениями теплопроводности. Компоновки отличаются друг от друга материалом с фазовым переходом второго и третьего слоя, и расположение стеарина ближе к горячей стенке способствует лучшей теплопередаче к третьему слою церезина в компоновке ПСЦ. Таким образом, слой стеариновой кислоты и церезина в компоновке ПСЦ по завершению процесса зарядки

саккумулировали практически одинаковое количество теплоты, несмотря на различные значения удельной теплоемкости.

Примерно одинаковое время зарядки справедливо для компоновок ЦСП и СЦП, а также ЦПС и СПЦ, то есть для компоновок *PCM*, когда слои церезина и стеариновой кислоты меняются местами. Различие в количестве запасенной энергии для указанных компоновок  $\Delta Q_{\text{сакк}}$  составляет 3,4 и 0,7% соответственно. Различия во времени зарядки и количестве запасенной энергии при анализе совокупности имеющихся данных по сравнению с другими компоновками незначительны. Таким образом, на примере двух указанных пар компоновок *PCM* можно сделать вывод, что выбор оптимальных *PCM* является ключевой задачей при использовании многослойных аккумуляторов, поскольку удельная теплоемкость, удельная теплота плавления и теплопроводность *PCM* в совокупности способны уменьшить (либо свести к минимуму) ожидаемые эффекты сокращения времени зарядки/увеличения количества запасенной тепловой энергии от расположения *PCM* с градиацией температуры плавления при не рациональном расположении (при выборе компоновки). Добиться приблизительно одинаковых результатов по времени зарядки и количеству  $Q_{\text{сакк}}$  возможно при зарядке различных компоновок, но, в таком случае, слоям *PCM* свойственно как продолжительное, так и краткосрочное существование при температурном режиме, значительно превышающем значение их температуры плавления, что негативно сказывается на циклической стабильности.

Использование двухслойных аккумуляторов с парафином и церезином позволило добиться уменьшения времени зарядки аккумулятора на 36,4%, 35,3%, 33,3% при расположении церезина в качестве первого слоя на трех температурных режимах зарядки. Компоновки же ПЦ на всех температурах нагрева по завершению зарядки саккумулируют большее количество теплоты, но ввиду излишнего нагрева склонны к разрушению и уменьшению срока эксплуатации.

Наибольшее различие во времени зарядки тепловых аккумуляторов трехслойной компоновки наблюдается для компоновок ПСЦ и СЦП и составляет 34,0%, в то время как компоновкой СЦП запасено на 8,6% меньше тепловой энергии, по сравнению с ПСЦ.

В трехслойных компоновках располагать на первый слой *PCM* с низкой теплопроводностью, либо высокой теплоемкостью нецелесообразно, так как это ухудшает теплопередачу с последующими слоями *PCM*, и, как следствие, приводит к увеличению времени зарядки.

Относительно высокая теплопроводность стеариновой кислоты, по сравнению с другими используемыми в исследовании *PCM*, способствовала уменьшению времени зарядки аккумулятора в компоновках СЦП и СПЦ. Поскольку стеарин обладает высоким значением удельной теплоты фазового перехода, наиболее рационально его использовать в качестве *PCM* первого слоя, что позволило ускорить процесс плавления всего объема стеарина при большей интенсивности подвода тепловой энергии (от нагревателя напрямую).

В трехслойных компоновках с исследованной совокупностью *PCM* в качестве первого и второго слоя наиболее целесообразно использовать стеарин ввиду большей теплопроводности и интенсификации теплопередачи дальнейшим слоям, в то время как церезин во втором и третьем слое должен быть расположен раньше стеарина, так как для перехода в жидкую фазу наиболее удаленного слоя решающее значение имеет температура плавления *PCM*.

Наименьшее время зарядки соответствует двухслойной компоновке ЦП и трехслойным компоновкам СЦП и ЦСП, в то время как наибольшее среди всех компоновок количество сохраненной энергии на всех температурных режимах справедливо для двухслойной компоновки ПЦ и трехслойной компоновки СПЦ. Максимальное различие в количестве запасенной энергии для двухслойных компоновок  $\Delta Q$  составило 13,0% при установочной температуре нагрева 120 °С, а для трехслойных компоновок – 13,1% для СПЦ и ЦСП.

В результате анализа поведения двухслойных компоновок теплового аккумулятора подтверждается возможность сокращения времени зарядки



теплового аккумулятора при использовании нескольких фазопереходных материалов с различными значениями температуры плавления. Сокращение времени плавления в трехслойных компоновках основано, не только на различии в значении температуры плавления веществ, но и на значениях теплоемкости, теплопроводности и теплоты фазового перехода. Трехслойная компоновка со стеариновой кислотой в качестве первого слоя обладает наименьшим временем зарядки.

Полученные в исследовании результаты позволяют при изготовлении теплового аккумулятора подобрать наиболее эффективную совокупность *PCM* в зависимости от технологических требований, подразумевающих как потребность в сохранении наибольшего количества тепловой энергии для дальнейшего использования при неограниченном по времени процессе съема теплоты, так и потребность в сокращении времени зарядки модели теплового аккумулятора при постоянном тепловом режиме оборудования и ограниченном количестве теплоты.

Эффект, заключающийся в уменьшении времени зарядки аккумулятора при расположении *PCM* с уменьшением температуры плавления, наблюдается только в случае использования совокупности *PCM*, имеющих приблизительно одинаковые значения удельной теплоемкости, удельной теплоты фазового перехода и теплопроводности, и отличающихся только по температуре плавления. Таким образом, использование стеариновой кислоты в качестве третьего *PCM* позволило получить различные значения времени зарядки и количества аккумулированной энергии для различных компоновок, но не позволяет оценить сокращение времени зарядки совокупности *PCM*, отличающихся только по  $T_m$ .

Результаты исследования позволяют утверждать о целесообразности использования многослойных конструкций с используемой совокупностью *PCM* для управления процессами аккумулирования теплоты. Характеристики температурного (теплового) режима оборудования, либо технологической схемы, в которых предполагается использовать теплоаккумулятор с *PCM*,

такие как диапазон температур, интенсивность теплового потока, продолжительность выдаваемой тепловой энергии и др. должны являться решающими факторами при изготовлении конструкции аккумуляторов и выборе *PCM*, так как изменение компоновки при сохранении совокупности *PCM* способно скорректировать время зарядки аккумулятора и возможное количество запасаемой энергии в случае технологически оправданного и контролируемого изменения теплового режима оборудования.

Представленные в работе выводы могут служить дополнительным базисом для исследования многослойных и каскадных тепловых аккумуляторов с фазовым переходом. Однако, совокупности проведенных исследований недостаточно для определения степени влияния того или иного теплофизического параметра *PCM* на процессы теплопередачи между слоями, что говорит о целесообразности проведения исследования многослойных аккумуляторов с подбором *PCM*, существенно отличающихся лишь по одному параметру на большем диапазоне температур горячей стенки. Интересны исследования многослойных аккумуляторов с различной их ориентацией в пространстве для оценки воздействия естественной конвекции на процессы зарядки слоев *PCM*.

Многослойные тепловые аккумуляторы потенциально имеют высокую эффективность применения в системах и оборудовании с изменяющимся во времени температурным режимом. Результаты исследования показали, что достаточно продолжительный нагрев (зарядка аккумулятора) при температуре горячей стенки (теплоносителя), превышающей температуру плавления веществ более чем в два раза, способствует несущественному испарению фазопереходных материалов и обладает хорошей термической стабильностью, что может являться ключевым фактором для эффективного использования систем аккумулирования/съема теплоты в промышленных печах, транспортных системах, системах холодоснабжения и др. с нестационарным температурным режимом.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ современного состояния исследований в области теплоаккумулирующих систем показал актуальность разработки многослойных конструкций с фазовым переходом. Установлено, что использование многослойных структур позволяет существенно повысить эффективность аккумулирования тепловой энергии за счет оптимизации процессов теплопередачи и фазовых переходов.

Использование материалов с фазовым переходом с большим различием в значении температуры плавления при многослойной компоновке оказалось обоснованным даже при высокотемпературных режимах нагрева.

Метод многослойного расположения *PCM* позволяет управлять временем зарядки и количеством запасенной энергии в зависимости от потребностей заказчика, особенностей и параметров эксплуатируемого оборудования. По значениям времени нагрева, плотности теплового потока и температуры горячей стенки определяется теплоаккумулирующая способность аккумулятора, совокупность используемых фазопереходных материалов и их компоновка с наименьшим временем зарядки. В случае изменения теплового режима оборудования значение теплоаккумулирующей способности уточняется с последующим изменением компоновки слоев аккумулятора.

Установлено, что использование многослойной структуры с совокупностью используемых *PCM* способствует улучшению общей термической стабильности системы, а значит, и увеличению срока эксплуатации теплового аккумулятора. На основе анализа экспериментальных данных определены компоновки, обладающие наибольшей циклической стабильностью.

Полученные результаты позволяют разрабатывать системы аккумулирования/съема тепловой энергии по известным эксплуатационным параметрам оборудования.

Отдельного внимания требуют дальнейшие исследования оценки реальной циклической стабильности *PCM* в выбранном температурном диапазоне, что будет являться ключевым фактором для расчета срока эксплуатации тепловых аккумуляторов, их срока окупаемости в реальных промышленных и технологических процессах, системах микроэлектроники и транспортных средствах.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Zayed M. E. et al. Applications of cascaded phase change materials in solar water collector storage tanks: a review //Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2019. – Т. 199. – С. 24-49.
2. Velmurugan K. et al. Review of *PCM* types and suggestions for an applicable cascaded *PCM* for passive PV module cooling under tropical climate conditions //Journal of Cleaner Production. – 2021. – Т. 293. – С. 126065.
3. Zhang Z., Ci Z., Zhang T. Heat-storage performance optimization for packed bed using cascaded *PCMs* capsules //International Journal of Thermophysics. – 2021. – Т. 42. – С. 1-20.
4. Al Arni S. et al. Novel multi-layer nano-modified *PCM* configuration for efficient thermal management of photovoltaic-thermal systems //Journal of Energy Storage. – 2024. – Т. 103. – С. 114352.
5. Li W. et al. Experimental and numerical investigation of the melting process and heat transfer characteristics of multiple phase change materials // International Journal of Energy Research. – 2020. – Т. 44. – №. 14. – С. 11219-11232.
6. Sarhaddi F. et al. Comparative study of two weir type cascade solar stills with and without *PCM* storage using energy and exergy analysis //Energy Conversion and Management. – 2017. – Т. 133. – С. 97-109.
7. Majumdar R., Saha S. K. Computational study of performance of cascaded multi-layered packed-bed thermal energy storage for high temperature applications //Journal of Energy Storage. – 2020. – Т. 32. – С. 101930.
8. Mao Q., Zhang Y. Thermal energy storage performance of a three-*PCM* cascade tank in a high-temperature packed bed system //Renewable Energy. – 2020. – Т. 152. – С. 110-119.
9. Shamsi H., Boroushaki M., Geraei H. Performance evaluation and optimization of encapsulated cascade *PCM* thermal storage //Journal of Energy Storage. – 2017. – Т. 11. – С. 64-75.

10. Li M. J. et al. Optimization of the packed-bed thermal energy storage with cascaded *PCM* capsules under the constraint of outlet threshold temperature // *Applied Thermal Engineering*. – 2021. – T. 186. – C. 116473.
11. Ren Q., Guo P., Zhu J. Thermal management of electronic devices using pin-fin based cascade microencapsulated *PCM*/expanded graphite composite // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2020. – T. 149. – C. 119199.
12. Peiró G. et al. Experimental evaluation at pilot plant scale of multiple *PCMs* (cascaded) vs. single *PCM* configuration for thermal energy storage // *Renewable energy*. – 2015. – T. 83. – C. 729-736.
13. Tehrani S. S. M. et al. Cyclic performance of cascaded and multi-layered solid-*PCM* shell-and-tube thermal energy storage systems: A case study of the 19.9 MWe Gemasolar CSP plant // *Applied Energy*. – 2018. – T. 228. – C. 240-253.
14. Huang H. et al. Improvement of the efficiency of solar thermal energy storage systems by cascading a *PCM* unit with a water tank // *Journal of Cleaner Production*. – 2020. – T. 245. – C. 118864.
15. Kim S. H. et al. Numerical modeling and experimental validation of a phase change material-based compact cascade cooling system for enhanced thermal management // *Applied Thermal Engineering*. – 2020. – T. 164. – C. 114470.
16. Xu H. J., Zhao C. Y. Analytical considerations on optimization of cascaded heat transfer process for thermal storage system with principles of thermodynamics // *Renewable Energy*. – 2019. – T. 132. – C. 826-845.
17. Xu H. J., Zhao C. Y. Thermal performance of cascaded thermal storage with phase-change materials (*PCMs*). Part I: Steady cases // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2017. – T. 106. – C. 932-944.
18. Cheng X., Zhai X. Thermal performance analysis and optimization of a cascaded packed bed cool thermal energy storage unit using multiple phase change materials // *Applied Energy*. – 2018. – T. 215. – C. 566-576.

19. Alqahtani T. et al. Cyclic behaviors of a novel design of a metal hydride reactor encircled by cascaded phase change materials //International Journal of Hydrogen Energy. – 2020. – T. 45. – №. 56. – C. 32285-32297.
20. Elbahjaoui R. Improvement of the thermal performance of a solar triple concentric-tube thermal energy storage unit using cascaded phase change materials // Journal of Energy Storage. – 2021. – T. 42. – C. 103047.
21. Teamah H. M., Lightstone M. F., Cotton J. S. Potential of cascaded phase change materials in enhancing the performance of solar domestic hot water systems //Solar Energy. – 2018. – T. 159. – C. 519-530.
22. Park J., Choi S. H., Karng S. W. Cascaded latent thermal energy storage using a charging control method //Energy. – 2021. – T. 215. – C. 119166.
23. Hasan H. A., Hussain I. Y. Theoretical formulation and numerical simulation of thermal performance enhancements for cascade thermal energy storage systems //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2018. – T. 433. – №. 1. – C. 012043.
24. Li D. et al. Integrating two-stage phase change material thermal storage for cascaded waste heat recovery of diesel-engine-powered distributed generation systems: A case study //Energies. – 2019. – T. 12. – №. 11. – C. 2121.
25. Mawire A., Ekwomadu C. S., Shobo A. B. Experimental charging characteristics of medium-temperature cascaded packed bed latent heat storage systems //Journal of Energy Storage. – 2021. – T. 42. – C. 103067.
26. Khor J. O. et al. Overcharging of a cascaded packed bed thermal energy storage: Effects and solutions //Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2020. – T. 117. – C. 109421.
27. Elfeky K. E. et al. Optimization of thermal performance in thermocline tank thermal energy storage system with the multilayered *PCM* (s) for CSP tower plants //Applied energy. – 2019. – T. 243. – C. 175-190.
28. Sodhi G. S., Muthukumar P. Compound charging and discharging enhancement in multi-*PCM* system using non-uniform fin distribution //Renewable Energy. – 2021. – T. 171. – C. 299-314.

29. Elsanusi O. S., Nsofor E. C. Melting of multiple *PCMs* with different arrangements inside a heat exchanger for energy storage //Applied thermal engineering. – 2021. – T. 185. – C. 116046.
30. Galione P. A. et al. Multi-layered solid-*PCM* thermocline thermal storage concept for CSP plants. Numerical analysis and perspectives //Applied energy. – 2015. – T. 142. – C. 337-351.
31. Liu C. et al. Influence of *PCM* design parameters on thermal and optical performance of multi-layer glazed roof //Applied energy. – 2018. – T. 212. – C. 151-161.
32. Sadeghi H. M., Babayan M., Chamkha A. Investigation of using multi-layer *PCMs* in the tubular heat exchanger with periodic heat transfer boundary condition //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2020. – T. 147. – C. 118970.
33. Mahdi J. M., Mohammed H. I., Talebizadehsardari P. A new approach for employing multiple *PCMs* in the passive thermal management of photovoltaic modules //Solar Energy. – 2021. – T. 222. – C. 160-174.
34. Abandani M. H. S., Ganji D. D. Melting effect in triplex-tube thermal energy storage system using multiple *PCMs*-porous metal foam combination // Journal of Energy Storage. – 2021. – T. 43. – C. 103154.
35. Sefidan A. M. et al. Multi-layer *PCM* solidification in a finned triplex tube considering natural convection //Applied thermal engineering. – 2017. – T. 123. – C. 901-916.
36. Pasupathy A., Velraj R. Effect of double layer phase change material in building roof for year round thermal management //Energy and Buildings. – 2008. – T. 40. – №. 3. – C. 193-203.
37. Kang Z. et al. Investigation of multifactorial effects on the thermal performance of battery pack inserted with multi-layer phase change materials // Energy. – 2024. – T. 290. – C. 130164.



38. Moraga N. O., Xamán J. P., Araya R. H. Cooling Li-ion batteries of racing solar car by using multiple phase change materials //Applied Thermal Engineering. – 2016. – Т. 108. – С. 1041-1054.
39. Jilte R., Afzal A., Panchal S. A novel battery thermal management system using nano-enhanced phase change materials //Energy. – 2021. – Т. 219. – С. 119564.
40. Song K. W. et al. Performance of a combined battery thermal management system with dual-layer phase change materials and air cooling technologies //Applied Thermal Engineering. – 2024. – Т. 254. – С. 123865.
41. Аймбетова И. О. и др. Теплофизические свойства фазопереходных теплоаккумулирующих материалов, применяемых в строительстве //Успехи современного естествознания. – 2018. – №. 12. – С. 9-13.
42. Амер А. Э., Рахмани К., Лебедев В. А. Выбор материалов с фазовым переходом с использованием метода анализа иерархий (МАИ) // Международный научно-исследовательский журнал. – 2020. – №. 6-1 (96). – С. 35-48.
43. Низовцев М. И., Летушко В. Н., Стерлягов А. Н. Повышение теплопроводности фазоизменяемого материала графенными нанотрубками // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2022. – №. 4 (57). – С. 50-65.
44. Торопов А. Л. Комбинированные тепловые гелиосистемы. – 2019.
45. Cedeño F. O., Prieto M. M., Xiberta J. Measurements and estimate of heat capacity for some pure fatty acids and their binary and ternary mixtures // Journal of Chemical & Engineering Data. – 2000. – Т. 45. – №. 1. – С. 64-69.
46. Sari A., Kaygusuz K. Thermal energy storage system using stearic acid as a phase change material //Solar energy. – 2001. – Т. 71. – №. 6. – С. 365-376.
47. Karaipekli A., Sari A., Kaygusuz K. Thermal conductivity improvement of stearic acid using expanded graphite and carbon fiber for energy storage applications //Renewable Energy. – 2007. – Т. 32. – №. 13. – С. 2201-2210.

48. Bayram Ü., Aksöz S., Maraşlı N. Temperature dependency of thermal conductivity of solid phases for fatty acids: Lauric acid, myristic acid, pivalic acid and stearic acid // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. – 2014. – T. 118. – C. 311-321.
49. Wu B. et al. Preparation and characterization of stearic acid/polyurethane composites as dual phase change material for thermal energy storage // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. – 2018. – T. 132. – C. 907-917.
50. Lin Y., Zhu C., Fang G. Synthesis and properties of microencapsulated stearic acid/silica composites with graphene oxide for improving thermal conductivity as novel solar thermal storage materials // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. – 2019. – T. 189. – C. 197-205.
51. Borcuch M. et al. The influence of flow modification on air and *PCM* temperatures in an accumulative heat exchanger // *EPJ Web of Conferences*. – EDP Sciences, 2018. – T. 180. – C. 02011.
52. Свечников А. А. Аккумуляирование тепловой энергии масла и охлаждающей жидкости дизельного двигателя маневрового тепловоза // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. – 2024. – Т. 21. – №. 2. – С. 498-507.
53. Khan Z., Khan Z., Ghafoor A. A review of performance enhancement of *PCM* based latent heat storage system within the context of materials, thermal stability and compatibility // *Energy conversion and management*. – 2016. – T. 115. – C. 132-158.
54. Regin A. F., Solanki S. C., Saini J. S. Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using *PCM* capsules: a review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2008. – T. 12. – №. 9. – C. 2438-2458.
55. Dinker A., Agarwal M., Agarwal G. D. Heat storage materials, geometry and applications: A review // *Journal of the Energy Institute*. – 2017. – T. 90. – №. 1. – C. 1-11.

56. Janghel D., Karagadde S., Saha S. K. Thermal performance analysis of phase change material based thermal storage system using a generalized numerical model with volumetric expansion and shrinkage //Applied Thermal Engineering. – 2020. – Т. 180. – С. 115826.
57. Моисеев В. И., Комарова Т. А. Динамика остывания парафинов в железнодорожных цистернах с тепловыми аккумуляторами //Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2005. – №. 2. – С. 10-17.
58. ГОСТ 8.736-2011. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. — М.: Стандартиформ, 2012. — 18 С.
59. Pahamli Y. et al. Analysis of the effect of eccentricity and operational parameters in *PCM*-filled single-pass shell and tube heat exchangers //Renewable energy. – 2016. – Т. 97. – С. 344-357.
60. Watanabe T., Kanzawa A. Second law optimization of a latent heat storage system with *PCMs* having different melting points //Heat Recovery Systems and CHP. – 1995. – Т. 15. – №. 7. – С. 641-653.
61. Mahdi J. M., Lohrasbi S., Nsofor E. C. Hybrid heat transfer enhancement for latent-heat thermal energy storage systems: A review // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2019. – Т. 137. – С. 630-649.
62. Ma T., Zhao J., Li Z. Mathematical modelling and sensitivity analysis of solar photovoltaic panel integrated with phase change material //Applied Energy. – 2018. – Т. 228. – С. 1147-1158.
63. Xu Y. et al. Evaluation and optimization of melting performance for a latent heat thermal energy storage unit partially filled with porous media //Applied energy. – 2017. – Т. 193. – С. 84-95.
64. Sodhi G. S. et al. Investigation of charging and discharging characteristics of a horizontal conical shell and tube latent thermal energy storage device //Energy Conversion and Management. – 2019. – Т. 188. – С. 381-397.
65. Bonacina C. et al. Numerical solution of phase-change problems // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 1973. – Т. 16. – №. 10. – С. 1825-1832.

66. Yang H., He Y. Solving heat transfer problems with phase change via smoothed effective heat capacity and element-free Galerkin methods //International Communications in Heat and Mass Transfer. – 2010. – T. 37. – №. 4. – C. 385-392.
67. Morgan K., Lewis R. W., Zienkiewicz O. C. An improved algorithm for heat conduction problems with phase change //International Journal for Numerical Methods in Engineering. – 1978. – T. 12. – №. 7. – C. 1191-1195.
68. Khattari Y. et al. Apparent heat capacity method to investigate heat transfer in a composite phase change material //Journal of Energy storage. – 2020. – T. 28. – C. 101239.
69. Franquet E. et al. Experimental and theoretical analysis of a cement mortar containing microencapsulated *PCM* //Applied Thermal Engineering. – 2014. – T. 73. – №. 1. – C. 32-40.
70. Motiei P., Yaghoubi M., GoshtasbiRad E. Transient simulation of a hybrid photovoltaic-thermoelectric system using a phase change material // Sustainable Energy Technologies and Assessments. – 2019. – T. 34. – C. 200-213.
71. Talebizadehsardari P. et al. Effect of airflow channel arrangement on the discharge of a composite metal foam-phase change material heat exchanger // International Journal of Energy Research. – 2021. – T. 45. – №. 2. – C. 2593-2609.
72. Lacroix M. Numerical simulation of a shell-and-tube latent heat thermal energy storage unit //Solar energy. – 1993. – T. 50. – №. 4. – C. 357-367.
73. Elbahjaoui R., El Qarnia H. Numerical study of a shell-and-tube latent thermal energy storage unit heated by laminar pulsed fluid flow //Heat Transfer Engineering. – 2017. – T. 38. – №. 17. – C. 1466-1480.
74. El Qarnia H. Numerical analysis of a coupled solar collector latent heat storage unit using various phase change materials for heating the water //Energy Conversion and Management. – 2009. – T. 50. – №. 2. – C. 247-254.
75. Emam M., Ookawara S., Ahmed M. Performance study and analysis of an inclined concentrated photovoltaic-phase change material system //Solar Energy. – 2017. – T. 150. – C. 229-245.

76. Yang H. et al. Enhanced thermal conductivity of waste sawdust-based composite phase change materials with expanded graphite for thermal energy storage // *Bioresources and Bioprocessing*. – 2017. – Т. 4. – С. 1-12.
77. Гажур А. Теплотехника. Теплопередача и термодинамика. – Litres, 2023.
78. Белозерцев В. Н. и др. Интенсификация теплообмена // Учеб. Пособие. Самара: Изд-во Самарского университета. – 2018.
79. Bergman T. L. Fundamentals of heat and mass transfer. – John Wiley & Sons, 2011.
80. Skoplaki E., Palyvos J. A. Operating temperature of photovoltaic modules: A survey of pertinent correlations // *Renewable energy*. – 2009. – Т. 34. – №. 1. – С. 23-29.
81. Мурзаев А. С., Измайлова Е. В. Материалы с фазовым переходом и численное моделирование процессов фазового перехода в моделях теплоаккумулирующих материалов // *Столыпинский вестник*. – 2022. – Т. 4. – №. 10. – С. 5586-5599.
82. Aceves S. M. et al. Optimization of a class of latent thermal energy storage systems with multiple phase-change materials. – 1998.
83. Bejan A. Advanced engineering thermodynamics. – John Wiley & Sons, 2016.
84. Xu H. J., Zhao C. Y. Thermal efficiency analysis of the cascaded latent heat/cold storage with multi-stage heat engine model // *Renewable energy*. – 2016. – Т. 86. – С. 228-237.
85. Sacchi G. Lagrange multiplier methods for optimization with constraints // *Structural Optimization: Volume 1: Optimality Criteria*. – 1985. – С. 271-288
86. Xu H. J., Zhao C. Y. Thermodynamic analysis and optimization of cascaded latent heat storage system for energy efficient utilization // *Energy*. – 2015. – Т. 90. – С. 1662-1673.

87. Sciacovelli A., Gagliardi F., Verda V. Maximization of performance of a *PCM* latent heat storage system with innovative fins //Applied Energy. – 2015. – T. 137. – C. 707-715.
88. Dincer I., Rosen M. A. Thermal energy storage: systems and applications. – John Wiley & Sons, 2011.
89. Lake A., Rezaie B. Energy and exergy efficiencies assessment for a stratified cold thermal energy storage //Applied energy. – 2018. – T. 220. – C. 605-615.
90. Motahar S. Experimental study and ANN-based prediction of melting heat transfer in a uniform heat flux *PCM* enclosure //Journal of Energy Storage. – 2020. – T. 30. – C. 101535.
91. Mochnecki B., Suchy J. S. Modelowanie i symulacja krzepnięcia odlewów. – Wydawnictwo Naukowe PWN, 1993.
92. Halimov A., Lauster M., Müller D. Validation and integration of a latent heat storage model into building envelopes of a high-order building model for Modelica library AixLib //Energy and Buildings. – 2019. – T. 202. – C. 109336.
93. Heim D., Kułakowski T. Thermal model of heat transfer in a *PCM* multilayer construction using Moving Mushy Volume Approach–verification, validation and sensitivity analysis //Journal of Building Performance Simulation. – 2023. – T. 16. – №. 3. – C. 308-326.

Научное издание

**Ваньков** Юрий Витальевич  
**Пономарев** Роман Андреевич  
**Мурзаев** Александр Сергеевич

Многослойные аккумуляторы теплоты с фазовым переходом

Монография

Издательство «Наукоемкие технологии»  
ООО «Корпорация «Интел Групп»  
<https://publishing.intelgr.com>  
E-mail: [publishing@intelgr.com](mailto:publishing@intelgr.com)  
Тел.: +7 (812) 945-50-63  
Интернет-магазин издательства  
<https://shop.intelgr.com/>

Подписано в печать 05.12.2025.  
Формат 60×84/16  
Объем 7,125 п.л.  
Тираж 500 экз.

ISBN 978-5-00271-060-7



9 785002 710607 >