

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования «Санкт-Петербургский горный университет»

На правах рукописи

Амер Ахмед Элсайд Абделкафи Абделаал



**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ АККУМУЛИРОВАНИЯ
ТЕПЛОТЫ В СОЛНЕЧНЫХ СИСТЕМАХ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ
РЕСПУБЛИКИ ЕГИПЕТ**

Специальность 05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук,
профессор **Лебедев В.А**

Санкт-Петербург – 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ АККУМУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОТЫ В СИСТЕМАХ СОЛНЕЧНОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ.....	11
1.1 Состояние и перспективы развития солнечной энергетики республики Египет.....	11
1.2 Обзор методов аккумулирования тепла	16
1.2.1 Аккумулирование тепла за счет теплоемкости материалов	17
1.2.2 Аккумулирование тепла с использованием скрытой теплоты фазовых переходов	18
1.2.3 Термохимическое аккумулирования энергии	20
1.3 Анализ систем аккумулирования с фазовым переходом материалом	20
1.3.1 Методы измерения теплофизических свойств	20
1.3.2 Контейнеры ТАМ.....	21
1.3.3 Влияние схемы потоков теплоносителей на эффективность работы теплоаккумулятора.....	23
1.3.4 Проблемы повышения теплопередачи в теплоаккумуляторах с ФТАМ.....	24
1.3.5 Исследования в области аккумулирования тепловой энергии с применением ФТАМ.....	25
1.4 Выводы по главе 1.....	35
ГЛАВА 2 ВЫБОР ФТАМ ДЛЯ СИСТЕМ АККУМУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ.....	37
2.1 Критерии выбора ФТАМ.....	37
2.2 Анализ ФТАМ для систем аккумулирования тепловой энергии.....	39
2.2.1 Основные типы материалов с фазовым переходом	39
2.2.2 Теплофизические особенности ФТАМ	44
2.3 Иерархическая факторно-критериальная модель выбора материалов с фазовым переходом для аккумулирования тепла в системах солнечного теплоснабжения.....	53
2.4 Выводы по главе 2.....	66
ГЛАВА 3 МОДЕЛИРОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ С ФАЗОВЫМ ПЕРЕХОДОМ И ПРОВЕРКА МОДЕЛИ.....	67
3.1 Численная модель процессов изменения свойств материала с фазовым переходом.	67
3.2 Исследование поведения ФТАМ в вертикальном кожухотрубном теплоаккумуляторе с поперечными кольцевыми ребрами	80
3.3 Исследование влияния эксплуатационных факторов на поведение теплоаккумулирующего материала.	90
3.4 Исследование поведения ФТАМ в горизонтальном кожухотрубном теплоаккумуляторе с продольным размещением ребер.....	98
3.5 Выводы по главе 3.....	105
ГЛАВА 4 ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА РАЗРАБОТКИ СИСТЕМ АККУМУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОТЫ С ФТАМ.....	107
4.1 Определение основных параметров системы аккумулирования теплоты.....	107

4.2 Методика расчета системы солнечного телоснабжения с теплоаккумулятором с фазовым переходом	110
4.3 Пример расчета системы солнечного теплоснабжения для фирмы «spanish for engineering works, испанская компания по инженерным работам».	115
4.5 Выводы по главе 4.....	128
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	129
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	131
ПРИЛОЖЕНИЕ А Основные теплофизические свойства ФТАМ	144
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Результаты попарного сравнения альтернатив ФТАМ по критериям.....	147
ПРИЛОЖЕНИЕ В Результаты моделирования процессов плавления и застывания фтам	150
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Патент на полезную модель	182
ПРИЛОЖЕНИЕ Д Акт внедрения.....	183

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования:

Арабская Республика Египет сталкивается с растущим спросом на энергоносители, обусловленным быстрым ростом населения и растущей экономикой. Это создает значительные проблемы в поддержании стабильного и непрерывного снабжения энергией [66]. Среди проблем египетского энергетического сектора основными являются [41]:

1. Сокращение запасов египетской нефти [27, 59, 65].
2. Нынешняя египетская энергетика в основном ориентирована на использование нефти, природного газа и электроэнергии от гидроэлектростанции на Ниле [27, 59, 65].
3. Разрыв между спросом и предложением на рынке нефти, так как соотношение предложения составляет около 52,7% от спроса [27, 59, 131].

Экономическое развитие Египта зависит от энергетического сектора, который составляет 13,1% от общего валового внутреннего продукта. Чтобы удовлетворить растущий спрос на энергоносители, египетское правительство проводит стратегию энергетической диверсификации, известную как Комплексная стратегия устойчивой энергетики до 2035 года, чтобы обеспечить энергетическую безопасность и стабильность энергоснабжения страны. Эта стратегия предполагает активизацию развития нетрадиционных и возобновляемых источников энергии и повышение энергоэффективности во всех сферах народного хозяйства и жилищно-коммунального комплекса [66].

Весьма эффективной теплоэнергетической технологией использования нетрадиционных и возобновляемых источников энергии, как признано в стратегии, является солнечная энергетика. Несмотря на очевидные преимущества солнечной энергетики, ей присущи и существенные недостатки, заключающиеся в неравномерности поступления солнечной энергии в течение суток. Проблемы неравномерности поступления солнечной энергии решаются путем использования систем аккумулирования тепла [3, 80, 82, 102].

Одним из перспективных способов аккумулирования энергии является тепловое аккумулирование с использованием скрытой теплоты фазового перехода «твердое тело – жидкость» неорганических, органических соединений и эвтектических композиций. Несмотря на столь важное прикладное значение тепловых аккумуляторов фазового перехода, многие проблемы в области их разработки остаются нерешенными. Это вопросы оптимальных конструкций теплоаккумулирующих устройств, выбора рабочих сред с фазовыми переходами и их термодинамические параметры и характеристики [4, 7, 9].

Таким образом, разработка новых научных и технических решений в области тепловых аккумуляторов на основе фазового перехода различных веществ является актуальной задачей, решение которой позволит снизить энергозатраты за счет использования альтернативных источников энергии, а также повысить эффективность работы имеющегося энергетического оборудования.

Степень разработанности темы исследования:

В качестве рабочих тел с фазовыми переходами может использоваться довольно большое количество различных материалов, имеющих различный состав и теплофизические свойства. Таким образом, возникает задача выбора типа рабочего тела с фазовым переходом для теплоаккумуляторов конкретной теплоэнергетической установки. В области теплового аккумулирования энергии с использованием материала с фазовым переходом, основой для исследования стали работы следующих авторов: Осташенков А. П., Онучин Е. М., Медяков А. А., Бабаев Б. Д., Макфи Д., Шарма А., Тяги В. Чэнь Си-и Буддхи-Д., Барнс Ф. С., Левина Ю. Г. и др. [7, 3, 82, 102, 32, 70, 6, 119, 139]. В этих работах приведена классификация ФТАМ и установлено, что скрытая система аккумулирования тепла является эффективным способом хранения тепловой энергии и обладает преимуществами высокой плотности аккумулирования энергии. Различные исследователи использовали ФТАМ во многих инженерных приложениях, таких как солнечные системы водяного отопления, отопление помещений, солнечные системы воздушного отопления, тепличное отопление, системы рекуперации отработанного тепла, здания и другие [11, 46, 68, 73, 116, 138, 103, 71, 29, 53].

Вопросам экспериментального и численного моделирования процессов, происходящих в ФТАМ при плавлении и застывании рабочих тел посвящены работы Меттави и Ассасса [86], Zhong Y и др. [141], Regin A. F. и соавт. [101], М. Акгун и соавт. [13], Ахмет Сари и Камил Кайгусуз [109], Омар Сануси и соавт. [106], Де Грасиа и др. [50], М. Акгун и соавт. [14] и другие. Вопросы конструктивного исполнения теплоаккумуляторов с ФТАМ рассмотрены в трудах Хоссейни М. Дж. и др. [64], Саид Седдег и др. [114], Aly K. и др. [20], Хоссейни М. Дж. и др. [63], Guellil Хосин и соавт. [52], Исмаэль и др. [67], Гурунараяна Рави и др. [100], М. Рахими и др. [97], Tay N. H. S. et al. [128].

Анализ источников по теме работы показал, что несмотря на значительное количество исследований, основные вопросы, рассмотренные в них, относятся к конкретным видам ФТАМ, частным случаям конструкций теплоаккумуляторов (ТА) и эксплуатационных параметров при проектировании систем аккумулирования тепла..

Содержание диссертации соответствует пунктам паспорта научной специальности 05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика: п.1, п.3 и п.5.

Цель работы:

Повышение эффективности систем аккумулирования теплоты в солнечных системах теплоснабжения.

Идея работы:

Для повышения эффективности систем аккумулирования теплоты в солнечных системах теплоснабжения предлагается использовать материалы с фазовым переходом в качестве рабочих тел тепловых аккумуляторов.

Задачи исследования:

1. Провести анализ материалов для систем аккумулирования тепловой энергии и разработать методику выбора ФТАМ.
2. Разработать численную модель процессов изменения свойств материала с фазовым переходом.
3. Провести исследование поведения ФТАМ в вертикальном кожухотрубном ТА с поперечными ребрами в зависимости от конструктивных и эксплуатационных параметров.
4. Провести исследование поведения ФТАМ в горизонтальном кожухотрубном ТА с продольным размещением ребер.
5. Разработать инженерную методику создания систем аккумулирования теплоты с ФТАМ для солнечного теплоснабжения.

Научная новизна:

1. Разработаны методические основы построения иерархической факторно-критериальной модели выбора материала с фазовым переходом для систем аккумулирования тепла.
2. Установлена зависимость темпов плавления и застывания теплоаккумулирующего материала от параметров ребрения вертикальной теплопередающей поверхности теплового аккумулятора, а также от основных эксплуатационных и конструктивных факторов.
3. Установлена зависимость темпов плавления и застывания теплоаккумулирующего материала в цилиндрическом горизонтальном теплоаккумуляторе от конструктивных особенностей продольных ребер.

Практическая значимость работы:

1. Разработана методика выбора теплоаккумулирующего материала для аккумулирования теплоты, позволяющая научно обосновать, что наиболее подходящим

материалом с фазовым переходом для теплоаккумуляторов систем солнечного теплоснабжения является парафин.

2. Разработана и апробирована численная модель исследования процессов плавления и застывания теплоаккумулирующего материала и доказана её адекватность экспериментальным исследованиям.

3. Разработана численная модель для исследования темпов плавления и застывания теплоаккумулирующего материала внутри вертикального кожухотрубного теплоаккумулятора с кольцевым оребрением и получены оптимальные параметры ребер для предложенной конструкции теплоаккумулятора.

4. Произведен анализ и рекомендованы к практическому внедрению зависимости влияния эксплуатационных и конструктивных факторов (температуры теплоносителя на входе, расхода, направления потока и диаметра внутренней трубы) на время плавления, время застывания, распределение температуры, распределение объемной доли жидкой фазы теплоаккумулирующего материала внутри теплоаккумулятора.

5. Предложена конструктивная схема теплоаккумулятора с продольными разветвленными ребрами, защищенная патентом на полезную модель № 2020139947, позволяющая повысить эффективность процессов теплопередачи по сравнению с конструкцией теплоаккумулятора с традиционными продольными ребрами.

6. Разработанная инженерная методика проектирования систем накопления тепловой энергии на основе материалов с фазовым переходом может быть использована в проектной и конструкторской документации при разработке систем аккумулирования теплоты и повышения их эффективности.

Методы и методология исследования:

Для выбора рабочего тела – теплоаккумулирующего материала с фазовым переходом (ФТАМ) использованы методы системного анализ и принятия решений. Для окончательного выбора материала использован метод анализа иерархий (МАИ). При разработке модели процессов плавления и затвердевания рабочего тела использованы методы термодинамики и теплообмена. Для численного моделирования процессов тепло - и массообмена, происходящих при плавлении и затвердевании в ФТАМ было использовано CFD-моделирование. Исследование включало применение двумерных CFD-моделей с использованием программного обеспечения ANSYS FLUENT. Теоретические результаты были подтверждены экспериментальными данными.

Положения, выносимые на защиту:

1. Предложенный метод выбора материала с фазовым переходом для систем аккумулирования тепла, в отличие от применяемых в настоящее время методов, позволяет более обоснованно выбирать материал с фазовым переходом на основе разработанного комплекса критериев и иерархической факторно-критериальной модели.
2. Разработанная численная модель поведения теплоаккумулирующего материала в вертикальном кожухотрубном тепловом аккумуляторе позволяет исследовать темпы плавления и застывания рабочего тела при изменении параметров обтекания теплопередающей поверхности аккумулятора и установить зависимости времени плавления и застывания от основных эксплуатационных и конструктивных факторов – температуры теплоносителя на входе, расхода теплоносителя, направления потока теплоносителя и диаметра трубы теплоносителя.
3. Использование разветвленных продольных ребер в разработанной конструкции цилиндрического горизонтального теплоаккумулятора повышает теплопередачу и существенно сокращает время плавления и застывания рабочего тела по сравнению с конструкцией теплоаккумулятора с традиционными продольными ребрами.

Объект исследования - Объектом исследования являются системы аккумулирования тепла с рабочим телом в виде материала с фазовым переходом.

Предмет исследования - Предметом исследования является изучение процессов плавления и застывания рабочих сред с фазовыми переходами, их термодинамических характеристик, определение влияния конструктивных и эксплуатационных параметров теплоаккумуляторов на эффективность систем аккумулирования тепла.

Степень достоверности результатов исследования. Достоверность полученных результатов диссертационной работы достигнута за счет корректного использования теории системного анализа при выборе материала с фазовым переходом в качестве рабочего тела теплоаккумулятора. Разработка критериев, а также иерархической факторно-критериальной модели выбора ФТАМ произведены на основе обработки больших массивов эмпирических данных, представленных в научных базах данных. Достоверность результатов математического моделирования поведения теплоаккумулирующего материала подтверждается корректным использованием математического аппарата - уравнений сохранения энергии, импульса и уравнения преемственности для исследования процессов плавления и застывания ФТАМ. Достоверность результатов численного моделирования обеспечивается корректным использованием известного и апробированного метода исследования двухфазных сред энтальпии-пористости, обоснованным применением двумерных CFD-моделей с

использованием программного обеспечения ANSYS FLUENT для моделирования процесса плавления и застывания в инженерных задачах, и доказательством адекватности численной модели практическим экспериментальным исследованиям. Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, содержащихся в диссертации, также подтверждается патентом на полезную модель теплоаккумулятора с новой системой продольных разветвленных ребер, апробацией полученных результатов в периодической печати, а также внедрением практических результатов исследования в проектно-конструкторской деятельности предприятия «Spanish for engineering works».

Апробация результатов работы. Содержание и основные положения работы докладывались на: II Всероссийской научной конференции «Современные образовательные технологии в подготовке специалистов для минерально-сырьевого комплекса» (г. Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский горный университет, 27 - 28 сентября 2018); на Международном семинаре «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2019» (г. Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский горный университет, 24-27 апреля 2019); на Всероссийской научной конференции с международным участием «XI Семинар ВУЗов по теплофизике и энергетике» (г. Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ), 21-23 октября 2019); на международной научной конференции «Энергоменеджмент муниципальных образований и устойчивые энергетические технологии - EMMFT 2019» (г., Воронеж, Российская Федерация, 10-13 декабря 2019).

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач исследования, в проведении анализа методов аккумулирования энергии, в анализе достигнутых результатов в области систем аккумулирования теплоты с использованием фазовых переходов, в анализе характеристик известных теплоаккумулирующих материалов с фазовым переходом и изучении влияния основных эксплуатационных параметров, таких как термоциклирование, недостаточная долговременная стабильность на теплофизические и эксплуатационные свойства этих материалов, в разработке метода выбора теплоаккумулирующего материала на основе разработанных критериев и иерархической модели, в разработке математической модели поведения теплоаккумулирующего материала с использованием ANSYS FLUENT и доказательстве её адекватности экспериментальным исследованиям. В исследовании и получении результирующих зависимостей темпов плавления и застывания ФТАМ в зависимости от параметров оребрения вертикального кожухотрубного теплоаккумулятора, в проведении анализа влияния эксплуатационных и конструктивных факторов на время

плавления и застывания рабочего тела. В разработке и получении результирующих зависимостей исследований процессов плавления и застывания ФТАМ в оригинальной запатентованной конструкции горизонтального теплоаккумулятора, имеющего разветвленную систему продольных ребер.

Публикации. Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в **8** печатных работах, в том числе в **2** статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в **3** статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus; получен **1** патент.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, **4** глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего **142** наименований и **5** приложений. Диссертация изложена на **183** страницах машинописного текста, содержит **65** рисунков и **17** таблиц.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ АККУМУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОТЫ В СИСТЕМАХ СОЛНЕЧНОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

1.1 Состояние и перспективы развития солнечной энергетики республики Египет

Общее первичное энергоснабжение (ОПЭ) Египта включает (в порядке использования) природный газ, нефть, каменный уголь и гидроэнергию, а также ветер и солнечную энергию (Рисунок 1.1). В 2018 году на долю природного газа приходилось 54.5 % от общего объема поставок первичной энергии с добычей 52, 013 млн тонн нефтяного эквивалента (Мтнэ); на нефть приходилось 38.4 % ОПЭ с добычей 36,652 млн тнэ.; на каменный уголь приходилось 3.5 % ОПЭ с добычей 3.294 млн тнэ; на ветер и солнечную энергию менее 1%% ОПЭ с добычей 0.25 млн тнэ [65].

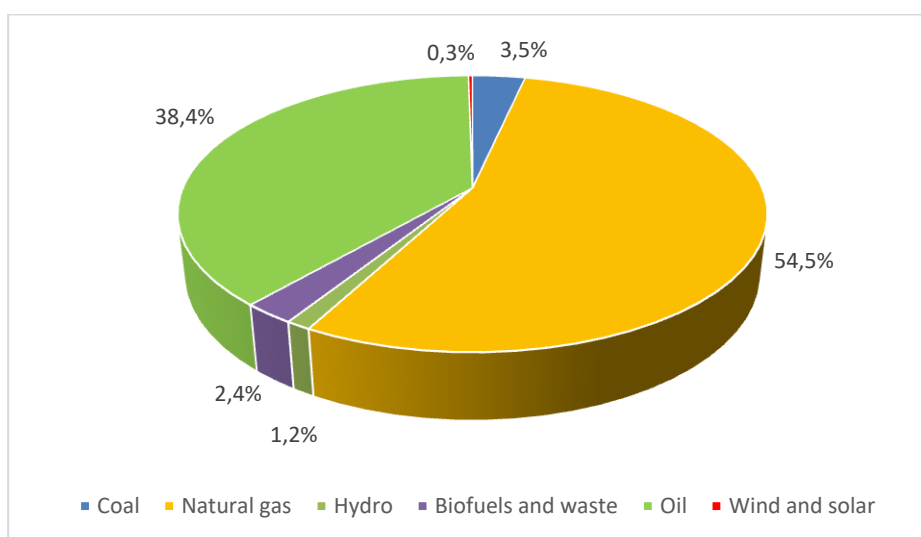


Рисунок 1.1- Общий объем использования первичной энергии в 2018 г [65].

По данным Африканского банка Развития (АфБР), общий спрос на первичную энергию в Египте за последние два десятилетия рос в среднем на 4,6% в год. Для удовлетворения растущих энергетических потребностей были построены, в основном, тепловые электростанции. В результате Египет входит в число 11 стран мира, демонстрирующих самый быстрый рост выбросов парниковых газов по данным АфБР.

Египет - страна с высоким потенциалом использования возобновляемых источников энергии, особенно солнечной. Интенсивность прямого солнечного излучения в Египте составляет 2000-3200 кВтч/м²/год с севера на юг. Солнечная энергия демонстрирует высокий

потенциал для выработки электроэнергии, составляющий экономический потенциал около 74 000 ТВтч / год (экономически доказанный потенциал). Продолжительность солнечного излучения в течение всего года колеблется от 9 до 11 ч с небольшим количеством пасмурных дней. Поэтому Египет имеет большой потенциал для развития различных видов солнечных технологий для экономического роста Египта и увеличения спроса на энергию [47]. На рисунке 1.2 показана карта солнечной радиации для Египта [25]. В Египте солнце светит 12 ч в день в весенний сезон с пиковой интенсивностью около 1000 Вт/м² (Рисунок 1.3). Эта интенсивность примерно в пять раз превышает интенсивность солнечного излучения в Великобритании [15].

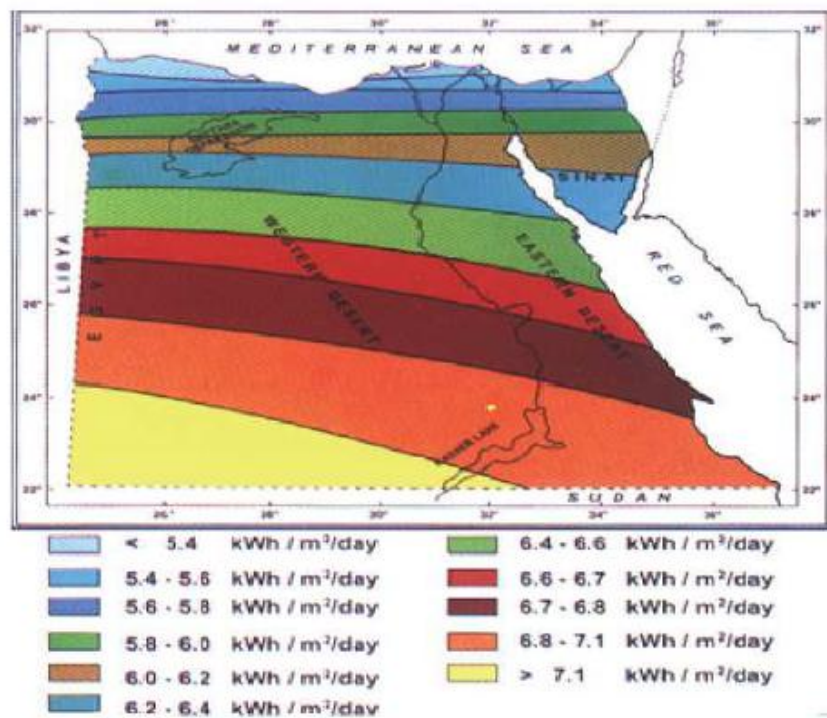


Рисунок 1.2- Карта солнечной радиации для Египта [25]

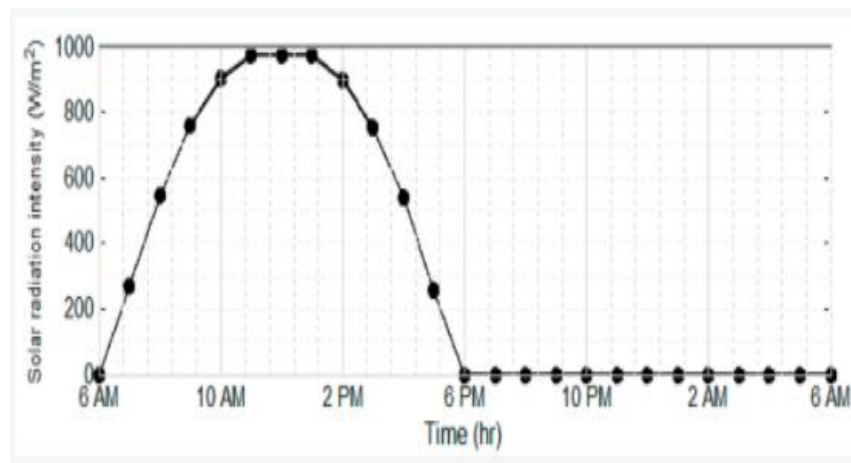


Рисунок 1.3 - Солнечное излучение—Египетский ГН—для типичного дня 21 марта, Борг Эль-Араб, Египет [15]

На приведенных ниже рисунках (1.4 и 1.5) представлены средние межгодовые кривые глобальной горизонтальной облученности (GHI) и прямой нормальной облученности (DNI) путем расчета средних значений за 15-летний период (январь 1999 г. - Декабрь 2013 г.) для всего региона Египта. GHI показывает типичный летний максимум для регионов Египта, достигая средних значений около 350 Вт/м^2 , в то время как в зимние месяцы самый низкий GHI составляет около $180\text{-}190 \text{ Вт / м}^2$. DNI представляет максимальные средние значения солнечного излучения в летние месяцы, начиная с марта с DNI около 330 Вт/м^2 до 380 Вт / м^2 в июле. Установлено, что локальное снижение в апреле-мае для Южного региона Египта и средних значений по Египту, связано с относительно повышенным облачным покровом и частыми пыльными бурями поздней весной (средний DNI в период апрель-май составляет $325\text{-}350 \text{ Вт/м}^2$). Южный Египет имеет самые высокие средние значения DNI зимой и осенью, в то время как летом самые высокие значения солнечного излучения находятся в дельте Нила и Северном Египте, достигая 390 Вт/м^2 . В таблице 1.1 представлены интенсивность и уровень инсоляции солнечной энергии для Египта и трех субрегионов [75].

Таблица 1. 1- Интенсивность и уровень инсоляции солнечной энергии для Египта и трех субрегионов [75].

АТЛАС 15 ЛЕТ КЛИМАТОЛОГИИ	Интенсивность (Вт/м^2)		Уровень инсоляции (кВтч/м^2)	
	DNI	GHI	CSP(Concentrated Solar Power)	PV(Concentrated Photovoltaic)
ЕГИПЕТ	292	252	2554	2208
Александрия	294	255	2572	2230
КАИР	328	279	2875	2447
ЮЖНЫЙ	315	269	2756	2357

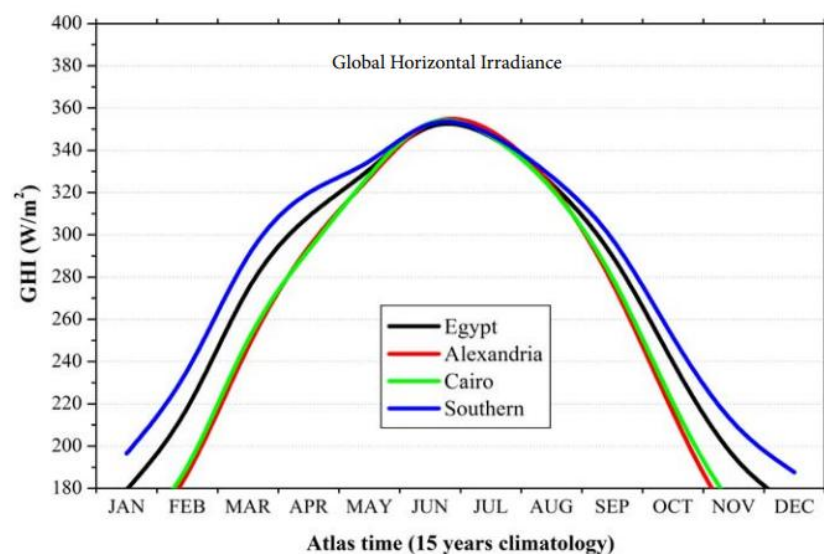


Рисунок 1.4-Глобальная горизонтальная облученность [75]

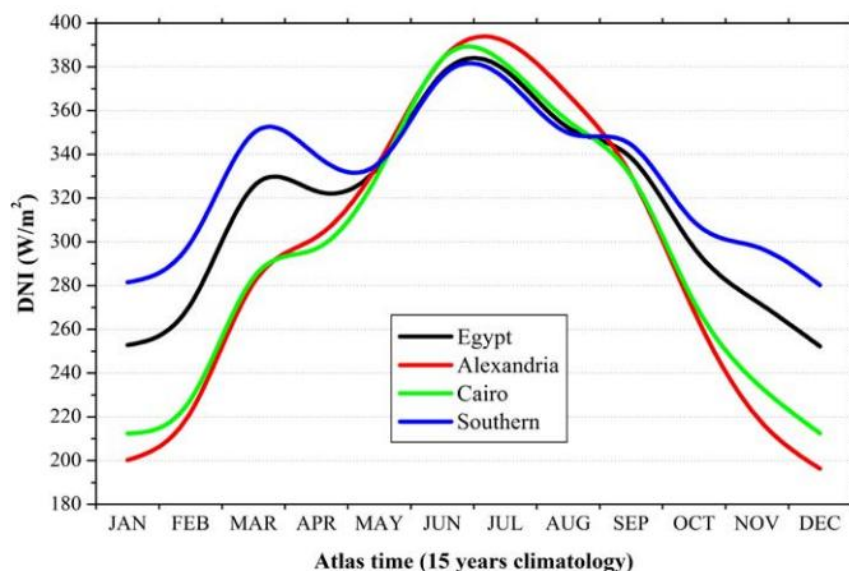


Рисунок 1.5- Прямая нормальная облученность [75]

Промышленность является самым значительным энергопотребляющим сектором в Египте. Ожидается, что этот сектор будет продолжать расти благодаря высокому спросу и быстрому расширению промышленного производства. В то же время, энергопотребление на единицу продукции в египетской промышленности на 10-50% выше, чем в среднем по миру. Другие потребители, включая коммерческий сектор (гостиницы, офисы, торговые центры и т.д.) и жилые здания, также чрезмерно растут и потребляют все больше энергии, особенно для кондиционирования воздуха, нагрева воды и т. д. [47].

Спрос на промышленную тепловую энергию (тепло и холод) составляет около 28% от общего конечного спроса на энергию в Евросоюзе, при этом на долю промышленной теплоэнергетики приходится около 21% выбросов CO₂ в Европе[132] и около 30% в странах Южного Средиземноморья [90]. Значительная доля тепла, потребляемого в промышленном секторе, приходится на диапазон низких и средних температур, причем температурные диапазоны до 80°C составляют 7%, а от 80 до 150 °C-50%[74]. Эти два обстоятельства делают промышленный сектор перспективным и подходящим для применения солнечной тепловой энергии, однако применение солнечных тепловых источников без оптимизации общей технологической тепловой системы привело бы к большой неэффективности. Поэтому необходим комплексный подход к мероприятиям по повышению энергоэффективности, связанных с оптимизацией технологического теплоснабжения и теплопотребления в отдельных отраслях промышленности.

В глобальном масштабе ключевыми секторами с наибольшим потенциалом использования солнечной энергии являются пищевая, текстильная, целлюлозно-бумажная промышленность, транспортное оборудование, обработка металлов и пластмасс и химическая промышленность. Технологии с наиболее подходящими температурными диапазонами включают очистку, сушку, выпаривание и дистилляцию, бланширование, пастеризацию, стерилизацию, варку, плавку, покраску и обработку поверхности. В таблице 1.2 приведены температурные диапазоны по отраслям промышленности и технологическим процессам.

Таблица 1.2- Промышленные секторы и процессы с наибольшим потенциалом использования солнечной энергии во всем мире [126]

Промышленный сектор	Процесс	Уровень температуры (°C)
Сушка продуктов питания и изготовление напитков	Стирка	40–80
	Пастеризация	80–100
	Кипячение	95–105
	Стерилизация	140–150
	Термическая обработка	40–60
Текстильная промышленность	Стирка	40–80
	Отбеливание	60–100
	Крашение	100–160
Химическая промышленность	Кипячение	95–105
	Дистилляция	110–300
	Различные химические процессы	120–180
Все сектора	Предварительный подогрев питательной воды котла	30–100
	Отопление производственных цехов	30–80

Исследование, проведенное египетским правительством в октябре 2011 года под названием "использование солнечной энергии для производства тепла промышленных процессов (ТПП) в Египте", показало, что ТПП составляет 23% потребления энергии в текстильной промышленности, 33% - в пищевой промышленности и 7% - в химическом секторе. Для оценки этих потенциалов были проверены отдельные компании из каждого из этих секторов, оценена экономическая целесообразность использования солнечной энергии, а срок окупаемости варьировался в зависимости от технологического процесса и типа отрасли. Результаты в текстильной промышленности показали, что привлекательные сроки окупаемости около 1 года могут быть достигнуты в таких процессах, как крашение и отбеливание, тогда как для предварительного нагрева питательной воды в паровых котлах этот срок увеличивается до 20 лет.

В результате проведенного анализа можно сделать вывод, что солнечные энергетические системы требуют эффективного накопления тепловой энергии для сохранения тепла в солнечные часы и использования тепла, накопленного в течение ночи.

1.2 Обзор методов аккумулирования тепла

Одной из основных проблем современной энергетики является проблема хранения (аккумулирования) энергии. Для различных видов энергии разработаны специфические методы хранения механической, электрической, тепловой и других видов энергии, а также получили широкое распространение технические средства реализации этих методов [80, 102, 21, 126].

Аккумулирование тепловой энергии (АТЭ), или тепловое аккумулирование, является единственной эффективной технологией, которая удовлетворяет потребность в энергии конечного пользователя. Энергия в форме тепла или холода может быть помещена в среду хранения на определенный срок и может быть извлечена из того же места для последующего использования. Это базовая концепция АТЭ, в которой термин «тепловой» относится к теплу или холоду, в зависимости от энергетических взаимодействий между средой хранения и источником энергии [70].

При нормальной работе тепловой системы потребность в тепловой нагрузке (охлаждение/нагрев) удовлетворяется непосредственно источником тепла, что включает в себя полное использование энергии источника, при этом некоторая полезная энергия теряется в виде тепловых или механических потерь. Включение системы АТЭ в качестве промежуточного звена между тепловой энергией источника и потребляемым теплом конечного пользователя будет способствовать сокращению потерь тепловой энергии и значительному снижению выбросов.

Потребление энергии, в том числе тепловой, как правило, носит переменный характер. Сюда относятся как кратковременные (суточные) колебания потребления, так и долгосрочные (сезонные). Это приводит к необходимости изменять режимы работы основного оборудования теплогенерирующих установок. Такие переменные режимы работы приводят к снижению надежности и безотказности оборудования, увеличению вредных выбросов в атмосферу. Использование систем аккумулирования тепловой энергии позволяет в значительной степени решить эту проблему.

В режимах, когда уровень теплоснабжения незначителен, система АТЭ может накапливать (аккумулировать) излишки тепла теплогенерирующей установки. Это процесс зарядки. В пиковых режимах происходит разрядка системы АТЭ, что позволяет минимизировать колебания мощности теплогенерирующей установки.

Интегрируя АТЭ с обычными системами тепловых интерфейсов, можно эффективно добиться перераспределения энергии в форме переключения нагрузки от пиковых к непиковым условиям. Это, в свою очередь, позволяет холодильной / отопительной установке или коммунальному предприятию работать на своей базовой мощности или номинальной мощности и тем самым способствовать повышению энергоэффективности и эксплуатационных характеристик тепловой системы.

Количество тепловой энергии, которое может храниться и затем отдаваться потребителям, зависит исключительно от характеристик системы аккумулирования (особенно от используемого материала для аккумулирования) и связанных с этим температурных эффектов между тепловым аккумулятором и источником энергии. Другими словами, количество энергии, хранимой в единице объема (объемная энергоемкость), и большая продолжительность хранения считаются основными характеристиками систем АТЭ. Короче говоря, чем меньше объем системы аккумулирования данного количества теплоты и чем дольше продолжительность хранения, тем выше будет ее эффективность [21, 70].

Аккумулирование тепловой энергии может осуществляться двумя способами: аккумулирование за счет теплоемкости материала и за счет скрытой теплоты фазового перехода.

1.2.1 Аккумулирование тепла за счет теплоемкости материалов

Аккумулирование тепла за счет теплоемкости твердой и жидкой среды – это наиболее распространенный в настоящее время способ аккумулирования теплоты. Эффективность такого способа аккумулирования в первую очередь зависит от удельной теплоемкости теплоаккумулирующего материала [6, 32]. Количество теплоты, аккумулированное рабочим телом, зависит от удельной теплоемкости, разности температур и массы тела (1.1):

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} m C_p dT = m C_{ap} (T_f - T_i) \quad (1.1)$$

где Q - количество теплоты, аккумулированное рабочим телом;

m -масса тела;

C_{ap} - удельная теплоемкость;

T_i - начальная температура тела;

T_f - конечная температура тела.

Наиболее распространенным материалом, используемым в данном способе аккумулирования, является вода. Кроме того, вода является основным рабочим телом во многих теплоэнергетических технологиях. Основные преимущества воды:

- высокая теплоемкость ($4,19 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$);
- доступность и дешевизна
- высокие теплофизические и эксплуатационные свойства, невысокие затраты на обеспечение циркуляции.

Вода существенно превосходит по теплоемкости другие распространенные в технике и строительстве материалы: алюминий - $0,90 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$, кирпич - $0,88 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$, камень - $(0,84 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K}))$, сталь - $0,46 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$.

Аккумулирование тепла за счет теплоемкости материала широко используется в современной теплотехнике и теплоэнергетике. Существует целый класс теплоэнергетического оборудования (регенеративные теплообменные аппараты, аппараты и системы очистки рабочих сред, регенеративные подогреватели воздуха теплогенерирующих установок и др), использующих данный метод аккумулирования тепла. Широкое применение метод нашел в теплоэнергетике на тепловых и атомных электростанциях для покрытия больших колебаний тепловых и электрических нагрузок [4].

И все же, несмотря на очевидные достоинства, данный метод аккумулирования теплоты не лишен существенных недостатков (особенно это относится к системам аккумулирования, использующих воду в качестве аккумулирующего материала):

- высокие массогабаритные характеристики аккумулирующих устройств;
- ограниченный температурный диапазон (до 100°C). Использование систем аккумулирования с водой под давлением создает дополнительные проблемы и усложняет конструкции теплоаккумуляторов;
- приходится принимать специальные меры (химводоочистка, деаэрация и т.д.) для снижения коррозионных процессов в системах аккумулирования.

1.2.2 Аккумулирование тепла с использованием скрытой теплоты фазовых переходов

Скрытая теплота фазового перехода (скрытое тепло) - это тепло, выделяемое или поглощаемое физическим телом во время изменения состояния без изменения температуры, например, из жидкости в твердое вещество (при замерзании льда) или из жидкости в газ (при

закипании воды)[102]. Емкость системы скрытого хранения тепла со средним фазовым переходом материалов(ФТАМ) определяется как(1.2),(1.3):

$$Q = \int_{T_i}^{T_m} mC_p dT + ma_m \Delta h_m + \int_{T_m}^{T_f} mC_p dT \quad (1.2)$$

$$Q = m[C_{sp}(T_m - T_i) + a_m \Delta h_m + C_{lp}(T_f - T_m)] \quad (1.3)$$

где Q- емкость системы скрытого хранения тепла с ФТАМ;

m -масса ФТАМ;

Δh_m -скрытая теплота ФТАМ;

a_m - жидкая фракция;

T_i - начальная температура ФТАМ;

T_m - температура плавления ФТАМ;

T_f - конечная температура ФТАМ в конце зарядки;

C_{sp} и C_{lp} - удельная теплоемкость парафина в твердой и жидкой фазах соответственно.

Система накопления скрытой теплоты является эффективным способом хранения тепловой энергии и обладает преимуществами высокой плотности накопления энергии и ее характеристик для хранения тепла при постоянной температуре, соответствующей температуре фазового перехода материала с фазовым переходом (ФТАМ). Изменение фазы может иметь следующую форму: твердое-твердое (твердофазные), твердое-жидкое, твердое-газовое и жидкое-газовое и наоборот.

Преимущества материалов с твердофазным переходом заключаются в менее жестких требованиях к контейнеру и большей гибкости конструкции. Твердофазные переходы имеют небольшую скрытую теплоту и небольшие изменения объема, чем твердо-жидкие переходы. Наиболее перспективными материалами являются органический твердый раствор пентаэритрита (температура плавления (ТПл) - 188 °С, скрытая теплота плавления 323 кДж/ кг), пентаглицерин (ТПл - 81 °С, скрытая теплота плавления 216 кДж / кг), $Li_2 SO_4$ (ТПл – 578 °С , скрытая теплота плавления 214 кДж / кг) и KHF_2 (ТПл - 196 °С, скрытая теплота плавления 135 кДж/кг).

Переходы твердое тело - газ и жидкость-газ имеют более высокую скрытую теплоту фазового перехода, но при этом объем изменяется при фазовом переходе. Система сложна и непрактична из-за больших изменений в объеме. Жидкость-газ имеет сравнительно более высокую скрытую теплоту, чем переходы твердое тело-жидкость, но переходы твердое тело-жидкость привлекательны для использования в системах аккумулирования тепловой энергии из-за небольшого изменения объема. Требуется специальный объемный дизайн контейнеров

для материалов с фазовым переходом (ФТАМ) из-за изменений объема материалов с фазовым переходом при плавлении. Следовательно, при проектировании любой системы накопления скрытой тепловой энергии, необходимо учитывать, по крайней мере, следующие три фактора:

- выбор материала с фазовым переходом с температурой плавления в желаемом диапазоне температур;
- поверхность теплообмена должна обеспечивать максимальную теплопередачу при минимальных потерях тепла в окружающую среду;
- конструкционные материалы теплоаккумулятора должны быть максимально совместимы с материалом рабочего тела (ФТАМ).

1.2.3 Термохимическое аккумулирования энергии

Термохимические системы зависят от энергии, поглощаемой и высвобождаемой при разрыве и риформинге молекулярных связей в полностью обратимой химической реакции[102]. В этом случае запасенное тепло зависит от количества материала для хранения, эндотермической теплоты реакции и степени конверсии.

Таким образом, аккумулирование тепла с использованием скрытой теплоты фазовых переходов является эффективным способом хранения тепловой энергии и обладает преимуществами высокой плотности накопления энергии и ее характеристик для хранения тепла при постоянной температуре, соответствующей температуре фазового перехода материала (ФТАМ).

1.3 Анализ систем аккумулирования с фазовым переходом материалом

1.3.1 Методы измерения теплофизических свойств

Существует четыре основных метода измерения скрытой теплоты плавления и температуры плавления ФТАМ. К ним относятся:

1. капельный калориметр (DC);
2. дифференциальный термический анализ (DTA);
3. дифференциальный сканирующий калориметр (DSC);
4. метод Т-истории.

В методах DSC и DTA образцы и эталонные материалы нагреваются с постоянной скоростью. Разница температур между ними пропорциональна разнице тепловых потоков

между двумя материалами, и запись является кривой DSC. Рекомендуемым эталонным материалом является оксид алюминия (Al_2O_3). Скрытая теплота плавления рассчитывается как площадь под пиком, а температура плавления оценивается по касательной в точке наибольшего наклона на лицевой части пика (Рисунок 1.6).

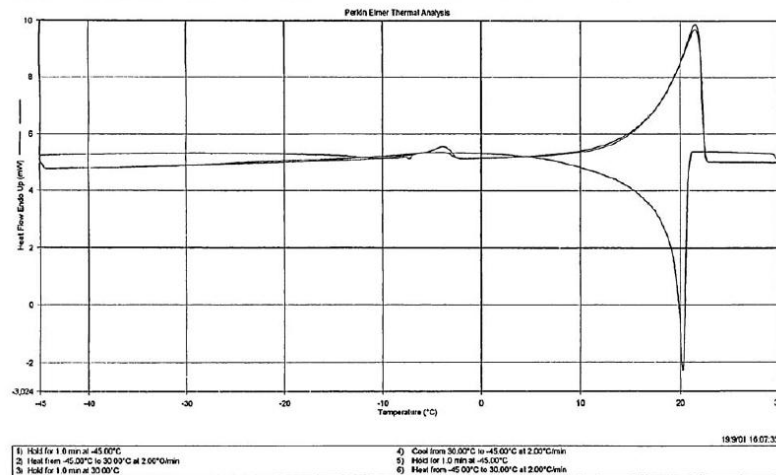


Рисунок 1.6- DSC парафина RT20

Другой метод, разработанный для анализа теплофизических свойств материалов с фазовым переходом, - это метод Т-истории. Построены температурно-временные графики и оценены свойства для сравнения с графиками других известных веществ (обычно чистой воды), используемых в качестве эталона. Полученные результаты представлены в виде кривых энтальпии – температуры (Рисунок 1.7) [102, 119, 34, 139].

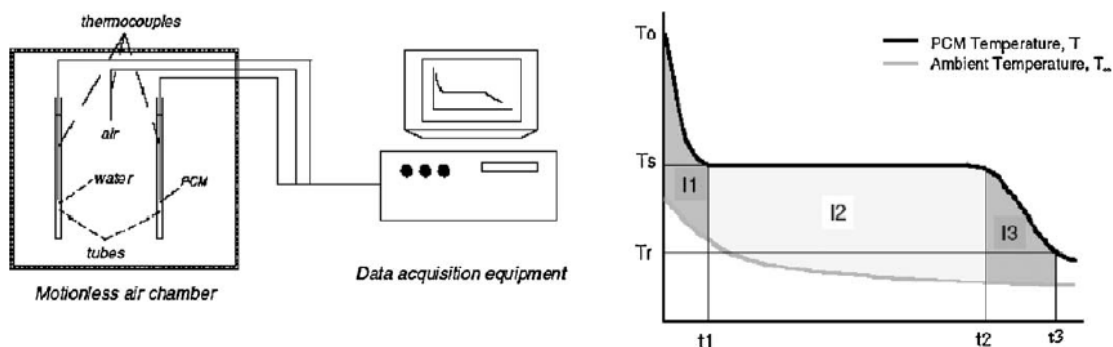


Рисунок 1.7- Метод Т-истории: слева - экспериментальная установка; справа - температурно-временные кривые для ФТАМ и окружающего воздуха

1.3.2 Контейнеры ТАМ

Важнейшим элементом любого теплоаккумулятора является контейнер ФТАМ. При решении вопроса выбора контейнера необходимо учитывать следующие факторы:

- (i) форма, геометрические размеры и конструктивные особенности контейнера, обеспечивающие размещение необходимого количества ФТАМ и оптимальные параметры процессов плавления, застывания и теплопередачи;
- (ii) конструкционные материалы контейнера, снижающие эффекты взаимодействия с ФТАМ и обеспечивающие наилучшую теплопередачу.

Форма, геометрические размеры и конструктивные особенности контейнера должны обеспечивать определенное время плавления и застывания ФТАМ, а также минимальные тепловые потери в окружающую среду. Наиболее распространенными формами контейнеров являются прямоугольные и цилиндрические, позволяющие иметь минимальную площадь внешней поверхности (что важно для уменьшения тепловых потерь в окружающую среду) и более простые с точки зрения конструирования и эксплуатации. Кожухотрубная система является наиболее изученной и используемой в системах аккумулирования теплоты с ФТАМ из-за того, что в большинстве инженерных систем используются цилиндрические трубы, а также потери тепла от кожухотрубной системы минимальны. На рисунке 1.8. приведены схемы цилиндрических и прямоугольных контейнеров [11, 21].

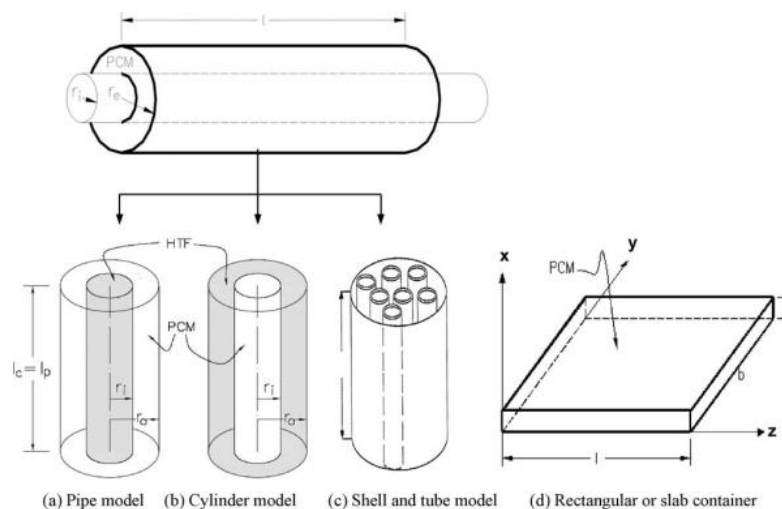


Рисунок 1.8 - Классификация часто используемых контейнеров ФТАМ по геометрии и конфигурации. [11]

Существует три основных вида цилиндрических контейнеров ФТАМ. Первый - это модель трубы, в которой ФТАМ заполняет оболочку, а теплоноситель течет через одну трубу (Рисунок 1.8a). Во второй модели (модель цилиндра) ФТАМ заполняет трубку, а теплоноситель течет параллельно трубке (Рисунок 1.8b). Eсен и соавторы [45] теоретически изучили две модели и рекомендовали модель трубы, потому что она обеспечивает более короткое время плавления и имеет более низкую скорость тепловых потерь в окружающую среду, поскольку большая часть тепла, поступающего из центра, в конечном итоге нагревает ФТАМ. При

исследовании этих двух моделей были сравнены эффекты влияния различных тепловых и геометрических параметров (радиусы цилиндров, общий объем ФТАМ, массовый расход и температуры на входе теплоносителя) на время плавления и застывания рабочего тела. Третья модель цилиндра - это кожухотрубная система оболочки с трубами (Рисунок 1.8с), обычно используемая для улучшения теплообмена в ФТАМ.

Agyenim F [12] и соавт. провели экспериментальную работу по сравнению двух моделей контейнеров - горизонтального кожухотрубного теплообменника с 4 трубками внутри и модели трубы со среднетемпературным ФТАМ (эритрит) с температурой плавления $117,7^{\circ}\text{C}$. Изотермические контурные графики и температурно-временные кривые были использованы для анализа процессов плавления и застывания в ФТАМ и тепловых характеристик в системах аккумулирования. Были также проанализированы и сравнены температурные градиенты по трем направлениям - осевому, радиальному и угловому. Было обнаружено, что влияние многократного конвективного теплообмена в системе оболочек и трубок является доминирующим по сравнению с проводящим теплообменом в модели трубы. Выявлено, что в осевом направлении как для труб, так и для систем труб и трубопроводов температурные градиенты, зарегистрированные во время смены фаз (твердой и жидкой), составляют 2,5% и 3,5% от радиального направления, что указывает, по существу, на двухмерный теплообмен в обеих системах. В системе оболочек и труб время полного плавления составило 5 часов по сравнению с более чем 8 часами для модели трубы из-за естественной конвекции через образование нескольких конвективных ячеек в системе оболочек и труб, значительно изменивших форму твердого тела и поток жидкости на границе раздела. Многие авторы рекомендовали использовать конфигурацию оболочки и трубок, а затем модель трубы с ФТАМ на стороне оболочки и теплоносителем, протекающим через центр из-за его превосходных характеристик.

1.3.3 Влияние схемы потоков теплоносителей на эффективность работы теплоаккумулятора

В тепловом аккумуляторе возможны две схемы организации потоков теплоносителей, влияющих на режимы зарядки и разрядки и ФТАМ. Этими схемами являются: параллельный поток, когда горячая и холодная жидкость вводится в трубу с одного и того же конца и противоточный поток, где горячая и холодная жидкость вводятся с противоположных концов теплоаккумулятора во время зарядки и разрядки соответственно. Gong и Mujumdar [49] провели численное моделирование поведения ФТАМ, чтобы исследовать влияние прямоточного и противоточного режимов течения. Было показано, что прямоточная схема потоков увеличивает

скорость заряда / разряда ФТАМ на 5% больше, чем схема противоточная. Это происходит из-за более высокой разницы температур на входе жидкости, если горячая и холодная жидкость поступает с одного и того же конца. Кроме того, данная схема не вызывает переохлаждение ФТАМ и теплообмен между теплоносителем и ФТАМ не ухудшается. С другой стороны, противоточная схема потоков для процессов зарядки / разрядки вызывает значительное переохлаждение ФТАМ во входной области со стороны холодной жидкости.

1.3.4 Проблемы повышения теплопередачи в теплоаккумуляторах с ФТАМ

Одной из проблем использования теплоаккумуляторов с ФТАМ в системах солнечного теплоснабжения является повышение эффективности теплопередачи между теплоносителем и ФТАМ, поскольку большинство ФТАМ имеют достаточно низкую теплопроводность, что приводит к медленным скоростям зарядки и разрядки теплоаккумуляторов [11].

Вопросам улучшения теплопередачи в теплоаккумуляторах с ФТАМ посвящено большое количество исследований. В них отмечается, что основными методами повышения интенсивности теплопередачи являются использование ребер различной конфигурации, вставка металлической матрицы в ФТАМ, использование ребристых трубок различных конфигураций, микроинкапсуляция ФТАМ в различные ячеистые структуры, увеличение числа трубок с ФТАМ в контейнере и использование ФТАМ с диспергированными частицами с высокой теплопроводностью.

Наибольшее распространение среди методов повышения теплопередачи получило применение различного типа оребрения, контактирующего с ФТАМ, благодаря простоте изготовления и низкой стоимости конструкции. В качестве материалов оребрения могут использоваться различные металлы и сплавы, а также углеродное волокно и другие современные материалы, имеющие высокую теплопроводность. Для исследования характеристик теплопередачи разные исследователи использовали различные экспериментальные установки, материалы и конструкции контейнеров и ФТАМ. Для оценки эффективности теплопередачи могут использоваться различные параметры, такие как время плавления и застывания, градиент температур по границам твердая фаза – жидкая фаза и другие. Например, Norbanius B и соавторы [61] изучали влияние характеристик оребрения на процесс застывания ФТАМ на границе раздела фаз и время, необходимое для достижения полного застывания с использованием параболического и экспоненциального приближений.

1.3.5 Исследования в области аккумулирования тепловой энергии с применением ФТАМ

Различные исследователи использовали ФТАМ во многих областях применения систем аккумулирования тепла, таких как солнечные водонагревательные системы, отопление помещений, солнечные воздушные отопительные системы, отопление теплиц, охлаждение помещений, системы рекуперации отработанного тепла, системы подогрева пола и потолка, солнечные электростанции, тепловые системы космических аппаратов, тепловой комфорт в транспортных средствах, охлаждение двигателей (электрических и внутреннего сгорания), пищевая и медицинская промышленность и многое другое [119, 139, 46, 68, 73, 116, 138, 103, 71, 29, 53, 142].

Mettawee и Assassa [86] экспериментально исследовали тепловые характеристики солнечного коллектора из материала с фазовым переходом во время процессов зарядки и разрядки. В качестве ФТАМ использовался парафиновый воск ($T_{пл} = 53,5\text{ }^{\circ}\text{C}$), а в качестве теплоносителя использовалась вода с переменным расходом ($8,3\text{--}21,7\text{ кг/ч}$). Экспериментальные результаты показали, что скрытая теплота фазового перехода в процессе плавления увеличивается при увеличении массового расхода воды, при этом уменьшается время плавления. В начале процесса плавления средний коэффициент теплопередачи имеет небольшие значения и затем резко увеличивается с увеличением расплавленной фазы (Рисунок 1.9).

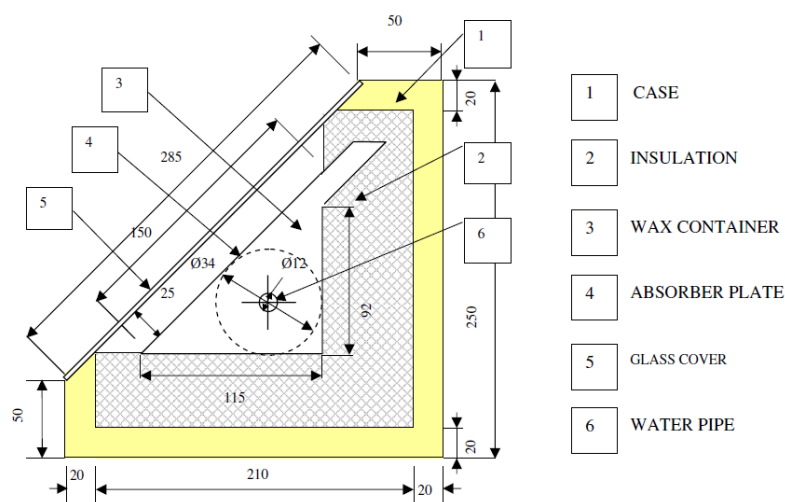


Рисунок 1.9 – Схема экспериментального стенда

Cabeza L. и соавторы [33] разработали экспериментальную солнечную пилотную установку для исследования поведения ФТАМ в реальных условиях. В качестве ФТАМ использовалось гранулированное соединение ФТАМ-графит ($T_{пл} = 58\text{ }^{\circ}\text{C}$). Результаты

эксперимента показали, что включение модуля с ФТАМ в резервуары для воды системы горячего водоснабжения является очень перспективной технологией. Это позволило бы иметь горячую воду в течение более длительных периодов времени даже без внешнего энергоснабжения или использовать меньшие емкости для той же цели.

Zhong Y и соавторы [141] изучали влияние использования графитовой суспензии GF в качестве присадки к ФТАМ в виде парафинового воска для повышения эффективности теплового аккумулятора. Они использовали четыре типа матриц GF с различными тепловыми свойствами и размерами пор GF в соединении с парафиновым воском. Результаты показали, что теплопроводность системы парафин-GF выше, чем у чистого парафинового воска, и может быть увеличена в 190, 270, 500 и 570 раз по сравнению с чистым парафиновым воском. При увеличении массового соотношения парафинового воска в композите скрытая теплота системы парафин-GF возрастала. Существенное влияние на теплопроводность оказывают размер пор GF и доля GF в системе парафин- GF.

Regin A. F. и соавторы [101] численно исследовали влияние диапазона температур плавления материала с фазовым переходом на скорость плавления и застывания материала. Теплоаккумулирующий материал выполняется в виде сферических капсул, заполненных парафином с чистотой 99% (температура застывания 58–60 °C). Капсулы образуют уплотненный слой, позволяющий увеличивать количество аккумулированного тепла и улучшить условия теплопередачи. Авторы пришли к выводу, что скорость зарядки и разрядки значительно выше для капсул с меньшим радиусом по сравнению с капсулами большего радиуса. Время полной зарядки уменьшается, когда температура жидкости на входе и расход теплоносителя (0,0398–0,1592 кг/с) увеличиваются. Время полного застывания значительно выше, чем время плавления (Рисунок 1.10).

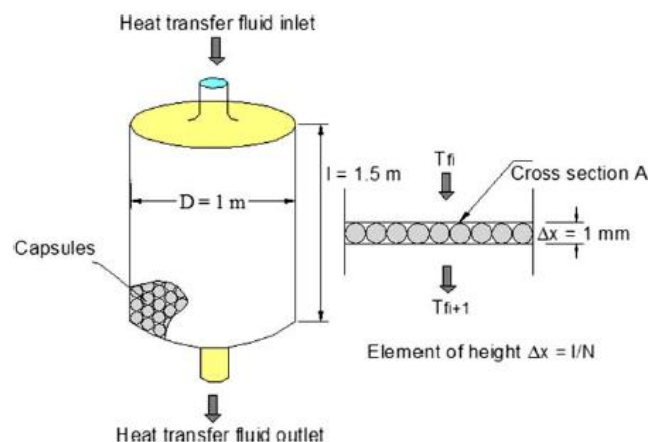


Рисунок 1.10 – Компонировка и детали системы аккумулирования.

Akgun M. и соавторы [13] экспериментально исследовали характеристики плавления и застывания парафина ($T_{пл} = 44,2\text{ }^{\circ}\text{C}$). В качестве теплоносителя использовали воду с различными значениями массового расхода (4,6 и 8,0 кг/мин). Было обнаружено, что повышение температуры на входе приводит к сокращению времени плавления, а изменение скорости потока оказывает незначительное влияние на время плавления или застывания.

Sarı и Kaygusuz [109] экспериментально исследовали тепловые и теплообменные характеристики лауриновой кислоты в процессах плавления и застывания в вертикальной двухтрубной системе аккумулирования тепла. Результаты показали, что влияние чисел Рейнольдса и Стефана на общее время плавления и застывания было практически одинаковым, а на средний коэффициент теплопередачи и скорость теплового потока больше влияли изменения чисел Рейнольдса и Стефана во время процесса плавления, чем во время застывания. Было обнаружено, что лауриновая кислота в качестве ФТАМ с чистотой 95% имеет изотермический температурный интервал фазового перехода $41\text{--}43\text{ }^{\circ}\text{C}$ и высокие тепловые характеристики и поэтому может служить подходящим материалом для аккумулирования тепловой энергии в системах отопления помещений и теплиц.

Sanusi и соавторы [106] экспериментально исследовали влияние добавления графитовых нановолокон (GNF) на процессы аккумулирования тепла и время застывания парафина. Результаты показали, что добавление GNF в материалы с фазовым переходом является эффективным методом повышения аккумулирующих свойств материалов с фазовым переходом на основе парафина.

Nallusamy и соавторы [89] экспериментально исследовали тепловое поведение уплотненного слоя комбинированного блока (за счет теплоемкости материала и скрытой теплоты фазового перехода) аккумулирования тепловой энергии. Парафин с $T_{пл} = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ в качестве материала с фазовым переходом хранится в сферических капсулах. Исследовались различные расходы воды (2,4 и 6 л/мин) в качестве теплоносителя. Результаты показали, что комбинированная система аккумулирования имеет лучшую теплопроизводительность, чем обычная система, где есть прямое смешивание теплоносителя с горячей водой в резервуаре для хранения.

Canbazoglu и др. [36] экспериментально исследовали обычную пассивную солнечную водонагревательную систему с открытым контуром в сочетании с материалом для изменения фазы пентагидрата тиосульфата натрия. Было обнаружено, что когда эти гидратированные соли используются в солнечной водонагревательной системе, может использоваться меньший объем

резервуара с нагреваемой водой, меньше изоляционного материала и, следовательно, снижается стоимость системы аккумулирования.

Kousksou и др. [76] провели численное исследование использования материалов с фазовым переходом в системах горячего водоснабжения на солнечной энергии. Они обнаружили, что выбор температуры плавления ФТАМ может открыть перспективу успешного проектирования системы горячего водоснабжения на основе ФТАМ, которая может быть более эффективной, чем ее аналог без ФТАМ.

Haillot и др. [56] провели исследование потенциала композитов из сжатого вспененного природного графита (CENG) и материала с фазовым переходом для солнечных систем горячего водоснабжения. Численная модель была успешно подтверждена с использованием соответствующих экспериментальных данных. Результаты подтвердили эффективность добавления в ФТАМ композитов из сжатого вспененного природного графита.

Kurklu и др. [77] разработали и исследовали тепловые характеристики солнечного коллектора нового типа. Солнечный коллектор состоял из двух смежных секций, одна из которых была заполнена водой, а другая парафиновым воском в виде ФТАМ с температурой плавления и замерзания около 45–50 °С. Результаты исследования показали, что температура воды превышала 55 °С в течение типичного дня с высокой солнечной радиацией и поддерживалась выше 30 °С в течение всей ночи. Тепловая эффективность коллектор вода – ФТАМ оказалась вполне удовлетворительной (Рисунок 1.11).

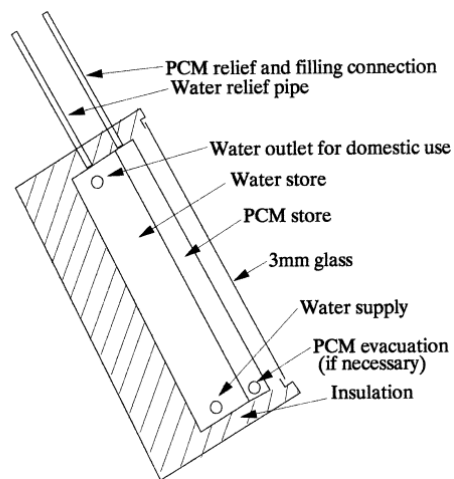
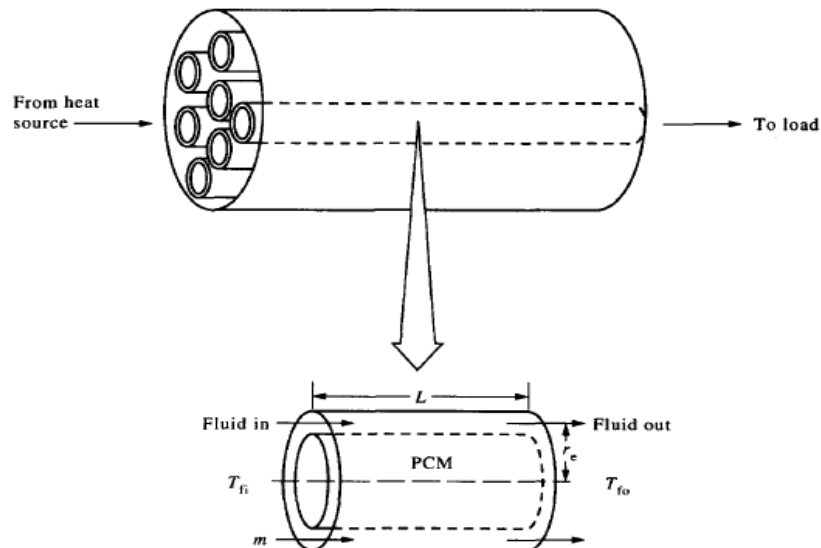


Рисунок 1.11 – Схематическое изображение солнечного коллектора и его частей [77]

Wajńóczy и др. [30] изучали процессы аккумулирования тепла с использованием композиции двух материалов с фазовым переходом. В качестве ФТАМ использовались гексагидрат хлорида кальция и тетрагидрат хлорида кальция (температуры плавления 60–30 °С и 30–20 °С соответственно). Обнаружено, что наличие двухкомпонентной ФТАМ в системе

аккумулирования тепла уменьшает темпы роста температуры горячей воды, увеличивая при этом время использования горячей воды. Система хранения, содержащая ФТАМ, может уменьшить объем бака и служить в качестве подогревателя для газового котла.

Экспериментальное и теоретическое исследование было выполнено Kaugusuz [72] для определения эффективности материалов с фазовым переходом для солнечных водонагревательных систем. Он использовал $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ в качестве материала с фазовым переходом (температура плавления 28°C) и воду в качестве теплоносителя. Аккумулятор представляет собой контейнер с размещенными в нем трубами, заполненными ФТАМ. Каждая труба омывается потоком теплоносителя. Результаты показали, что по мере увеличения количества труб с ФТАМ при зарядке аккумулятора температура жидкости на выходе уменьшается, поэтому больше тепла отдается теплоносителем и больше тепла будет накапливаться в материале (Рисунок 1.12).



Baran и Sari [31] экспериментально определили фазовые изменения и теплопередающие характеристики эвтектической смеси пальмитиновой и стеариновой кислот в качестве материала с фазовым переходом в процессе плавления и застывания в вертикальном теплоаккумуляторе с двумя concentрическими трубами. Результаты показали, что на коэффициент теплопередачи влияли числа Рейнольдса в процессе плавления больше, чем в процессе застывания. Экспериментальные результаты также показали, что эвтектическая смесь PA-SA, инкапсулированная в кольцевом пространстве concentрических двойных труб, имеет хорошие фазовые изменения и характеристики теплообмена во время процессов плавления и застывания, и является вполне подходящим ФТАМ для систем аккумулялирования тепла.

Tarhan и соавторы [127] разработали и протестировали три трапецевидных встроенных солнечных накопительных водонагревателя с целью определения наиболее перспективных ФТАМ для систем солнечного теплоснабжения. Использование лауриновой кислоты в качестве ФТАМ целесообразно для стабилизации температуры воды в дневное время, в то время как миристиновая кислота может использоваться в качестве теплового барьера против потери тепла в ночное время. Экспериментальные результаты также показали, что тепловые характеристики ФТАМ и конфигурация контейнера с ФТАМ могут успешно использоваться для управления повышением и понижением температуры воды как днем, так и ночью.

Al-Hinti и др. [18] экспериментально исследовали эффект от использования парафинового воска (температура плавления 52 °C) в качестве материала с фазовым переходом в контейнерах, размещенных в резервуар для хранения воды обычной солнечной водонагревательной системы. Результаты показывают, что в случаях чрезмерного потребления тепла в вечерние часы тепло, накопленное ФТАМ, может частично восстанавливать температуру воды, что приводит к увеличению эффективного времени работы системы.

Gu Z. и соавторы [51] разработали и изучили систему рекуперации тепла с использованием ФТАМ для хранения отработанного тепла от системы кондиционирования воздуха. Результаты экспериментов показывают, что технический парафиновый воск с добавкой LP (жидкий парафин) или LA (лауриновая кислота) может успешно использоваться для рекуперации тепла в системе кондиционирования воздуха.

Mazman M. и др. [84] исследовали влияние использования модулей различных материалов с фазовым переходом в многослойной солнечной системе горячего водоснабжения. Три смеси ФТАМ из парафина и стеариновой кислоты (PS), парафина и пальмитиновой кислоты (PP) и стеариновой кислоты и миристиновой кислоты (SM) были испытаны в экспериментах по охлаждению и повторному нагреву. Было обнаружено, что PS дает наилучшие результаты для улучшения тепловых характеристик теплоаккумулятора в солнечной системе горячего водоснабжения (эффективность увеличивается на 74%).

Gracia A. и др. [50] проанализировали улучшение тепловых характеристик теплоаккумулятора благодаря включению инкапсулированных материалов с фазовым переходом (гидратированных солей TH58) внутри резервуара с горячей водой. Было обнаружено, что общее количество выделяемого тепла увеличивается с 49 кДж до 52,5 кДж. Системы с ФТАМ имеют более высокий расход горячей воды, и их эффективность увеличивается с 40% до 55%. Численная модель с использованием метода конечных объемов была проверена экспериментально и затем использована для оптимизации распределения

ФТАМ внутри цилиндрического контейнера при различных сценариях потребности в горячей воде. Численный параметрический анализ показывает, что количество ФТАМ внутри контейнера должно быть определено в зависимости от времени и количества потребляемой горячей воды. Системы с большим количеством маленьких трубок могут обеспечивать горячую воду более длительное время во время первого разряда, но ограниченное время в других разрядах. С другой стороны, системы с меньшим количеством труб большего диаметра в большей степени накапливают тепло в ФТАМ для последующих разрядов теплоаккумулятора.

Shuangmao Wu и др. [137] численно исследовали динамические характеристики уплотненного слоя ФТАМ. В качестве ФТАМ использовался парафин (точка застывания = 60 °C) в процесса разрядки теплоаккумулятора. Вода использовалась в качестве теплоносителя. Результаты показали, что чем выше скорость потока теплоносителя, тем меньше времени для полного застывания и, следовательно, выше скорость тепловыделения. Чем выше температура теплоносителя на входе, тем больше время для полного застывания и тем меньше скорость тепловыделения. Влияние пористости уплотненного слоя на время полного застывания не так существенно.

Akgün M. и др. [14] экспериментально исследовали характеристики плавления и застывания материалов с фазовым переходом в кожухотрубном теплоаккумуляторе. В качестве ФТАМ используются три вида парафина с разной температурой плавления. Наружная поверхность контейнера для хранения ФТАМ наклонена с углом наклона 5 °C. Было обнаружено, что плавление начинается в нижней области вблизи внутренней стенки, а затем расплавленный ФТАМ поднимается в верхнюю часть контейнера ФТАМ в результате естественной конвекции расплавленного материала. В процессе зарядки сосуществовали две области: расплавленная область ФТАМ в жидкой фазе и нерасплавленная область ФТАМ в твердой фазе. В твердой области теплопередача осуществляется в виде теплопроводности. В области расплава был раскрыт конвективный механизм теплопередачи, приводящий в движение рециркуляцию внутри расплавленного ФТАМ.

Hosseini M. и др. [64] провели комбинированное экспериментальное и численное исследование поведения плавления материала с фазовым переходом (PT50) внутри кожухотрубного теплоаккумулятора. Было отмечено, что на теплопередачу от горячего источника (теплопередающей трубы) к ФТАМ в значительной степени влияет естественная конвекция на участке плавления материала. Из экспериментальных результатов было видно, что фронт плавления появлялся в разное время в местах, близких к трубе с теплоносителем, и с разной скоростью продвигался наружу по направлению к оболочке. Результаты расчетов

показывают, что при увеличении температуры входной воды до 80 °С общее время плавления уменьшается на 37%. Результаты визуализационного исследования подтверждаются результатами расчетов, которые показывают сильное тепловое расслоение расплавленной жидкости в верхней половине контейнера.

Seddegh S. и др. [114] исследовали и сравнили тепловое поведение в вертикальной и горизонтальной системах накопления энергии с использованием материала с фазовым переходом -парафиновый воск (RT 50) с $T_{пл} = 318-324$ К с использованием комбинированной модели теплопередачи в виде теплопроводности и конвекции. Результаты моделирования показывают, что в процессе зарядки при горизонтальной ориентации конвективный теплообмен оказывает сильное влияние на плавление верхней части твердого ФТАМ и менее значителен при плавлении нижней половины твердого ФТАМ. Однако в вертикальной ориентации конвективная теплопередача остается такой же активной в течение всего процесса зарядки. В процессе разрядки тепловое поведение не показывает значительной разницы между горизонтальной и вертикальной системами. Полученные результаты свидетельствуют о том, что горизонтальная ориентация обладает превосходными тепловыми характеристиками при зарядке. Результаты также показывают, что увеличение температуры на входе горячего теплоносителя существенно сокращает общее время зарядки для обеих ориентаций контейнера. Однако увеличение скорости потока теплоносителя не сильно влияет на процессы зарядки и разрядки.

Aly K. и др. [20] численно исследовали использование продольных гофрированных ребер для повышения скорости застывания ФТАМ, расположенного в кольцевой области между двумя concentрическими трубами. Результаты показали, что новые гофрированные конфигурации ребер уменьшают время застывания по сравнению с прямыми ребрами из-за увеличения длины ребер. Однако эффективность гофрированных ребер, как правило, была ниже, чем у прямых ребер (Рисунок 1.13).

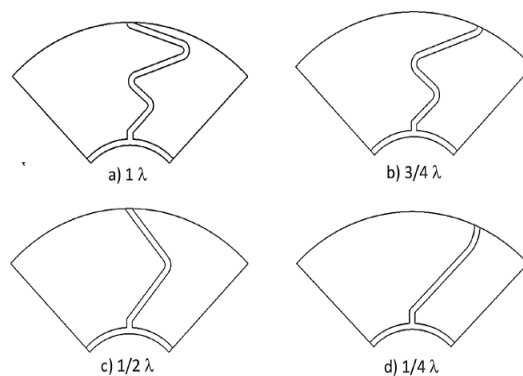


Рисунок 1.13 – Исследованные конфигурации гофрированных ребер

Hosseini, M. и др. [63] провели комбинированное экспериментальное и численное исследование для изучения теплового поведения и характеристик теплопередачи парафина RT50 как материала с фазовым переходом в процессе плавления и застывания внутри кожухотрубного теплоаккумулятора. Эти вычисления основаны на итерационной численной процедуре конечного объема, которая включает в себя односвязную формулировку энтальпии для моделирования процессов фазового перехода. С помощью численного моделирования был изучен фронт расплава в различные моменты процесса. Экспериментальные результаты показывают, что при увеличении температуры на входе теплоносителя с $T_H = 70^\circ\text{C}$ до 75 и 80°C теоретическая эффективность процессов зарядки и разрядки повышается с 81,1% до 88,4% и с 79,7% до 81,4% соответственно.

Guellil H. и соавторы [52] провели экспериментальное исследование для анализа работы нового теплоаккумулятора в процессе зарядки и разрядки. Теплоаккумулятор состоит из U-образных трубок, заполненных парафином и соединенных между собой плоскими ребрами для увеличения поверхности теплообмена. Эксперименты показали, что оребрение может ускорять время начала и окончания плавления материала примерно на 55% и 72% соответственно. Фаза зарядки может быть увеличена на 94% за счет увеличения аккумулированного тепла на 32%, что также позволило накапливать и восстанавливать более чем в 5 раз тепловую энергию. Полученные результаты показывают, что при фиксированной мощности уменьшение расхода теплоносителя на 54% ускоряет фазу зарядки, увеличивает максимальную температуру до 18,3% и удлиняет фазу разрядки.

Ismail и др. в работе [67] представили численную модель процесса застывания вокруг вертикальной оребренной трубы, погруженной в ФТАМ. Численные результаты были подтверждены результатами экспериментальной работы, которые показали, что при увеличении длины ребра полное затвердевание и массовая доля затвердевшего вещества значительно уменьшаются. Увеличение толщины ребер, а также количества ребер привело к увеличению массовой доли застывания и сокращению времени застывания материала. Результаты также показали, что увеличение соотношения сторон кольцевого пространства приводит к увеличению как времени застывания, так и массовой доли затвердевшего вещества, в то время как увеличение разности температур приводит к уменьшению времени застывания и массовой доли затвердевшего вещества.

Теплопередача жидкой фазы ФТАМ в условиях ламинарного течения в круглых трубах и внутри продольных ребристых труб было изучено Ravi G. и др. [100]. Для моделирования процесса фазового перехода был использован эффективный метод удельной теплоемкости.

Было установлено, что число Нуссельта сильно зависит от числа Стефана, величины теплопроводности ребер и высоты ребер.

Rahimi M. и др. [97] исследовали процесс застывания и плавления фазового перехода материала в ребристо-трубчатом теплоаккумуляторе. Область внутри контейнера, включающая в себя пространство вокруг трубок и промежутки между ребрами, заполнена материалом R35. Внутренние поверхности контейнера имеют разветвленную систему оребрения. Результаты исследования показывают, что использование ребер повышает среднюю температуру ребер независимо от режимов заряд-разряд. Уменьшение шага ребер также не влияет на этот параметр ощутимо для обоих режимов. Процесс застывания в большей степени зависит от использования ребер по сравнению со временем плавления. При увеличении температуры на входе с $T_{вх}=50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $T_{вх}=60\text{ }^{\circ}\text{C}$ время плавления уменьшается более резко по сравнению с тем же повышением с $T_{вх}=60\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $T_{вх}=70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Увеличение расхода приводит к уменьшению, как времени плавления, так и времени застывания, причем это уменьшение более выражено для процесса плавления, чем для процесса застывания.

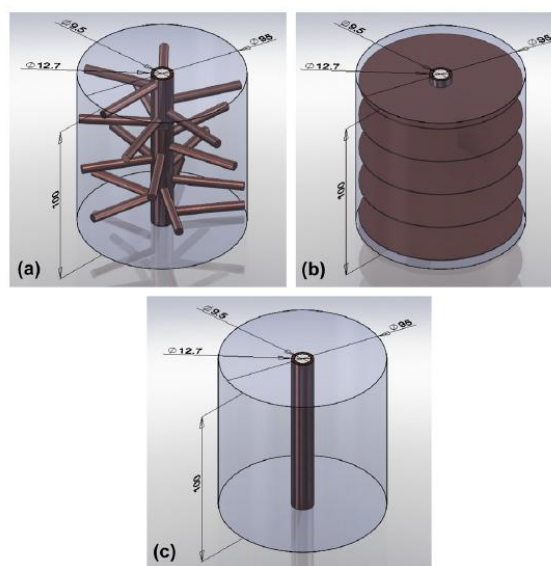


Рисунок 1.14- Типовые схемы аккумуляторов типа «труба в контейнере»: (а) штыревой трубы, (б) ребристой трубы и (в) простой трубы.

Tay N. H. S. и др. [128] проведена экспериментальная валидация модели вычислительной гидродинамики (CFD) для труб, свернутых в спираль в системе аккумулирования тепловой энергии с ФТАМ. С использованием модели CFD были исследованы три схемы теплоаккумуляторов. Результаты были проанализированы для процесса застывания материала, в котором в основном преобладает проводимость, поэтому эффект естественной конвекции можно было бы проигнорировать. По результатам исследования можно сделать вывод, что ребристая труба обеспечивает более высокие скорости теплопередачи, чем штыревая труба, не

влияя на общую плотность энергии системы аккумулирования. Этот анализ показывает, что ребра являются более эффективным методом повышения теплопередачи для всех оболочечных и трубчатых систем теплового аккумулирования с ФТАМ типа "труба в контейнере" (Рисунок 1.14).

1.4 Выводы по главе 1

Анализ проведенных исследований и работ в области повышения эффективности солнечных систем теплоснабжения показал, что использование теплового аккумулирования теплоты с использованием теплоаккумулирующих материалов с фазовым переходом в этих системах является актуальным и перспективным направлением. Был выявлен ряд вопросов, не до конца получивших освещение в предшествующих исследованиях по данной тематике:

1. Выбор наиболее подходящего материала с фазовым переходом. Существует большое количество всевозможных ФТАМ, которые могут быть использованы в качестве рабочего тела в теплоаккумуляторах. Большое количество исследований посвящено исследованию теплофизических характеристик различных материалов. Однако отсутствует единый методологический подход к проблеме выбора ФТАМ для конкретных приложений.
2. Определение формы и геометрических параметров контейнера теплоаккумулятора. Наиболее приемлемой формой является цилиндрическая, так как она имеет минимальную площадь теплопередающей поверхности, что обеспечивает минимальные тепловые потери и более проста при изготовлении. Геометрические размеры (объем контейнера) определяют тепловую мощность теплоаккумулятора. Вертикальное или горизонтальное исполнение влияет на теплофизические процессы плавления и застывания материала.
3. Время заряда и разряда теплоаккумулятора являются основными параметрами системы аккумулирования тепла, они определяют характеристики системы солнечного теплоснабжения и зависят от конструктивных и эксплуатационных особенностей теплоаккумулятора.
4. Эффективность системы аккумулирования существенно зависит от условий теплопередачи от источника тепла к рабочему телу и поведения рабочего тела в процессе плавления и застывания. Теплопроводность и естественная конвекция являются двумя основными механизмами, управляющими процессом теплопередачи. При этом естественная конвекция играет важную роль в процессе плавления ФТАМ. Естественные конвективные потоки чрезвычайно чувствительны к геометрии и размерам контейнеров и их внутреннего наполнения и зависят от плотности, вязкости и теплопроводности используемых ФТАМ.

5. Повышение эффективности теплопередачи обеспечивается использованием различных конструктивных решений – применение многотрубных систем, капсулирование ФТАМ, оребрение теплопередающих поверхностей и др. При этом важным является оптимизация конструктивных элементов средств улучшения теплопередачи.

Таким образом, целью данного диссертационного исследования является повышение эффективности систем аккумулирования теплоты в солнечных системах теплоснабжения.

Для достижения данной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ материалов для систем аккумулирования тепловой энергии и разработать методику выбора ФТАМ.
2. Разработать численную модель процессов изменения свойств материала с фазовым переходом.
3. Провести исследование поведения ФТАМ в вертикальном кожухотрубном ТА с поперечными ребрами в зависимости от конструктивных и эксплуатационных параметров.
4. Провести исследование поведения ФТАМ в горизонтальном кожухотрубном ТА с продольным размещением ребер.
5. Разработать инженерную методику создания систем аккумулирования теплоты с ФТАМ для солнечного теплоснабжения.

ГЛАВА 2 ВЫБОР ФТАМ ДЛЯ СИСТЕМ АККУМУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

2.1 Критерии выбора ФТАМ

Существуют определенные свойства, такие как теплофизические, химические, себестоимость и коррозия, влияющие на выбор теплоаккумулирующего материала. Теплофизические свойства, такие как температура плавления, скрытая теплота плавления, удельная теплоемкость и теплопроводность, являются важными параметрами при выборе подходящего ФТАМ[11]. Основными критериями выбора материалов для аккумуляции тепла с фазовым переходом являются [2]:

- Температура плавления должна находиться в желаемом диапазоне рабочих температур (температурный диапазон применения);
- Высокая скрытая теплота плавления на единицу массы;
- Высокая удельная теплоемкость, обеспечивающая дополнительные ощутимые эффекты накопления тепла;
- Высокая теплопроводность, благодаря чему градиенты температур для плавления и застывания материала невелики;
- Незначительное изменение объема ФТАМ при фазовом переходе, что упрощает геометрию контейнера и теплообменника;
- Минимальное переохлаждение при застывании материала.
- Химическая стабильность, отсутствие химического разложения и коррозионная стойкость по отношению к конструкционным материалам;
- Не содержит ядовитые, воспламеняющиеся и взрывоопасные элементы / соединения;.
- Доступность в больших количествах и низкая стоимость.

Основные требования для выбора ФТАМ приведены в таблице 2.1

Таблица 2.1 – Основные требования к выбору фазо-переходных теплоаккумулирующих материалов (ФТАМ) [96].

Свойства	Требования к ФТАМ	Обоснование
Тепловые	1. температура плавления в требуемом диапазоне рабочих температур 2. высокая скрытая теплота плавления 3. высокая удельная теплоемкость 4. высокая теплопроводность	1. желаемый температурный диапазон для солнечного нагрева воды и обогрева помещений составляет 40–80 °С и 25–35° С соответственно 2. позволяет аккумулировать большое количество теплоты в небольшом объеме. 3. высокая удельная теплоемкость вещества свидетельствует о высокой способности поглощения и выделения тепла. Удельная теплоемкость незначительно изменяется во время ощутимого нагрева / охлаждения. 4. высокая теплопроводность ФТАМ увеличивает скорость теплообмена между рабочим телом и теплоносителем и ускоряет зарядку и разрядку теплоаккумулятора.
Физические	1. высокая плотность 2. малое или полное отсутствие переохлаждения 3. низкое давление газов в контейнере 4. небольшое изменение объема в процессе фазового перехода	1. высокая плотность ФТАМ способствует уменьшению размеров теплоаккумулятора. 2. переохлаждение нежелательно в связи с изменением структуры ФТАМ. 3. повышенное давление газов в контейнере указывает на возможность испарения материала ФТАМ, что может привести к воспламенению газов и требует обеспечения герметичности контейнера. 4. значительные изменения объема ФТАМ могут привести к нарушению конструкции контейнера и нарушению его герметичности. Поэтому изменение объема ФТАМ не должно превышать 10-12% от начального.
Химические	1. высокая химическая стабильность 2. не вызывает коррозии контейнера 3. низкая скорость роста кристаллов при застывании материала 4. неядовитый, невоспламеняющийся и невзрывоопасный	1. в процессе работы ФТАМ проходит большое количество циклов плавление-застывание, что может привести к изменению состава материала. Эти изменения могут привести к ухудшению характеристик системы аккумулирования тепла... 2. для увеличения срока службы теплоаккумулятора материалы контейнера должны быть совместимы с ФТАМ для уменьшения коррозии. 3. быстрый рост кристаллов увеличивает скорость застывания ФТАМ. Скорость образования кристаллов может быть искусственно изменена путем включения нуклеирующих агентов в материал. 4. безопасность является наиболее важным критерием при выборе ФТАМ.
Экономические	доступность, низкая цена	приводит к снижению стоимости системы аккумулирования тепла

2.2 Анализ ФТАМ для систем аккумулирования тепловой энергии

2.2.1 Основные типы материалов с фазовым переходом

Существует большое количество различных материалов с фазовым переходом (органических, неорганических и эвтектических и др.), которые могут использоваться в реальных системах теплового аккумулирования [102]. Классификация материалов с фазовым переходом приведена на рисунке 2.1.

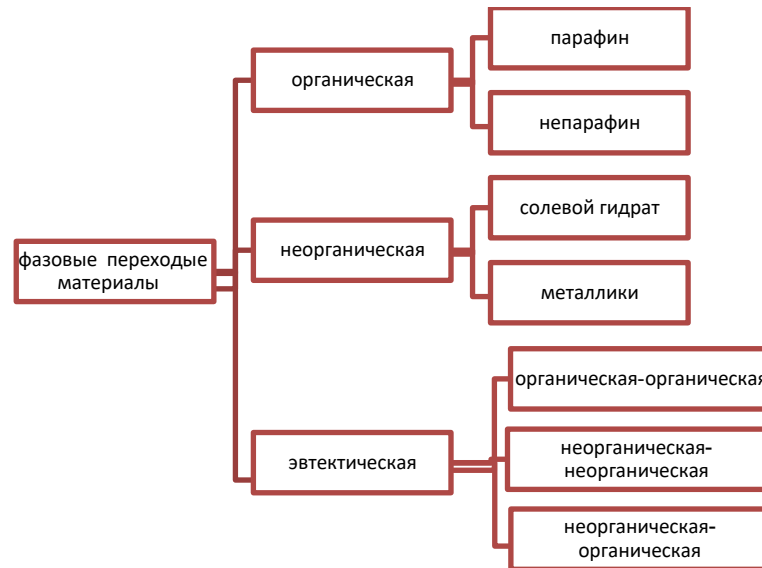


Рисунок 2.1 – Классификация материалов с фазовым переходом

В зависимости от области применения, основным критерием выбора ФТАМ является величина и диапазон температур плавления и застывания материала. По остальным критериям, как правило, материалы с фазовым переходом приходится подбирать для каждого конкретного приложения, компенсируя недостатки теплофизических свойств материала соответствующими конструктивными решениями. Например, металлические ребра можно использовать для компенсации недостаточной теплопроводности материалов с фазовым переходом [21, 119].

ФТАМ имеют очень различные тепловые и химические свойства, что влияет на конструкцию систем аккумулирования теплоты. Особенности всех групп ФТАМ и обсуждение их свойств, с точки зрения применимости их в тепловых аккумуляторах, приведены ниже.

Органические материалы с фазовым переходом

К органическим ФТАМ относятся материалы, содержащие углеводороды. К ним относятся парафины, сложные эфиры, жирные кислоты, спирты и гликоли. Наиболее распространены в качестве ФТАМ парафины. Поэтому органические ФТАМ условно разделяют на две группы: парафины и остальные (непарафины).

Органические ФТАМ имеют очевидные достоинства [21]:

- не имеют значительного переохлаждения при застывании;
- при плавлении и застывании состав материала не изменяется (конгруэнтность);
- хорошие способности к кристаллизации;
- совместимы с большинством конструкционных материалов;
- отсутствие фазовой сегрегации (образование областей с различной плотностью);
- химическая стабильность;
- безопасность.

К недостаткам органических ФТАМ относится низкая теплопроводность в твердом состоянии, а также относительно низкая объемная плотность аккумулирования теплоты.

Нормальные парафины типа C_nH_{2n+2} представляют собой семейство насыщенных углеводородов с очень похожими свойствами. Парафины между C_5 и C_{15} являются жидкостями, а остальные - воскообразными твердыми веществами. Парафин - это наиболее коммерчески распространенный и изученный органический материал для теплоаккумуляторов с ФТАМ. Он состоит главным образом из прямых цепных углеводородов, которые имеют температуру плавления от 23 до 67 °С. Парафин товарного сорта получают от выгонки нефти и он содержит сочетание различных углеводородов. Коммерчески парафин недорог и обладает высокой теплоаккумулирующей способностью и широким диапазоном температур плавления. В таблице 2.2 приведены теплофизические свойства некоторых парафинов технических сортов, которые, по сути, являются парафиновыми смесями с не полностью рафинированным минеральным маслом. В качестве ФТАМ используются, как правило, только технические парафины, так как чистые парафины очень дороги.

Для парафинов характерна закономерность, что с увеличением количества атомов углерода увеличиваются как температуры плавления, так и скрытая теплота плавления (Таблица 2.2)

Материалы фазового перехода классифицируются как: i) группа I-наиболее перспективные; ii) группа II-перспективные; и iii) группа III - менее перспективные [102, 119].

Таблица 2.2 – Температура плавления и скрытая теплота плавления парафинов

Количество атомов углерода	Температура плавления	Скрытая теплота плавления (кДж/кг)	группа
14	5.5	228	I
15	10	205	II
16	16.7	237.1	I
17	21.7	213	II
18	28.0	244	I

Продолжение таблицы 2.2

19	32.0	222	II
20	36.7	246	I
21	40.2	200	II
22	44.0	249	II
23	47.5	232	II
24	50.6	255	II
25	49.4	238	II
26	56.3	256	II
27	58.8	236	II
28	61.6	253	II
29	63.4	240	II
30	65.4	251	II
31	68.0	242	II
32	69.5	170	II
33	73.9	268	II
34	73.9	269	II

Группа I-наиболее перспективная; группа II-перспективная; группа III—менее перспективная; - недостаточные данные.

Некоторые выбранные парафины, наиболее подходящие в качестве ФТАМ для систем солнечного теплоснабжения, показаны в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Физические свойства некоторых парафинов

Парафин	Температура плавления (°C)	Теплота плавления (кДж/кг)	группа
6106	42–44	189	I
P116	45–48	210	I
5838	48–50	189	I
6035	58–60	189	I
6403	62–64	189	I
6499	66–68	189	I

Преимущества парафинов: высокая химическая стабильность, отсутствие фазовой сегрегации, приемлемые (для аккумулирования тепла в системах теплоснабжения) температуры плавления, застывание без сильного переохлаждения, безопасность и химическая нейтральность к конструкционным материалам и пригодность для вторичной переработки и утилизации. Однако недостатками парафинов являются низкая теплопроводность, несовместимость с пластиковыми контейнерами (капсулами), большое изменение объема между твердой и жидкой стадиями и недостаточная объемная скрытая емкость аккумулирования тепла.

Кроме парафинов, к органическим ФТАМ относится довольно большая группа материалов, способных аккумулировать теплоту в процессе фазового перехода. Abhat и др [11]

провели обширное исследование таких органических материалов как сложные эфиры, жирные кислоты, спирты и гликоли. Их особенностью является высокая горючесть и поэтому они не должны подвергаться воздействию чрезмерной температуры, огня и окислителей. Основные свойства этой группы органических материалов: высокая удельная теплота плавления, воспламеняемость, низкая теплопроводность, высокие температуры плавления, высокий уровень токсичности и нестабильность в условиях высоких температур [21].

Фельдман и Шапиро [46] изучали тепловые свойства жирных кислот и показали, что они вполне пригодны в качестве ФТАМ для аккумуляции теплоты в системах отопления помещений. Жирные кислоты имеют высокую скрытую теплоту плавления, соответствующую некоторым из парафинов. Жирные кислоты замерзают без переохлаждения. Они также обладают слабой коррозионной активностью [119].

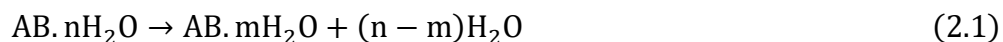
Общая формула жирной кислоты дается как $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{2n}\text{COOH}$ и, следовательно, квалифицируется как хороший ФТАМ. Основным недостатком жирных кислот является их высокая стоимость, которая в 2-2,5 раз больше, чем у технического парафина [102].

Неорганические материалы с фазовым переходом

К неорганическим материалам с фазовым переходом относятся гидраты солей и металлики (соединения металлов).

Гидраты солей

Солевые гидраты являются важнейшей группой фазовых материалов и наиболее исследованными для их использования в скрытом накоплении тепловой энергии. Общая формула солевых гидратов $\text{AB} \cdot n\text{H}_2\text{O}$. Процесс плавления гидратов солей представляет собой обезвоживание исходного материала и термодинамически напоминает таяние или замораживание воды. Гидраты солей при плавлении образуют гидраты более низкого порядка и воду (2.1), (2.2), т.е.



В точке плавления кристаллы гидрата прекращаются в безводную соль и воду или в более низкий гидрат и воду. Выделенная вода не способна полностью растворить материал гидрата. Характерной особенностью гидратов солей является то, что после плавления безводная соль или более низкий гидрат вследствие более высокой плотности подвержены сегрегации и оседают в нижней части контейнера.

Преимущества солевых гидратов:

- низкая цена, доступность делает их привлекательным для использования в системах аккумулирования тепла;
- высокая объемная скрытая теплота аккумулирования тепла;
- высокая теплопроводность;
- высокая теплота плавления и меньшее изменение объема, чем у других материалов с фазовым переходом.

Недостатки солевых гидратов:

- фазовая сегрегация и переохлаждение;
- необходимость в катализаторах кристаллизации, которые быстро теряют свои свойства при повторных циклах плавления-застывания;
- вследствие сегрегации происходит уменьшение активного объема материала.

Таким образом, одной из основных проблем использования гидратов солей в качестве ФТАМ является фазовая сегрегация. Сегрегация-это образование других гидратов или обезвоженных солей, которые имеют тенденцию оседать. Сегрегация может быть предотвращена путем добавления других материалов к гидрату соли, которые могут препятствовать более тяжелым фазам опускаться на дно. Этого можно достигнуть путем сгущения гидрата соли или добавлением материала в гидрат соли для образования гелеобразного состава. Сгущение заключается в добавлении специального материала к гидрату соли, который увеличивает связанность молекул между собой. Гелеобразование означает добавление связующего материала (например, полимера) к гидрату соли для создания трехмерной сети, которая удерживает молекулы гидрата соли вместе [34]. Abhat и др [11] сообщают о снижении теплоты плавления более чем на 73% в $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ после 1000 циклов плавления / застывания. Солевые гидраты проявляют склонность к переохлаждению, потому что они не начинают кристаллизоваться в точке замерзания других компонентов . Этого можно избежать, используя подходящие нуклеирующие материалы для начала роста кристаллов в среде[119].

Металлики

Металлики представляют собой легко плавящиеся металлы, сплавы металлов и эвтектики металлов. В силу их специфических теплофизических свойств металлики пока серьезно не рассматриваются в качестве ФТАМ для аккумулирования тепла в системах солнечного теплоснабжения. Они имеют высокую теплопроводность, поэтому для них дополнительные наполнители, улучшающие теплопроводность, не требуются. Использование металлов создает ряд необычных инженерных проблем. Основное различие между

металликами и другими материалами с фазовым переходом заключается в их высоких температурах плавления и теплопроводности .

Эвтектики

Эвтектика-это плавящийся состав из двух или более компонентов, каждый из которых плавится и замерзает конгруэнтно, образуя смесь кристаллов компонентов при кристаллизации. Эвтектики почти всегда плавятся и замерзают без сегрегации, потому что они застывают, образуя плотную смесь кристаллов. При плавлении, как правило, все компоненты плавятся одновременно, при этом разделение компонентов не происходит [102].

Преимущества эвтектики заключаются в том, что они имеют высокую температуру плавления, сходную с чистым веществом, и объемная плотность аккумуляирования энергии у них немного выше, чем у органических соединений. Эвтектики недостаточно изучены в качестве материалов для аккумуляирования тепла. Некоторые композиции ФТАМ с высокой сегрегацией иногда неправильно называют эвтектикой, поскольку они плохо плавятся. [102].

2.2.2 Теплофизические особенности ФТАМ

Долгосрочная стабильность ФТАМ

Выбор скрытого теплоаккумулирующего материала основан, прежде всего, на теплофизических свойствах, а именно на температуре плавления, скрытой теплоте плавления, удельной теплоемкости и теплопроводности .Наряду с вышеупомянутыми свойствами наиболее важными критериями, ограничивающими использование скрытых накопителей тепла, являются полезный срок службы систем материал-контейнер и количество циклов, которые они могут выдержать без какого-либо ухудшения своих свойств [34, 139, 79].

Поэтому проблема, ограничивающая использование скрытых накопителей тепла, заключается в недостаточной долговременной стабильности материалов и емкостей для хранения. Эта недостаточная стабильность обусловлена двумя факторами: плохой стабильностью свойств материалов из-за термоциклирования и / или коррозии между материалом с фазовым переходом и контейнером [34, 139].

Физическая и термическая стабильность материалов с фазовым переходом изучалась достаточно подробно. В своих исследованиях Хаджиева использует три смеси парафина, подтверждая при этом отсутствие влияния циклов на свойства парафина [139]. Материал фазового перехода проходит повторяющиеся циклы плавления и застывания. Цель этих испытаний заключалась в определении того, приведут ли эти термические воздействия к изменению материала с фазовым переходом и как они могут повлиять на тепловые свойства данного материала.

Термоциклирование ФТАМ

При работе в системах аккумулирования тепловой энергии ФТАМ проходят повторяющиеся циклы плавления и застывания. Влияние циклов плавление-застывание на теплофизические свойства материалов с фазовым переходом называется термоциклированием. Некоторые материалы показывают изменения свойств в пределах относительно короткого количества циклов. Поскольку имеются ограниченные данные о влиянии термоциклирования на материалы с фазовым переходом, важно изучить влияние термоциклирования на температуру плавления, скрытую теплоту плавления и удельную теплоемкость [79, 119]. Шарма и др. [117] проверили влияние термоциклирования на мочевины. Результаты показали, что изменение температуры плавления и скрытой теплоты плавления составило $-23,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ и -21% после 30 испытаний теплового цикла. Было замечено, что материал не плавится после нескольких циклов (50). Они предположили, что мочевины не следует использовать в качестве ФТАМ.

Шарма и др. [118] провели 300 испытаний теплового цикла для других материалов с фазовым переходом (парафиновый воск, стеариновая кислота и ацетамид). Для измерения скрытой теплоты плавления и температуры плавления был использован дифференциальный сканирующий калориметр (DSC). Было обнаружено, что ФТАМ коммерческого качества не показывают существенного изменения температуры плавления, но наблюдается изменение скрытой теплоты плавления на $-10,3\%$, $2,8\%$ и $1,9\%$ соответственно. Образцы не показали значительного ухудшения их тепловых свойств и могут рассматриваться как перспективные ФТАМ.

Позже Sharma и др. [115] провели 1500 испытаний теплового цикла для тех же материалов (стеариновая кислота, ацетамид и парафиновый воск). Они пришли к выводу, что и 1500 циклов не существенно влияют на температуру плавления этих материалов. Было обнаружено, что диапазон изменения температуры плавления для стеариновой кислоты, ацетамида и парафинового воска составлял 1, 2 и $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ соответственно. Было отмечено, что диапазон изменения скрытой теплоты плавления составлял $-20,6\%$, $-1,14\%$ и -26% соответственно. Ацетамид и парафин показали достаточно хорошую стабильность при термоциклировании и могут рассматриваться как перспективные ФТАМ.

Nadjieva и др. [55] рассчитали энтальпию смеси трех парафиновых смесей и обнаружили зависимость их теплофизических свойств от количества и распределения атомов углерода, определенную химическим и газохроматографическим анализами. Наблюдалось, что изменение температуры плавления и скрытой теплоты плавления составило $0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $1,8\%$ соответственно

после повторения 900 циклов плавление/застывание. Было обнаружено, что состав стабилен и ухудшение скрытой теплоты накопления тепла и структуры парафина было незначительным.

Гиббс и Хасан [48] сообщили, что парафин демонстрирует отличную термическую стабильность после ряда тепловых циклов. Shukla и др. [122] проведены испытания теплового цикла на различных органических и неорганических материалах с фазовым переходом (ФТАМ). Было отмечено, что изменение температуры плавления парафинового воска 58–60 и парафинового воска 60–62 составило $-2,73^{\circ}\text{C}$ и $0,22^{\circ}\text{C}$ соответственно. Изменение скрытой теплоты плавления составило $-21,5\%$ и $-16,1\%$ соответственно после 600 повторений плавление / застывание. Было обнаружено, что парафин является наиболее подходящим ФТАМ с точки зрения стабильности температуры плавления и скрытой теплоты плавления. Было отмечено, что изменение температуры плавления и скрытой теплоты плавления для эритрита составило 2°C и 10% соответственно. Максимальное переохлаждение 14°C наблюдалось в 9-м цикле. Эритрит имеет очень высокую плотность энергии, следовательно, это может быть многообещающий ФТАМ для аккумуляции тепловой энергии при более высоких температурах.

Было обнаружено, что тетраборат динаatria впервые расплавляется при температуре на 4°C выше, чем указано в справочных данных. Тетраборат динаatria при втором термическом цикле оставался твердым даже при температуре до 100°C . Нитрат железа плавился при температуре на 8°C меньше, чем указанная температура плавления. Было отмечено, что затвердевание не происходило даже после выдерживания его в течение достаточного времени, когда его вынимали из печи и давали затвердеть. Гидроксид натрия плавился при 66°C , что соответствовало заявленной температуре плавления 64°C . Когда гидроксид натрия нагревали во второй раз, он не смог расплавиться. Образец также набрал влаги благодаря своей гигроскопической природе. Образец гидроксида бария не может быть расплавлен даже при очень высоких температурах в соответствии с заявленной температурой плавления. Таким образом, было отмечено, что большинство протестированных неорганических ФТАМ не сохраняют своих свойств после нескольких циклов и не квалифицируются как хороший материал для аккумуляции скрытой теплоты [122].

Alkan и др. [19] изучали термическую стабильность парафино-полипропиленового (ПП) композита для накопления тепловой энергии. В композите парафин действует как ФТАМ, когда РР используется в качестве поддерживающего материала. Было обнаружено, что изменение температуры точки плавления для композита парафин / ПП (70/30 мас.%) составило $0,75^{\circ}\text{C}$ и

0,3% соответственно. Ускоренные термоциклические испытания показали, что такой вид ФТАМ имеет хорошую термическую стабильность.

Хасан и Сай [57] исследовали стабильность миристиновой, пальмитиновой и стеариновой кислот для бытовой водонагревательной системы. Они использовали дифференциальный сканирующий калориметр (DSC) для измерения скрытой теплоты плавления и температуры точки плавления. Жирные кислоты исследовались в течение 450 циклов. Наблюдалось, что изменение температуры точки плавления для миристиновой, пальмитиновой и стеариновой кислот составило $-0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ соответственно. Было замечено небольшое уменьшение скрытой теплоты плавления. Изменение скрытой теплоты плавления составило $-13,6\%$, $-9,2\%$ и $-11,7\%$ соответственно. Снижение скрытой теплоты происходит из-за химического разложения жирных кислот.

Сари [110] изучал термостабильность стеариновой кислоты, пальмитиновой кислоты, миристиновой кислоты и лауриновой кислоты. Выбранные жирные кислоты исследовали в течение 0, 120, 560, 850 циклов плавления/застывания, чтобы измерить температуры плавления и скрытые теплоты плавления. Наблюдалось, что диапазон изменения температуры точки плавления и скрытой теплоты плавления составлял $0,07\text{--}7,87\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $-1\%\text{--}27,7\%$. И даже после 1200 циклов плавления/застывания изменение температур точки плавления и скрытой теплоты плавления составляло $-7,87\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-5,84\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-6,78\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $-1,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ соответственно и -1% , $-12,8\%$, $-12,1\%$ и $-11,3\%$ соответственно. Таким образом, был сделан вывод, что выбранные жирные кислоты, используемые для хранения солнечной тепловой энергии, показали хорошую термическую стабильность с точки зрения температуры точки плавления и скрытой теплоты плавления.

Сари и Кайгусуз [107] исследовали термостабильность жирных кислот, таких как стеариновая кислота, пальмитиновая кислота, миристиновая кислота и лауриновая кислота. Термические циклы повторяли в течение 910 с использованием техники DSC. Было отмечено, что скрытая теплота для стеариновой кислоты, пальмитиновой кислоты, миристиновой кислоты и лауриновой кислоты после 910 циклов уменьшилась до $31,9\%$, $17,8\%$, $17,1\%$ и $37,2\%$ соответственно. Было отмечено, что диапазон изменения температуры точки плавления составляет от $-6,9$ до $-3,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, от $-5,4$ до $1,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, от $-6,9$ до $-3,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ и от $-6,9$ до $-3,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ соответственно. Было показано, что жирные кислоты, исследованные как ФТАМ, обладают хорошей термостабильностью. Пальмитиновая кислота и миристиновая кислота могут считаться более подходящими, чем другие ФТАМ, в долгосрочной перспективе для солнечных систем ккумулирования тепла.

Тяги и Буддхи [130] провели 1000 термических циклов с неорганической солью гексагидрата хлорида кальция ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) в качестве материала для скрытого накопления тепла. Было отмечено, что данной соли нет изменений в температуре плавления и скрытой теплоте плавления. Обнаружено, что гексагидрат хлорида кальция является перспективным ФТАМ для процессов нагрева и охлаждения в зданиях.

Sebaïi и соавторы [43] исследовали влияние 500 термических циклов плавление/застывание коммерческого гексагидрата хлорида магния $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ на температуру плавления и скрытую теплоту плавления. Наблюдалось, что диапазон изменения температуры точки плавления и скрытой теплоты плавления составлял $12,6^\circ\text{C}$ и $-45,2\%$ соответственно. Было отмечено, что $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ нестабилен при термоциклировании из-за проблемы разделения фаз, поэтому его не рекомендуется использовать в качестве материала для аккумулирования тепловой энергии.

Sari и соавторы [108] выполнили 1000 термических циклов для некоторых сложных эфиров жирных кислот (миристиновой, пальмитиновой и стеариновой кислот) с глицерином. Было обнаружено, что диапазон изменения температуры точки плавления для (миристиновой, пальмитиновой и стеариновой кислот) с глицерином составлял $-0,74^\circ\text{C}$, $-1,05^\circ\text{C}$ и $-0,38^\circ\text{C}$ соответственно. Было отмечено, что диапазон изменения скрытой теплоты плавления составлял $-1,6\%$, $-5,4\%$ и $2,2\%$ соответственно. Было обнаружено, что сложные эфиры как материалы с фазовым переходом обладают хорошей термической стабильностью.

Zhang и соавторы [140] выполнили 100 тепловых циклов для эвтектической смеси лауриновой кислоты и пальмитиновой кислоты. Было отмечено изменение температуры плавления на $-0,51\%$ и скрытой теплоты плавления на 10% . Было обнаружено, что бинарные системы жирных кислот обладают потенциалом для аккумулирования тепла и могут широко использоваться в теплоаккумуляторах систем солнечного теплоснабжения.

Сари и соавторы [111] провели испытание 360 тепловых циклов для лауриновой кислоты (LA 75,5 мас.%) + стеариновой кислоты (SA 24,5 мас.%), миристиновой кислоты (MA 58 мас.%) + пальмитиновой кислоты (PA 42 мас.%) и пальмитиновой кислоты (ПА 64,2 мас.%) + стеариновая кислота (СА 35,8 мас.%). Эти соединения образуют эвтектические смеси. Наблюдалось, что диапазон изменения температуры плавления составлял $0,36^\circ\text{C}$, $-0,2^\circ\text{C}$ и $1,28^\circ\text{C}$ для LA-SA, MA-PA и PA-SA соответственно. Диапазон изменения скрытой теплоты плавления составил $0,2\%$, $2,8\%$ и $2,8\%$ для LA-SA, MA-PA и PA-SA соответственно. Эти материалы обладают хорошей термической стабильностью при термоциклировании в течение примерно одного года. При увеличении числа тепловых циклов изменения температур

плавления и скрытых теплоты плавления исследуемых эвтектических смесей не являются регулярными. Эти материалы могут использоваться для аккумулирования тепла при пассивном солнечном нагреве в зависимости от климатических условий.

Meizhi He и др. [58] готовили и изучали бинарные эвтектические гидратированные соли неорганических материалов с фазовым переходом $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ - 20 мас.% $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ с добавлением зародышеобразователя 1 мас.% $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ и загустителя 0,5 мас.% карбоксиметилцеллюлозы (КМЦ). Было замечено, что изменение температуры плавления для процесса плавления и застывания составляло - 0,18 и 0,1 °C после испытания 100 тепловыми циклами. Диапазон изменения скрытой теплоты плавления составил -4,2%. Средние значения переохлаждения и степени перегрева составили 0,59 °C и 0,49 °C соответственно. Результаты показывают, что модифицированный неорганический $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ - 20 вес.% $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ - 1 вес.% $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ - 0,5 вес.% КМЦ может сохранять превосходную термическую стабильность в течение 100 циклов и обеспечивать постоянное значение теплофизических параметров при практическом использовании.

Маркс [83] выполнил 320 циклов термоциклирования на глауберовой соли с аттапульгитовой глиной в качестве загустителя, а в качестве зародышеобразователя была использована бура ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$). Было обнаружено, что изменение скрытой теплоты плавления для соли Глаубера составило -73,5% после 40 циклов, а для загущенной смеси - -48% после 200 циклов. Было выяснено, что значительно улучшены характеристики загущенной смеси по сравнению с глауберовой солью и смесью буры. Однако загущенная смесь демонстрирует снижение скрытой теплоты плавления при термоциклировании. Результаты показывают, что чистая глауберова соль и загущенная смесь были непригодны для длительного использования в качестве материалов для скрытого накопления тепла.

Вада и соавторы [136] выполнили термические циклы на тригидрате ацетата натрия ($\text{CH}_3\text{CO}_2\text{Na} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$). Калориметрические измерения были выполнены на трех видах образцов: образец гарантированного качества, образец технического качества и образец технического качества, загущенный поливиниловым спиртом. В качестве зародышеобразователя использовали декагидрат пирофосфата натрия ($\text{Na}_2\text{P}_4\text{O}_{10} \cdot 10\text{H}_2\text{O}$). Наблюдалось, что изменение скрытой теплоты плавления для образца гарантированного качества и образца технического качества составляло -21,25% и -9,2% соответственно после 30 циклов и составляло -37% и -22,7% соответственно после 400 циклов. Результаты показывают, что теплоаккумулирующая способность образца технического качества снижается медленнее, чем у образца

гарантированного качества. Они также сообщили, что загущенный материал показал незначительные ухудшения свойств во время испытания тепловыми циклами.

Сари [112] исследовал влияние 1460 тепловых циклов на эвтектические смеси лауриновой кислоты (66,0 мас.%) + миристиновой кислоты (34,0 мас.%), лауриновой кислоты (69 мас.%) + пальмитиновой кислоты (31 мас.%) и миристиновой кислоты (64 мас.%) + стеариновая кислота (36 мас.%), которые образуют эвтектические смеси и используются в качестве материалов с фазовым переходом). Наблюдалось, что изменение температур плавления и скрытых теплот плавления находятся в диапазоне 0,9 °C, 0,23 °C и -0,2 °C и -0,9%, 2,3% и -1,1% соответственно для LA – MA, LA– PA и MA – SA после 360 тепловых циклов. После 1460 тепловых циклов изменение температур плавления и скрытых теплот плавления находятся в диапазоне -0,31 °C, -0,4 °C и -1,1 °C и 2,4%, 1,5% и 1% соответственно для LA – MA, LA –PA и MA – SA. Результаты показывают, что исследованные ФТАМ имеют хорошие термические свойства и термическую стабильность в течение 4-летнего периода работы, что соответствует 1460 тепловым циклам. Подробная информация о температуре плавления и скрытой теплоте плавления ФТАМ (органических, неорганических и эвтектических) приведена в Приложении А, (Таблица А.1, Таблица А.2, Таблица А.3) [79].

Коррозия

Проблема химического взаимодействия ФТАМ с конструкционными материалами контейнеров является одной из основных при использовании ФТАМ в системах аккумулирования теплоты. Анализ научной и технической литературы показал, что, в основном, коррозия присуща металлам и их соединениям при взаимодействии с неорганическими веществами в виде гидратов солей и других аналогичных составов. Вместе с тем, эта проблема недостаточно полно изучена именно с точки зрения использования этих материалов в качестве ФТАМ.

Совместимость материала с фазовым переходом с другими материалами важна для поддержания целостности контейнера, так как его повреждение приводит к выходу из строя системы аккумулирования тепла, а также к нанесению возможных негативных последствий окружающей среде в случае утечки. Проблемы в совместимости материалов с материалом фазового перехода являются следующими:

- коррозия металлов в контакте с неорганическими материалами.
- потеря стабильности пластмасс в контакте с органическими материалами.
- утечка жидкости или газа через пластмассы, которая влияет на работоспособность системы аккумулирования тепла и внешнюю среду [34].

Heine et al. изучали процессы коррозии при взаимодействии шести расплавленных солей при температурах плавления между 235 и 857 °С и четырех металлов. Было показано, что коррозионные процессы усиливаются при увеличении температуры [139].

Sari и Kaygusuz [107] проводили коррозионные испытания взаимодействия четырех материалов: меди, стали, алюминия и нержавеющей стали с жирными кислотами, такими как миристиновая кислота, пальмитиновая кислота, стеариновая кислота и лауриновая кислота. Было обнаружено, что нержавеющая сталь и алюминий обладают устойчивой коррозией, но медь имеет незначительную коррозию. Сталь показала слабую коррозию при взаимодействии с пальмитиновой кислотой и миристиновой кислотой. Результаты исследования коррозионного воздействия, наблюдаемого на поверхности металлических образцов при металлографическом исследовании, приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 - Коррозионные эффекты, наблюдаемые на поверхности металлических образцов при металлографическом исследовании

	Стеариновая кислота	Пальмитиновая кислота	Миристиновая кислота	Лауриновая кислота
SS 304 L	Стойкий	Стойкий	Стойкий	Стойкий
Steel C20	Стойкий	Слегка коррозия	Слегка коррозия	Стойкий
Al	Стойкий	Стойкий	Стойкий	Стойкий
Cu	Слегка коррозия	Слегка коррозия	Слегка коррозия	Слегка коррозия

Кабеза и соавторы [35] проведены испытания на коррозию пяти металлических контейнеров, а именно: из алюминия, латуни, меди, стали и нержавеющей стали, которые находятся в контакте с двумя гидратами солей, а именно, тригидратом ацетата натрия и пентагидратом тиосульфата натрия. Было обнаружено, что латунь и медь достаточно сильно взаимодействуют с этими солями. При использовании тригидрата ацетата натрия можно использовать алюминий, сталь и нержавеющую сталь. При использовании пентагидрата тиосульфата натрия можно использовать алюминий и нержавеющую сталь.

Эдуард и др. [91] изучали коррозионное воздействие различных металлов и полимерных материалов при контакте с некоторыми ФТАМ, используемыми в низкотемпературных приложениях. Было отмечено, что следует избегать использования меди и углеродистой стали в качестве контейнеров для ФТАМ (ТАМ-А: C-18($\text{NaNO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{добавки}$), ТАМ-В: E-21($\text{NaCl} + \text{H}_2\text{O}$), ТАМ-D: 19% $\text{NH}_4\text{Cl} + \text{H}_2\text{O}$ и др.), а алюминий не рекомендуется (для ТАМ-А: C-18($\text{NaNO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{добавки}$, ТАМ-В: E-21($\text{NaCl} + \text{H}_2\text{O}$), ТАМ-D: 19% $\text{NH}_4\text{Cl} + \text{H}_2\text{O}$ и др.); нержавеющая сталь 316 рекомендуется при контакте с некоторыми ФТАМ (ТАМ-А: C-18($\text{NaNO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{добавки}$, ТАМ-В: E-21($\text{NaCl} + \text{H}_2\text{O}$), ТАМ-D: 19% $\text{NH}_4\text{Cl} + \text{H}_2\text{O}$ и др.). Более

того, полипропилен (PP), полистирол (PS), полиэтилентерефталат (PET) и полиэтилен высокой плотности (HDPE) не подвержены процессу коррозии и также совместимы с изученными ФТАМ.

La'zaro et al. [78] экспериментально исследовали совместимость некоторых материалов с фазовым переходом (ФТАМ), обычно используемых для аккумулялирования тепловой энергии с температурой плавления около 22 ° C, и некоторых пластмасс, используемых в настоящее время в качестве материалов для капсулирования. Результаты исследований приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Совместимые и не совместимые пары ФТАМ и пластика

ФТАМ	Температура плавления, (°C)	Совместимый пластик	Не совместимый пластик
Сплав 34%C16–66%C18	19.5 –22.5	PET(полиэтилентерефталат)	LDPE(Полиэтилен низкой плотности)
RT26	20	PET	LDPE
RT25	26	PET	LDPE
RT20	25	PET	LDPE
ТН24(соль гидратированная)	24	HDPE(полиэтилен высокой плотности)	LDPE

Фазовая сегрегация и переохлаждение

Одной из проблем, возникающих при выборе ФТАМ, является фазовая сегрегация материала и связанное с ней явление переохлаждения. Этими недостатками в первую очередь страдают ФТАМ на основе гидратов солей. Как уже было отмечено выше, фазовая сегрегация проявляется по причине их неравномерного плавления. При этом материал разлагается на две фазы – жидкую и твердую в виде более низкого порядка гидрата той же соли. Такое расслоение материала ведет к осаждению твердой фазы и нарушению режима аккумулялирования. Сегрегация может быть уменьшена путем изменения свойств соли гидрата с добавлением другого материала, который может препятствовать опусканию более тяжелой фазы на дно контейнера. Такими материалами могут быть материалы, способствующие гелеобразованию или загущению. Гелеобразование осуществляется путем добавления специального материала (например, полимера) к соли, при этом создается трехмерная структура, которая удерживает основной материал ФТАМ внутри этой структуры [34]. Кроме того, расплавам гидратов солей свойственно переохлаждение, возникающее вследствие того, что при охлаждении расплав остается еще в жидком состоянии при температурах, лежащих много ниже температуры кристаллизации (и температуры плавления). Переохлаждение, как правило, сопровождается интенсивной очаговой кристаллизацией. С целью уменьшения переохлаждения, как правило,

применяют вещества, являющиеся первичными центрами кристаллизации. Такими материалами могут быть боракс, оксид титана, также полимеры и некоторые ингибиторы [34].

2.3 Иерархическая факторно-критериальная модель выбора материалов с фазовым переходом для аккумулирования тепла в системах солнечного теплоснабжения.

Одной из основных проблем создания систем солнечного теплоснабжения, использующих аккумулирование тепла на основе материалов с фазовым переходом, является выбор таких материалов, которые в полной мере соответствовали бы тем требованиям, которые предъявляются к ним для обеспечения эффективности, надежности и безопасности.

Проблема выбора является одной из краеугольных в современной науке и технологиях и достаточно полно изучена в системном анализе и его ключевом разделе – теории принятия решений.

В данном исследовании проблема выбора ФТАМ сводится к решению следующих вопросов:

1. Разработка критериев, по которым производится выбор ФТАМ.
2. Определение важности (веса) каждого из этих критериев для задачи выбора.
3. Предварительный выбор альтернативных ФТАМ, которые могут использоваться в системах солнечного теплоснабжения.
4. Процедура окончательного выбора ФТАМ с учетом разработанных критериев выбора и их весов для каждого альтернативного варианта.

При такой постановке задача выбора ФТАМ идейно сводится к одному из известных в теории принятия решений методов решения задач подобного класса - методу анализа иерархий МАИ) [98, 124, 125]. Метод анализа иерархий - это базовый подход к принятию решений или метод решения сложных проблем, включающий множество критериев, разработанный Саати [105].

Таким образом, основываясь на идеологии метода анализа иерархий, процедура выбора ФТАМ включает в себя следующий алгоритм:

Шаг 1: Определить цели.

Целью данного исследования является выбор наилучшего ФТАМ, используемого для аккумулирования тепловой энергии в солнечных системах теплоснабжения.

Шаг 2: Определить критерии выбора типа ФТАМ.

В качестве критериев используются как теплофизические и химические, так и экономические свойства ФТАМ. Анализ материалов с фазовым переходом, выполненный выше, показал, что наиболее значимыми критериями с точки зрения их влияния на энергетическую эффективность, надежность и экономическую целесообразность являются: скрытая теплота плавления (LH), теплопроводность материала (K), удельная теплоемкость (CP), плотность (D), термическая стабильность (ST), стоимость (CO) и коррозия (COR).

Выбранные критерии влияют на характеристики системы аккумулирования тепла. Наиболее приемлемым диапазоном температур плавления для систем солнечного теплоснабжения является (50-70 °C). Высокая скрытая теплота плавления желательна, так как больше тепла будет аккумулироваться без изменения температуры ФТАМ. Хотя на практике во время плавления ФТАМ будет наблюдаться повышение температуры на несколько градусов. Высокая удельная теплоемкость ФТАМ желательна, так как это приведет к большему поглощению тепла при меньшем повышении температуры ФТАМ за пределами температурного диапазона фазового перехода. Высокая теплопроводность ФТАМ желательна для того, чтобы теплоаккумулятор с ФТАМ быстро заряжался и разряжался для эффективной работы. Высокая плотность ФТАМ желательна, так как больше материала может быть установлено в меньшем объеме контейнера, что увеличит удельную тепловую емкость ФТАМ. Высокая термическая стабильность ФТАМ является обязательным свойством, так как при работе в системе солнечного теплоснабжения ФТАМ многократно подвергается циклам плавление/застывание, при этом изменения теплофизических свойств материала должно быть минимальным. Для увеличения срока службы системы аккумулирования тепла материалы контейнера должны быть совместимы с ФТАМ. Материал с фазовым переходом должен быть доступен, выпускаться в больших количествах при низких затратах, что желательно для снижения стоимости системы аккумулирования тепла.

Шаг 3: Выбрать альтернативы

Как было сказано выше, в настоящее время исследовано и используется в различных технических системах большое количество различных материалов с фазовым переходом. Однако для вполне определенного класса систем, а именно – систем солнечного теплоснабжения с их специфическими температурными диапазонами и режимами эксплуатации, подходящими являются ограниченное их число.

В таблице 2.6 представлены предварительно выбранные ФТАМ, являющиеся альтернативными вариантами для систем солнечного теплоснабжения. Из огромного количества ФТАМ выбраны материалы, имеющие температуру плавления в требуемом

диапазоне рабочих температур. В данном исследовании были определены пять ФТАМ, наиболее подходящие для аккумулирования солнечной тепловой энергии. Альтернативными являются: парафин (P), лауриновая кислота (LA), миристиновая кислота (MA), пальмитиновая кислота (PA) и стеариновая кислота (SA).

Таблица 2.6 – Теплофизические свойства выбранных фазовых теплоаккумулирующих материалов (ФТАМ) [1]

	Температура плавления (°C)	Скрытая теплота плавления (кДж / кг)	Теплопроводность λ (Вт / м К)	Удельная теплоемкость (СР) кДж / кг К	Плотность (D) кг / м ³	Термическая стабильность (скрытая теплота после 900 термических циклов)(ST)	Средняя стоимость (\$ / кг)(CO)	Коррозия (COR.)	Ссылка
Парафин (P)	57,1	220	0,21	2,2-2,8	930	Более стабильный (224)	1,9	нет	[55, 85, 139]
Лауриновая кислота (LA)	42,6	211,6	0,16	1,7-2,3	1007	Менее стабильный (132,8)	4,5	средний	[107, 73]
Миристиновая кислота (MA)	53,8	192	0,17	1,7-2,4	844	стабильный (159,1)	5	средний	[107, 85, 139]
Пальмитиновая кислота (PA)	60,9	197,9	0,159	1,9-2,8	989	стабильный (162,9)	1,6	средний	[107, 85, 139]
Стеариновая кислота (SA)	53,8	174,6	0,172	1,6-2,2	965	Менее стабильный (118,9)	3,5	средний	[107, 85, 139]

Шаг 4: Организовать в иерархической структуре цели, критерии и альтернативы. Дерево иерархии имеет три уровня: цель и проблемы наверху, множество критериев, которые определяют альтернативы - в середине, и альтернативные решения внизу. На рисунке 2.2 представлено иерархическое дерево для выбора ФТАМ, используемого для аккумулирования солнечной тепловой энергии.

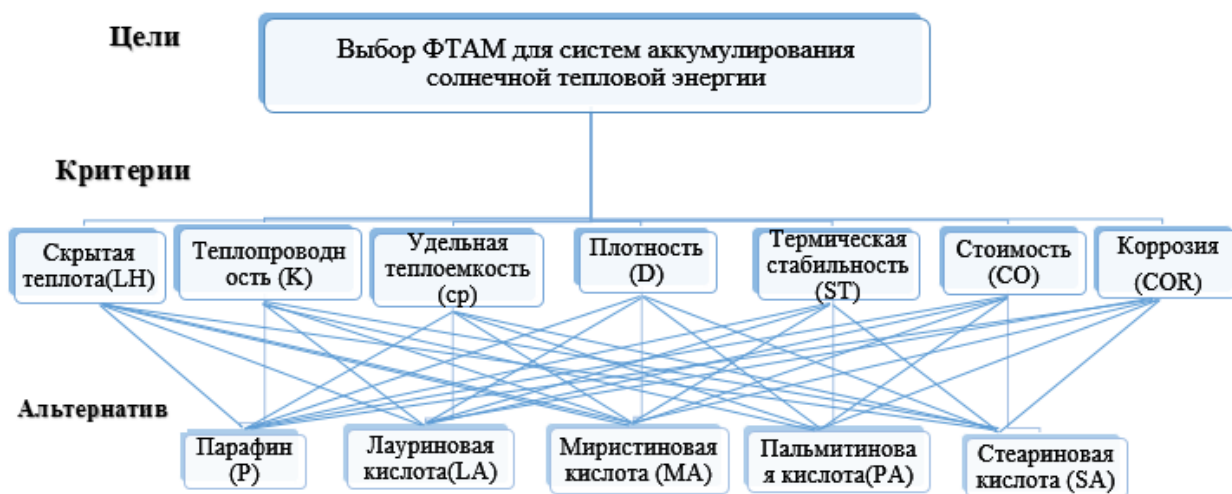


Рисунок 2.2 – Иерархическое дерево для выбора фазовых теплоаккумулирующих материалов (ФТАМ), используемых для солнечных систем аккумулирования тепловой энергии.

Шаг 5: Построить парную матрицу сравнений, используя шкалу относительной важности. Каждый элемент матрицы основан на девятибалльной шкале Саати, представленной в таблице 2. 7. Пусть $C = \{C_j | j = 1, 2, \dots, n\}$ будет набором критериев. Результат парного сравнения по n критериям может быть обобщен в $(n \times n)$ оценочной матрице $A(2.3)$. Каждый элемент a_{ij} ($i, j = 1, 2, \dots, n$) обозначает сравнительную важность критериев i по отношению к критериям j . Критерию, сравниваемому с самим собой, всегда присваивается значение 1, поэтому основными диагональными элементами матрицы парного сравнения являются все 1.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}}, a_{ij} \neq 0 \quad (2.3)$$

Таблица 2.7 –Относительная значимость факторов [104]

Описание (i над j)	Относительная важность(a_{ij})
Равное значение	1
Умеренное значение	3
Сильное значение	5
Очень большое значение	7
Абсолютная важность	9
Промежуточные значения	2,4,6,8

Шаг 6: Вычисление среднего геометрического (GM_i) (2.4) для i -й строки и нормализация среднего геометрического количества строк в матрице сравнения для получения относительного нормализованного веса (W_i) (2.5) каждого критерия:

$$GM_i = \{a_{i1} \times a_{i2} \times a_{i3} \times \dots \times a_{in}\}^{(1/n)} \quad (2.4)$$

$$w_i = \frac{GM_i}{\sum_{j=1}^n GM_j} \quad (2.5)$$

Шаг 7: Построить матрицу $X(2.6)$, которая обозначает n -мерный вектор столбца, описывающий сумму взвешенных значений для степеней важности альтернатив

$$X = A \times W = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \dots \\ w_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \dots \\ c_n \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Шаг 8: Рассчитать значение согласованности(2.7):

$$CV_i = \frac{c_i}{w_i} \quad (2.7)$$

Шаг 9: Определить максимальное собственное значение $\lambda_{\max}$ (2.8), которое является средним для значений согласованности.

$$\lambda_{\max} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} CV_i}{n} \quad (2.8)$$

Шаг 10: Рассчитать индекс согласованности (2.9):

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (2.9)$$

Следует отметить, что качество решения задачи выбора строго связано с последовательностью суждений о попарном сравнении.

Шаг 11: Определить случайный индекс (RI) для числа критериев, используемых при принятии решений из таблицы 2.8.

Таблица 2.8 – Средние значения случайного индекса (RI) [104]

Критерии	3	4	5	6	7	8	9	10
Случайный индекс(RI)	0,52	0,89	1,11	1,25	1,35	1,4	1,45	1,49

Шаг 12: Рассчитать коэффициент согласованности(2.10)

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (2.10)$$

Число 0,1 является принятым верхним пределом для CR [98, 124]. Если окончательный коэффициент согласованности превышает это значение, процедуру оценки необходимо повторить для улучшения согласованности. Измерение согласованности может использоваться для оценки согласованности лиц, принимающих решения, а также согласованности общей иерархии.

Шаг 13: Определить общий уровень эффективности каждой альтернативы в отношении критериев и цели решения(2.11):

$$P_k = \sum_{i=1}^{i=n} w_i \cdot \sum_{j=1}^{j=m} w_j \quad i=1, \dots, n, \quad j=1, \dots, m \quad (2.11)$$

где w_i ($i = 1, \dots, n$) - веса критериев, w_j ($j = 1, \dots, m$) - веса альтернатив по критерию i . Подходящий материал будет иметь самый большой общий вес по отношению к цели решения.

Далее, в соответствии с процедурой метода МАИ, разрабатывается индивидуальная матрица парного сравнения критериев с использованием шкалы, приведенной в Таблица 2.. По результатам вышеприведенных исследований матрица парных сравнений выглядит следующим образом(2.12):

$$\begin{array}{l}
 LH \\
 K \\
 D \\
 CP \\
 ST \\
 CO \\
 COR.
 \end{array}
 \begin{bmatrix}
 LH & K & D & CP & ST & CO & COR. \\
 1 & 5 & 5 & 7 & 3 & 7 & 5 \\
 1/5 & 1 & 1 & 3 & 1/3 & 3 & 5 \\
 1/5 & 1 & 1 & 3 & 1/3 & 3 & 5 \\
 1/7 & 1/3 & 1/3 & 1 & 1/5 & 1 & 3 \\
 1/3 & 3 & 3 & 5 & 1 & 7 & 5 \\
 1/7 & 1/3 & 1/3 & 1 & 1/7 & 1 & 1/3 \\
 1/5 & 1/5 & 1/5 & 1/3 & 1/5 & 3 & 1
 \end{bmatrix}
 \quad (2.12)$$

Матрица решений для критериев, используемых в этом исследовании

Скрытая теплота (LH) считается значительно более важной, чем теплопроводность (K) при выборе ФТАМ. Таким образом, значение относительной важности 5 присваивается LH над K (то есть $a_{12} = 5$), а значение относительной важности 1/5 присваивается K над LH (то есть $a_{21} = 1/5$). Точно так же, LH считается более важным, чем удельная теплоемкость (CP). Таким образом, значение относительной важности 7 назначается LH над CP (то есть $a_{14} = 7$), а значение относительной важности 1/7 назначается CP по LH (то есть $a_{41} = 1/7$). Точно так же можно объяснить относительную важность среди других критериев. Однако можно добавить, что на практике значения относительной важности могут быть разумно определены пользователем/экспертами в зависимости от требований [22].

Матрицы принятия решений из пяти альтернатив с учетом критериев, используемых в данном исследовании:

1. Критерии скрытой теплоты (LH) (2.13)

$$\begin{array}{l}
 P \\
 LA \\
 LH = MA \\
 PA \\
 SA
 \end{array}
 \begin{bmatrix}
 P & LA & MA & PA & SA \\
 1 & 3 & 3 & 3 & 5 \\
 1/3 & 1 & 3 & 3 & 5 \\
 1/3 & 1/3 & 1 & 1/3 & 3 \\
 1/3 & 1/3 & 3 & 1 & 3 \\
 1/5 & 1/5 & 1/3 & 1/3 & 1
 \end{bmatrix}
 \quad (2.13)$$

2. Критерии теплопроводности (K) (2.14)

$$\begin{array}{l}
 P \\
 LA \\
 K = MA \\
 PA \\
 SA
 \end{array}
 \begin{bmatrix}
 P & LA & MA & PA & SA \\
 1 & 3 & 3 & 3 & 3 \\
 1/3 & 1 & 1/3 & 1 & 1/3 \\
 1/3 & 3 & 1 & 3 & 1 \\
 1/3 & 1 & 1/3 & 1 & 1/3 \\
 1/3 & 3 & 1 & 3 & 1
 \end{bmatrix}
 \quad (2.14)$$

3. Критерии плотности (D) (2.15)

$$\begin{array}{l}
 P \\
 LA \\
 D = MA \\
 PA \\
 SA
 \end{array}
 \begin{bmatrix}
 P & LA & MA & PA & SA \\
 1 & 1/3 & 3 & 1/3 & 1/3 \\
 3 & 1 & 5 & 3 & 3 \\
 1/3 & 1/5 & 1 & 1/3 & 1/3 \\
 3 & 1/3 & 3 & 1 & 3 \\
 3 & 1/3 & 3 & 1/3 & 1
 \end{bmatrix}
 \quad (2.15)$$

4. Критерии удельной теплоемкости (CP) (2.16)

$$\begin{array}{l}
 P \\
 LA \\
 CP = MA \\
 PA \\
 SA
 \end{array}
 \begin{bmatrix}
 P & LA & MA & PA & SA \\
 1 & 5 & 5 & 3 & 5 \\
 1/5 & 1 & 1 & 1/3 & 1 \\
 1/5 & 1 & 1 & 1/3 & 1 \\
 1/3 & 3 & 3 & 1 & 3 \\
 1/3 & 1 & 1 & 1/3 & 1
 \end{bmatrix}
 \quad (2.16)$$

5. Критерии термической стабильности (ST)(2.17)

$$ST = \begin{matrix} P \\ LA \\ MA \\ PA \\ SA \end{matrix} \begin{bmatrix} P & LA & MA & PA & SA \\ 1 & 7 & 5 & 5 & 7 \\ 1/7 & 1 & 1/5 & 1/5 & 1/3 \\ 1/5 & 5 & 1 & 3 & 5 \\ 1/5 & 5 & 1/3 & 1 & 3 \\ 1/7 & 3 & 1/5 & 1/3 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

6. Критерии стоимости (CO) (2.18)

$$CO = \begin{matrix} P \\ LA \\ MA \\ PA \\ SA \end{matrix} \begin{bmatrix} P & LA & MA & PA & SA \\ 1 & 5 & 5 & 1 & 5 \\ 1/5 & 1 & 1 & 1/5 & 1/3 \\ 1/5 & 1 & 1 & 1/5 & 1/3 \\ 1 & 5 & 5 & 1 & 3 \\ 1/5 & 3 & 3 & 1/3 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

7. Критерии коррозии (COR.) (2.19)

$$COR. = \begin{matrix} P \\ LA \\ MA \\ PA \\ SA \end{matrix} \begin{bmatrix} P & LA & MA & PA & SA \\ 1 & 3 & 5 & 5 & 3 \\ 1/3 & 1 & 3 & 3 & 1 \\ 1/5 & 1/3 & 1 & 3 & 1/3 \\ 1/5 & 1/3 & 1 & 1 & 1/3 \\ 1/3 & 1 & 3 & 3 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Результаты, полученные на основе матриц парного сравнения, приведены в таблице 2.9 и в таблице Б.1 до Б.7, Приложении Б. На рисунке 2.3 показаны локальные веса, полученные с использованием каждого критерия данного исследования. На рисунках 2.4 до 10 показаны веса, полученные для альтернатив, соответствующих каждому критерию.

В таблице 2.9 приведены результаты, полученные из матриц парных сравнений критериев, использованных в данном исследовании.

Таблица 2.9 – Результаты, полученные из парных сравнительных матриц критериев, использованных в этом исследовании

Критерии	Среднее геометрическое (GM)	Веса (w)	Матрица $X=A \cdot W$	Значение согласованности (CV)	Максимальное собственное значение (λ_{max})	Индекс согласованности (CI)	Коэффициент согласованности (CR)
Скрытая теплота плавления (K)	4,0660	0,4016	3,082465	7,674831	7,63	0,10529	0,07799
Теплопроводность (K)	1,1699	0,1155	0,847444	7,333253			
Плотность (D)	1,1699	0,1155	0,847444	7,333253			
Удельная теплоемкость (CP)	0,514	0,0508	0,387068	7,618581			
Термическая стабильность (ST)	2,4467	0,2416	1,767483	7,313192			
Стоимость (CO)	0,358	0,0353	0,268252	7,58273			
Коррозия (COR.)	0,398647	0,0393	0,33733	8,566686			

Коэффициент согласованности матриц парного сравнения равен 0,07799, что меньше допустимого значения CR 0,1. Следовательно, веса согласуются и используются в процессе

выбора. На Рисунок 2.3 показано, что весовой коэффициент для критерия скрытой теплоты плавления (LH) составляют около 40,16%, это является наиболее важным параметром, весовой коэффициент для термостабильности (ST) составляет около 24,17%, и он считается следующим наиболее важным параметром. Веса для критериев теплопроводности (K) и плотности (D) одинаковы 11,56% и являются менее значимыми. Критерии коррозии и стоимости оказались наименее значимыми.

В таблице Б.1, Приложении Б приведены результаты, полученные из матрицы парного сравнения альтернатив по критерию скрытой теплоты (LH). Значение коэффициента согласованности матрицы парного сравнения равно 0,07985, что меньше допустимого значения CR 0,1. Следовательно, веса согласуются и используются в процессе выбора. Рисунок 2.4 показывает веса альтернатив, полученных по критерию скрытой теплоты (LH). Заметно, что наиболее подходящим материалом по критерию (LH) является парафин (P) с весом 41,88%, а следующими материалами являются лауриновая кислота (LA) и пальмитиновая кислота (PA) с весами 26,99% и 15,7% соответственно. Наименьшими весами обладают миристиновая кислота (MA) и стеариновая кислота (SA) с весами 10,12% и 5,31% соответственно.

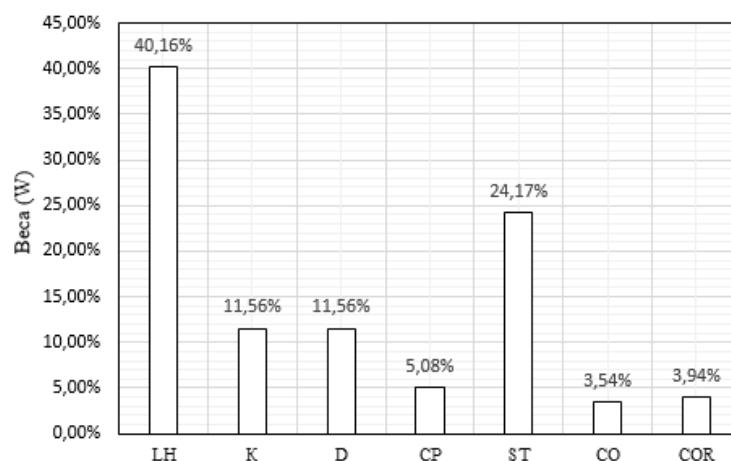


Рисунок 2.3 – Веса критериев (Скрытая теплота плавления (LH), Теплопроводность (K), Плотность (D), Удельная теплоемкость (CP), Термическая стабильность (ST), Стоимость (CO), и Коррозия (COR.)).



Рисунок 2.4 – Веса альтернатив (Парафин (P), Лауриновая кислота (LA), Миристиновая кислота (MA), Пальмитиновая кислота (PA), и Стеариновая кислота (SA)), полученных для критерия скрытой теплоты (LH)

В таблице Б.2, Приложении Б приведены результаты, полученные из матрицы парного сравнения альтернатив для критерия теплопроводности (K). Значение коэффициента согласованности матрицы парного сравнения равно 0,09412, что меньше допустимого значения CR 0,1. Следовательно, веса согласуются и используются в процессе выбора. Рисунок 2.5 указывает веса альтернатив, полученных для критерия теплопроводности (K). Заметно, что наиболее подходящим материалом для критерия теплопроводности (K) является парафин (P) с весом 40,58%, а следующими материалами являются миристиновая кислота (MA) и стеариновая кислота (SA) с весом 20,99%, что в два раза меньше по сравнению с материалом на первом месте. Наименьший вес имеют материалы лауриновая кислота (LA) и пальмитиновая кислота (PA) с весом 8,72%.



Рисунок 2.5 – Веса альтернатив (Парафин (P), Лауриновая кислота (LA), Миристиновая кислота (MA), Пальмитиновая кислота (PA), и Стеариновая кислота (SA)), полученных для критерия теплопроводности (K).

В таблице Б. 3, Приложении Б приведены результаты, полученные из матрицы парного сравнения альтернатив для критерия плотности (D). Значение коэффициента согласованности матрицы парного сравнения равно 0,0877, что меньше допустимого значения CR 0,1. Следовательно, веса согласуются и используются в процессе выбора. Рисунок 2.6 указывает веса альтернатив, для критерия плотности (D). Показано, что наиболее подходящим материалом для критерия плотности (D) является лауриновая кислота (LA) с весом 42,76%. Следующими материалами, которые можно использовать, являются пальмитиновая кислота (PA) и стеариновая кислота (SA) с весами 24,88% и 16,03% соответственно. Наименьшим весом обладают парафин (P) и миристиновая кислота (MA) с весами 10,33% и 6,01% соответственно и в четыре и семь раз меньше по сравнению с альтернативами, занимающими первое место.



Рисунок 2.6 – Веса альтернатив (Парафин (P), Лауриновая кислота (LA), Миристиновая кислота (MA), Пальмитиновая кислота (PA), и Стеариновая кислота (SA) для критерия плотности (D)

В таблице Б.4, Приложении Б показаны результаты, полученные из попарного сравнения альтернатив матрицы для критерия удельной теплоемкости (CP). Значение коэффициента согласованности матрицы парного сравнения равно 0,0094, что намного меньше, чем допустимое значение CR 0,1. Следовательно, веса согласуются и используются в процессе выбора. Рисунок 2.7 показывает веса альтернатив, для критерия удельной теплоемкости (CP). Заметно, что наиболее подходящим материалом для критерия удельной теплоемкости (CP) является парафин (P) с весом 49,81%, а следующим материалом является пальмитиновая кислота (ПА) с весом 23,62%. Наименьшим весом обладают материалы лауриновая кислота (LA), миристиновая кислота (MA) и стеариновая кислота (SA) с весом 8,86%. Значения их весов примерно в пять раз меньше, чем у парафина (P), занимающего первое место.



Рисунок 2.7 – Веса альтернатив (Парафин (P), Лауриновая кислота (LA), Миристиновая кислота (MA), Пальмитиновая кислота (PA), и Стеариновая кислота (SA) для критерия удельной теплоемкости (CP)

В таблице Б.5, Приложении Б показаны результаты, полученные из матрицы парного сравнения альтернатив для критерия термостабильности (ST). Значение коэффициента согласованности матрицы парного сравнения равно 0,08374, что меньше допустимого значения CR 0,1. Следовательно, веса согласуются и используются в процессе выбора. Рисунок 2.8 указывает веса альтернатив для критерия термостабильности (ST). Заметно, что наиболее подходящим материалом по критерию термостабильности (ST) является парафин (P) с массой 54,26%. Следующими материалами, которые можно использовать, являются миристиновая кислота (MA) и пальмитиновая кислота (PA) с весами 22,49% и 13,09% соответственно. Наименьшими весами обладают материалы стеариновая кислота (SA) и лауриновая кислота (LA) с весами 6,43% и 3,74% соответственно.



Рисунок 2.8 – Веса альтернатив (Парафин (P), Лауриновая кислота (LA), Миристиновая кислота (MA), Пальмитиновая кислота (PA), и Стеариновая кислота (SA)), по критерию термостабильности (ST)

В таблице Б.6, Приложении Б. показаны результаты, полученные из матрицы парного сравнения альтернатив для критерия стоимости (CO). Значение коэффициента согласованности матрицы парного сравнения равен 0,03076, что намного меньше допустимого значения CR 0,1. Следовательно, веса согласуются и используются в процессе выбора. Рисунок 2.9 указывает веса альтернатив по критерию стоимости (CO). Заметно, что наиболее подходящими материалами по критерию стоимости (CO) являются парафин (P) и пальмитиновая кислота (PA) с весами 38,94% и 35,16% соответственно. Следующим материалом, который можно использовать, является стеариновая кислота (SA) с весом 13,39%. Наименьшим весом обладают такие материалы, как лауриновая кислота (LA) и миристиновая кислота (MA) с весом 6,25%.



Рисунок 2.9 – Веса альтернатив (Парафин (P), Лауриновая кислота (LA), Миристиновая кислота (MA), Пальмитиновая кислота (PA), и Стеариновая кислота (SA) для критерия стоимости (CO)

В таблице Б.7, Приложении Б приведены результаты, полученные из матрицы парного сравнения альтернатив по критерию коррозии (COR.). Значение коэффициента согласованности матрицы парного сравнения равен 0,09361, что намного меньше допустимого значения CR 0,1. Следовательно, веса согласуются и используются в процессе выбора. Рисунок 2.10 указывает веса альтернатив по критерию коррозии (COR.). Заметно, что наиболее подходящим материалом по критерию коррозии (COR) является парафин (P) с весом 45,49%. Следующими материалами, которые можно использовать, являются стеариновая кислота (SA) и лауриновая кислота (LA) с весом 19,18%, что в два раза меньше по сравнению с парафином (P), занимающим первое место. Наименьшим весом обладают миристиновая кислота (MA) и пальмитиновая кислота (PA) с весами 8,96% и 7,19% соответственно.

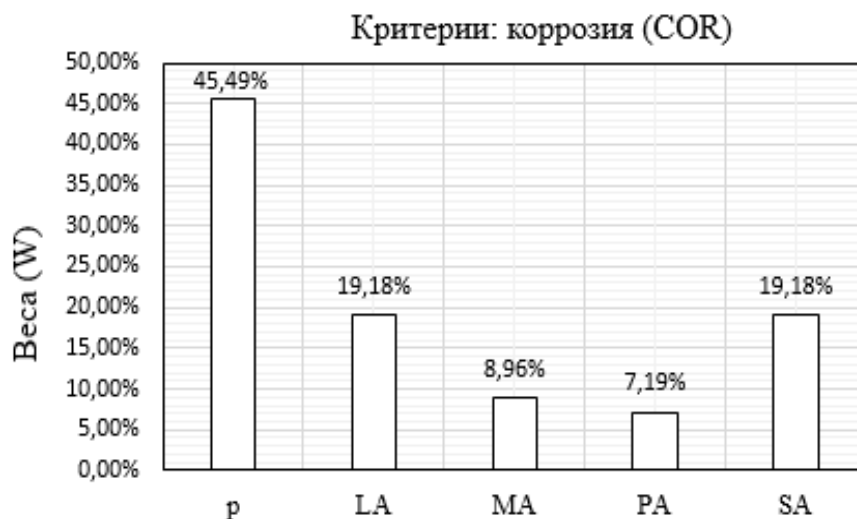


Рисунок 2.10 – Веса альтернатив (Парафин (P), Лауриновая кислота (LA), Миристиновая кислота (MA), Пальмитиновая кислота (PA), и Стеариновая кислота (SA)) по критерию коррозии (COR)

Таблица 2.10 и рисунок 2.11 указывают окончательные результаты весов и ранжирование альтернатив по каждому критерию. Обнаружено, что наилучшим материалом с фазовым переходом, который можно использовать для солнечных водонагревательных систем с учетом всех проанализированных критериев, является парафин (P) с общим весом 41,52%. Следующие альтернативные материалы, которые могут быть использованы - лауриновая кислота (LA) и пальмитиновая кислота (PA) с общим весом 19,12% и 16,08% соответственно.

Таблица 2.10 – Окончательные результаты весов и ранжирование альтернатив по каждому критерию.

Альтернативы / Критерии	Скрытая теплота плавления (LH)	Теплопроводность (K)	Плотность (D)	Удельная теплоемкость (CP)	Термическая стабильность (ST)	Стоимость (CO)	Коррозия (COR)	Глобальные веса	Ранжирование
вес	0,4016	0,1155	0,1155	0,0508	0,2416	0,0353	0,0393		
Парафин (P)	0,4188	0,4058	0,1033	0,4981	0,5426	0,3894	0,4549	0,41515	1
Лауриновая кислота (LA)	0,2699	0,0872	0,4276	0,0886	0,0374	0,0625	0,1918	0,19117	2
Миристиновая кислота (MA)	0,1012	0,2099	0,0601	0,0886	0,2249	0,0625	0,0896	0,13644	4
Пальмитиновая кислота (PA)	0,1570	0,0872	0,2488	0,2362	0,1309	0,3516	0,0719	0,16078	3
Стеариновая кислота (SA)	0,0531	0,2099	0,1603	0,0886	0,0643	0,1339	0,1918	0,09645	5

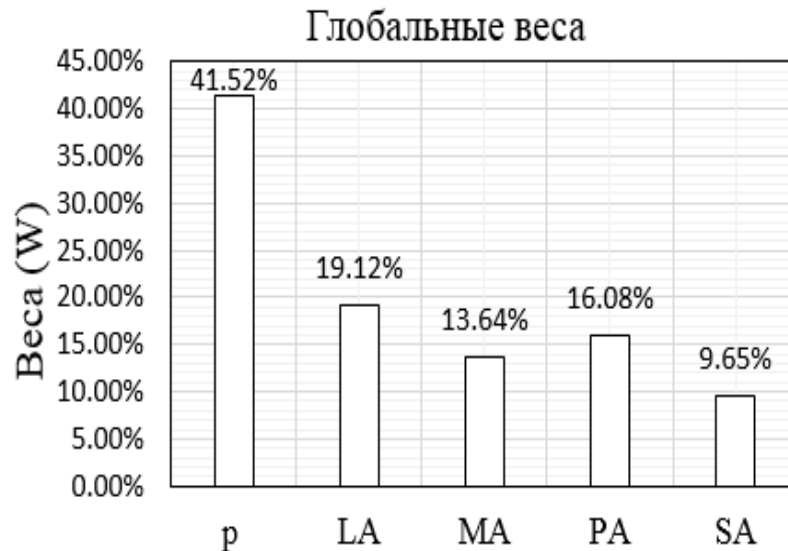


Рисунок 2.11 – Глобальные веса для альтернатив (Парафин (P), Лауриновая кислота (LA), Миристиновая кислота (MA), Пальмитиновая кислота (PA), и Стеариновая кислота (SA))

2.4 Выводы по главе 2

Во второй главе решена задача анализа материалов для систем аккумулирования тепловой энергии и разработана методика выбора ФТАМ.

Анализ работ по теме исследования показал, что из всего многообразия материалов с фазовым переходом для конкретного приложения – систем солнечного теплоснабжения, подходит довольно ограниченное число таких материалов.

Обоснованы критерии, по которым производится выбор материалов. К ним относятся: скрытая теплота фазового перехода, теплопроводность, удельная теплоемкость, плотность, термическая стабильность, стоимость и коррозия.

На основе исследований свойств теплоаккумулирующих материалов был обоснован выбор конкурирующих ФТАМ, которые могут использоваться в аккумуляторах тепла систем солнечного теплоснабжения. Были выбраны следующие материалы: парафин, лауриновая кислота, миристиновая кислота, пальмитиновая кислота и стеариновая кислота.

Разработаны методические основы построения иерархической факторно-критериальной модели выбора материала с фазовым переходом для систем аккумулирования тепла. Методологической основой разработанной факторно-критериальной модели является метод анализа иерархий, предложенный А. Саати.

Результаты показали, что наилучшим подходящим материалом с фазовым переходом является парафин (P) с общим весом 41,52%. Следующими альтернативными материалами, которые можно использовать, являются лауриновая кислота (LA) и пальмитиновая кислота (PA) с общим весом 19,12% и 16,08% соответственно.

ГЛАВА 3 МОДЕЛИРОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ С ФАЗОВЫМ ПЕРЕХОДОМ И ПРОВЕРКА МОДЕЛИ

3.1 Численная модель процессов изменения свойств материала с фазовым переходом.

Математическая формулировка фазового переходного процесса, известного как фазовое изменение или подвижная граница, описывается частным дифференциальным уравнением, которое может быть решено аналитически или численно. Аналитическое решение уравнения поведения ФТАМ проблематично из-за нелинейных интерфейсов фазового фронта, сложной геометрии и нестандартных граничных условий; немногочисленные аналитические исследования относятся к одномерным случаям с правильной геометрией и стандартными граничными условиями. Численный метод для решения уравнения ФТАМ может быть классифицирован как фиксированная сетка, переменная сетка, фиксирование фронта, адаптивная генерация сетки и методы энтальпии [92]. Для анализа теплообмена в твердотельных и жидкостных фазах ФТАМ можно использовать два метода: температурный и энтальпийный. В температурном методе температура считается одной зависимой переменной. Энергетические уравнения для твердого тела и жидкости записываются отдельно; таким образом, положение границы раздела твердое тело-жидкость может быть легко отслежено для достижения точного решения уравнения (3.1) [16].

$$\frac{\partial T_s}{\partial n} K_s = \frac{\partial T_l}{\partial n} K_l + \rho L k v_n \quad (3.1)$$

где T_s обозначает температуру в твердой фазе, T_l обозначает температуру в жидкой фазе, k_s - теплопроводность твердой фазы, k_l - теплопроводность жидкой фазы, n - единичный вектор нормали к границе раздела, и v_n - нормальная составляющая скорости границы раздела. L - скрытая теплота застывания, v - нормальная составляющая скорости границы раздела, как показано на рисунке 3.1.

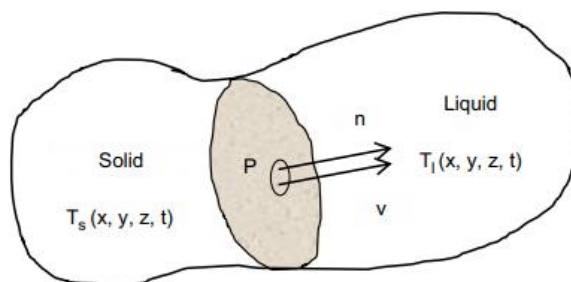


Рисунок 3.1 – Интерфейс твердое тело-жидкость для многомерной задачи [92]

В методе, основанном на энтальпии, положение границы раздела твердое тело-жидкость не нужно отслеживать. Метод энтальпии используется исследователями из-за следующих преимуществ:

1. Основные уравнения аналогичны однофазному состоянию.
2. На границе раздела твердое тело-жидкость не требуется никаких явных условий.
3. Состав энтальпии включает раствор в мягкой зоне, включающий как твердые, так и жидкие материалы, между двумя стандартными фазами.
4. Проблема фазового перехода может быть решена легче(3.2) [69]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \nabla \cdot (\rho v H) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S \quad (3.2)$$

где T обозначает температуру, k - теплопроводность, ρ - плотность ФТАМ, v - скорость жидкости, H - энтальпия, а S - мощность источника.

Недавно исследователи использовали программное обеспечение Fluent от ANSYS для моделирования процесса плавления и застывания в инженерных задачах. Другое программное обеспечение, которое можно использовать для моделирования процесса ФТАМ, включает COMSOL Multiphysics и Star-CCM+. Тем не менее, большинство исследователей предпочитают Fluent для плавления и отверждения ФТАМ. И наоборот, некоторые исследователи самостоятельно разрабатывают программы с использованием языков программирования (C++, Fortran, Matlab) для изучения явлений теплообмена во ФТАМ [16].

Fluent программа

Вычислительная гидродинамика (CFD) является мощным инструментом автоматизированного проектирования (CAE) для анализа физических систем, связанных с потоком жидкости и связанными с ними явлениями, такими как химические реакции, с помощью компьютерного моделирования. Методика была распространена на широкий спектр промышленных и непромышленных применений, например, аэродинамика, сжигание топлива в двигателях внутреннего сгорания и газовых турбинах, смешивание и разделение, формование полимеров и турбомашиностроение [133].

Программное обеспечение Fluent от ANSYS - это программа вычислительной гидродинамики (CFD), успешно используемая для моделирования различных инженерных задач. Это программное обеспечение имеет специальную модель, которая может моделировать целый ряд различных проблем плавления и застывания в технике, включая литье, плавление, рост кристаллов и затвердевание. Программа может использоваться для решения задач фазового изменения, которое происходит при одной температуре (чистые металлы) или в

диапазоне температур (смесь, сплав и т. д.). Чтобы начать симуляцию программного обеспечения Fluent, задача физического инжиниринга рисуется и объединяется в конкретное геометрическое моделирование с использованием инструментов генерации сетки, которые включают программное обеспечение Fluent (Gambit, workbench). Инструменты создания сетки можно импортировать из других программ, таких как Auto CAD. После того, как физическая конфигурация прорисована и объединена в сетку, определяются пограничные слои и типы зон, и сетка экспортируется в программное обеспечение Fluent. Различные размеры сетки и временные шаги должны применяться к численной модели, чтобы гарантировать, что числовые результаты не зависят от параметров. Небольшие размеры сетки и временные шаги предпочтительны для короткого времени моделирования в компьютере [16].

Моделирование процессов застывания и плавления

Математические уравнения, используемые для решения моделей застывания и плавления в Fluent, зависят от метода энтальпии-пористости [17] и основаны на методах конечного объема. В первом случае интерфейс расплава явно не отслеживается. Количество материала, называемое жидкой фракцией и которое указывает на долю объема жидкой фазы, связано с объемом всего плавящегося материала. Жидкая фракция рассчитывается на каждой итерации на основе баланса энтальпии. Мягкая зона представляет собой область, в которой жидкая фракция находится между 0 и 1. Мягкая зона моделируется как «псевдо» пористая среда, в которой пористость уменьшается от 1 до 0 по мере застывания материала. Когда материал полностью затвердел в ячейке, пористость становится равной нулю, что приводит к падению скоростей до нуля. В этом разделе дается обзор теории застывания / плавления. Подробнее о методе энтальпии-пористости [134]. Энергетическое уравнение выражается как (3.3)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \nabla \cdot (\rho v H) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S \quad (3.3)$$

где ρ - плотность ФТАМ, v - скорость жидкости, k - теплопроводность, H - энтальпия, а S - источник. H - общая объемная энтальпия, которая является суммой явной и скрытой теплот, а h_{ref} - ощутимая теплота в T_{ref} (ур-ния 3.4 и 3.5):

$$H = h + \beta L \quad (3.4)$$

$$H = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T C_p dT \quad (3.5)$$

где β относится к жидкой фракции и указывает на долю объема материала в жидкой форме и связана с каждым значением в диапазоне, заданном уравнением. (3.6). Мягкая зона представляет собой область, в которой жидкая фракция находится в диапазоне от 0 до 1.

$$\beta = \begin{cases} 0 & T < T_S \\ \frac{T - T_S}{T_L - T_S} & T_S \leq T \leq T_L \\ 1 & T > T_L \end{cases} \quad (3.6)$$

применяя уравнение (3.6), уравнение энергии записывается в виде(3.7)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot (\rho v h) = \nabla \cdot (k \nabla T) - \frac{\partial}{\partial t}(\rho \beta L) - \nabla \cdot (\rho v \beta L) + S \quad (3.7)$$

Исходный член S (3.8) в уравнении импульса определяется как

$$S = v A_{mush} \frac{(1 - \beta)^2}{\beta^3 + \varepsilon} \quad (3.8)$$

где $\varepsilon = 0,001$ - небольшая вычислительная константа, используемая, чтобы избежать деления на ноль, константа скользкой зоны A_{mush} описывает кинетический процесс в обычной зоне мягкости между 10^4 и 10^7 .

Чтобы учесть влияние естественного конвекционного плавления от изменения плотности, уравнение импульса записывается в виде(3.9)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \nabla \cdot (\rho v v) = -\nabla P + \nabla \cdot (\mu \nabla v) + \rho g + v A_{mush} \frac{(1 - \beta)^2}{\beta^3 + \varepsilon} \quad (3.9)$$

где v - скорость, термин A_{mush} - это константа, отражающая морфологию мягких зон, которая описывает, насколько круто скорость уменьшается до нуля, когда материал затвердевает. Константа ε является небольшим числом, чтобы предотвратить деление на ноль.

Аппроксимация Буссинеска использовалась и действительна, если изменение плотности невелико, поскольку обеспечивает более быструю сходимость, чем другие модели, зависящие от температуры. Модель предполагает, что плотность жидкости постоянна во всех терминах уравнения импульса, кроме члена силы тела, и она моделируется на основе эталонной плотности (ρ_0) и температуры (T_0), а также коэффициента объемного расширения (β_{vec}). Тогда уравнение импульса записывается как (3.10-3.11):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_0 v) + \nabla \cdot (\rho_0 v v) = -\nabla P + \nabla \cdot (\mu \nabla v) + (\rho - \rho_0)g + v A_{mush} \frac{(1 - \beta)^2}{\beta^3 + \varepsilon} \quad (3.10)$$

$$(\rho - \rho_0)g = -\rho \beta_{vec}(T - T_0) \quad (3.11)$$

Преимственность задается как (3.12):

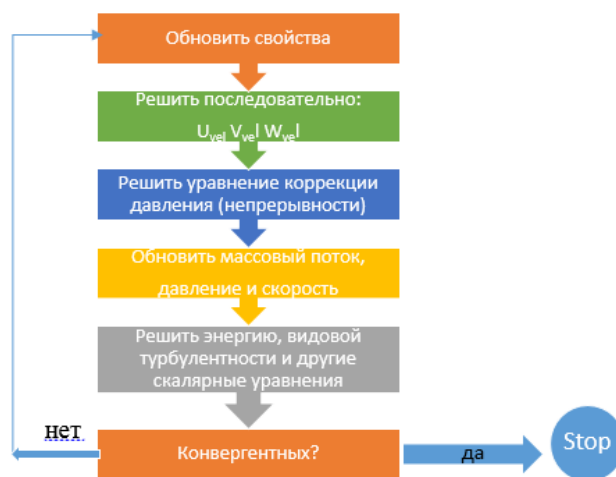
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho) + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad (3.12)$$

Жидкая фракция вычисляется во время каждой итерации в каждой ячейке в области вычисления на основе баланса энтальпии. Мягкая зона моделируется как «псевдо» пористая среда, в которой пористость уменьшается от 1 до 0 по мере застывания материала. Когда материал полностью затвердел в ячейке, пористость становится равной нулю, а скорость импульса падает до нуля.

Выбор Fluent Solver

Программное обеспечение Fluent имеет два основных решателя: решатель на основе давления и связанный решатель на основе плотности (DBCS). Проблема застывания и плавления ФТАМ может быть решена только с помощью решателя на основе давления. Fluent оснащен двумя алгоритмами решения проблемы давления; отдельный алгоритм и связанный алгоритм. (рисунок 3.2)

Сегрегированный алгоритм на основе давления



Алгоритм связи на основе давления



Рисунок 3.2 – Обзор методов решения на основе давления [26].

В решателе на основе давления используется алгоритм, относящийся к общему классу методов, называемых проекционным методом [38], в котором ограничение сохранения массы (непрерывности) поля скоростей достигается путем решения уравнения давления (или коррекции давления). Уравнение давления выводится из уравнений непрерывности и импульса таким образом, что поле скоростей, скорректированное давлением, удовлетворяет непрерывности. Управляющие уравнения являются нелинейными и связаны друг с другом; Таким образом, процесс решения включает в себя итерации, в которых весь набор управляющих уравнений решается неоднократно, пока решение не сходится.

Для конвекционных членов в Fluent доступны различные схемы дискретизации (методы интерполяции), в том числе схема «против потока» первого порядка, схема степенного закона, схема «против потока» второго порядка, схема центрального дифференцирования и схема интерполяции квадратичного «против потока». Схемы «против потока» первого порядка, степенного закона и «против потока» второго порядка в основном используются при решении задач застывания и плавления. Последние два метода более точны, чем первые. Кроме того, методом интерполяции граничного давления для уравнений импульса являются полу-явное уравнение, связанное с давлением (SIMPLE), SIMPLE-согласованное (SIMPLEC), неявное по давлению с расщеплением операторов (PISO) и дробный шаг метод (FSM).

Общее уравнение системы накопления тепла

Согласно первому закону термодинамики, (3.13),[5]

$$dQ_{ch} = dH - V \cdot dP \quad (3.13)$$

при постоянном давлении P в системе (3.14)

$$Q_{ch}' = dQ_{ch} / dt = dH / dt \quad (3.14)$$

где Q_{ch}' - тепловой поток, подаваемый в систему аккумуляции тепла;

H - энтальпия системы; t - продолжительность процесса

Мы пренебрегаем эффектами интерфазы и записи, используя принцип аддитивности (3.15):

$$H(t) = M_l(t) \cdot h_l(T_l(t)) + M_s(t) \cdot h_s(T_s(t)) \quad (3.15)$$

где M - масса, h - удельная энтальпия и T - температура, соответствующая фазе материала. С учетом (3.15) можно записать (3.14) в виде:

$$\begin{aligned} Q_{ch}' &= \frac{d(M_l(t) \cdot h_l(T_l(t)) + M_s(t) \cdot h_s(T_s(t)))}{dt} \\ &= h_l(T_l(t)) \cdot \frac{dM_l(t)}{dt} + M_l(t) \cdot \frac{dh_l(T_l(t))}{dt} + \\ &\quad h_s(T_s(t)) \cdot \frac{dM_s(t)}{dt} + M_s(t) \cdot \frac{dh_s(T_s(t))}{dt} \end{aligned}$$

Или

$$Q'_{ch} = h_L(T_L(t)) \cdot \frac{dM_l(t)}{dt} + M_l(t) \cdot \frac{dh_l(T_l(t))}{dT_l(t)} \cdot \frac{dT_l(t)}{dt} +$$

$$h_s(T_s(t)) \cdot \frac{dM_s(t)}{dt} + M_s(t) \cdot \frac{dh_s(T_s(t))}{dT_s(t)} \cdot \frac{dT_s(t)}{dt}$$

Предположим, что

$$C_l = \frac{dh_l(T_l(t))}{dT_l(t)}$$

$$C_s = \frac{dh_s(T_s(t))}{dT_s(t)}$$

Согласно предположению, что удельная теплоемкость постоянна (3.16):

$$Q'_{ch} = h_L(T_L(t)) \cdot \frac{dM_l(t)}{dt} + M_l(t) \cdot C_l \cdot \frac{dT_l(t)}{dt} +$$

$$h_s(T_s(t)) \cdot \frac{dM_s(t)}{dt} + M_s(t) \cdot C_s \cdot \frac{dT_s(t)}{dt} \quad (3.16)$$

При фиксированной температуре фазового перехода T_m и скрытой теплоте L (3.17):

$$h_l(T_l(t)) = h_s(T_m) + L + c_l \cdot (T_l(t) - T_m)$$

$$h_s(T_m) = h_s(v) + c_s \cdot (T_m - T_s)) \quad (3.17)$$

Поскольку общая масса ФТАМ в системе хранения тепла не изменилась, то

$$M_T = M_s(t) + M_l(t) = \text{constant},$$

$$\frac{dM_l(t)}{dt} = - \frac{dM_s(t)}{dt}$$

а тепловой поток Q'_{ch} , с учетом равенств (3.17)

$$Q'_{ch} = (h_s(T_m) + L + c_l \cdot (T_l(t) - T_m)) \cdot \frac{dM_l(t)}{dt} + M_l(t) \cdot C_l \cdot \frac{dT_l(t)}{dt} +$$

$$(h_s(T_m) - c_s \cdot (T_m - T_s(t))) \cdot \frac{dM_s(t)}{dt} + M_s(t) \cdot C_s \cdot \frac{dT_s(t)}{dt} \quad (3.18)$$

Выполнив преобразования, можно получить (3.19):

$$Q'_{ch} = (c_s \cdot (T_m - T_s(t)) + L + c_l \cdot (T_l(t) - T_m)) \cdot \frac{dM_l(t)}{dt} + M_l(t) \cdot C_l \cdot \frac{dT_l(t)}{dt} +$$

$$+(M_T - M_l(t)) \cdot C_s \cdot \frac{dT_s(t)}{dt} \quad (3.19)$$

Соотношение (3.19) справедливо для тепловой системы аккумулирования с накоплением энергии в твердом, жидком состоянии и при плавлении ФТАМ.

Уравнение, соответствующее процессу застывания аналогично приведенному выше уравнению для процесса плавления. Его окончательный вид

$$Q'_{dis} =$$

$$(c_s \cdot (T_m - T_s(t)) + L + c_l \cdot (T_l(t) - T_m)) \cdot \frac{dM_s(t)}{dt} - M_s(t) \cdot C_s \cdot \frac{dT_s(t)}{dt} + -(M_T - M_s(t)) \cdot C_l \cdot \frac{dT_l(t)}{dt} \quad (3.20)$$

Соотношение (3.20) справедливо для описания тепловых процессов в системе аккумулирования с выделением энергии из жидкости при застывании ФТАМ. На практике

используются определенные части уравнений (3.19) и (3.20), описывающих конкретный процесс.

Проверка модели CFD

CFD-моделирование с использованием FLUENT ANSYS было проведено для экспериментального случая, описанного Rathod и Banerjee [99], и численные результаты, полученные в этом исследовании, были сопоставлены с его опубликованными экспериментальными результатами для целей проверки модели CFD. Проведено сравнение экспериментальных и численных результатов по распределениям температуры и среднему объему жидкой фракции ФТАМ[23].

Экспериментальные исследования по Rathod and Banerjee

Rathod and Banerjee экспериментально исследовали переходное плавление ФТАМ в кожухотрубном теплоаккумуляторе. Кроме того, была проведена серия экспериментов по изучению влияния различных расходов и температур теплоносителя на процесс теплопередачи. Также в работе рассмотрен вопрос выбора геометрических параметров кожухотрубного теплоаккумулятора. С целью изучения длительности процессов плавления и застывания для солнечных применений, тепловой аккумулятор был спроектирован таким образом, что плавление ФТАМ происходит в течение 6-7 часов нормальной солнечной радиации, доступной в течение дня. Trp et. al. [129] был также разработан и спроектирован теплоаккумулятор для аналогичного приложения. Таким образом, выбор формы и размеров теплового аккумулятора, используемого в настоящей работе, основан на накопителе, используемом в [129].

Физическая модель

На рисунке 3.3 показана принципиальная схема оболочки и трубы, состоящей из двух концентрических труб длиной 1 м. Внутренний и наружный диаметр трубы теплоносителя составляет 0,033 м и 0,035 м соответственно. Внутренний диаметр корпуса составляет 0,128 м, а высота системы- 1 м. Корпус аккумулятора заполнен парафином, тогда как теплоноситель проходит по внутренней трубе. Свойства теплоносителя и парафина приведены в таблице 3.1. Внешняя поверхность системы хорошо изолирована. Вода используется как теплоноситель. Во время процесса зарядки горячая вода циркулирует по внутренней трубе. Холодная вода циркулирует по трубе и воспринимает отдаваемое теплоаккумулятором тепло во время разрядки.

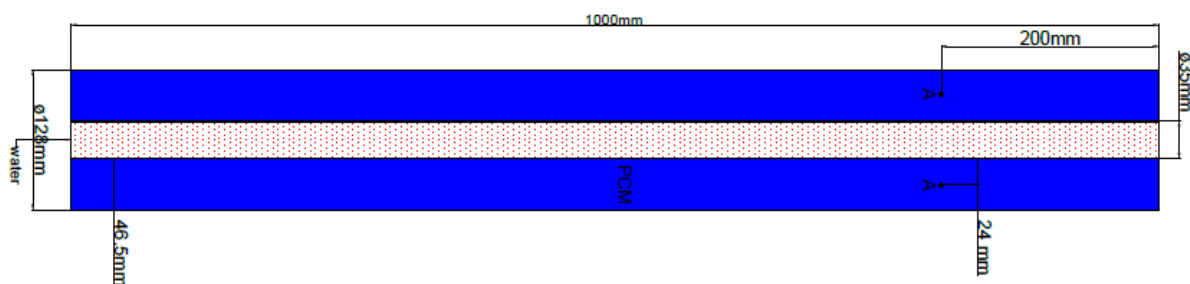


Рисунок 3.3 – Принципиальная схема корпуса и трубы

Таблица 3.1 – Свойства ФТАМ и теплоносителя

свойства	величина
Плотность жидкости, ρ_l	778 кг / м ³
Твердая плотность, ρ_s	861 кг / м ³
Теплопроводность, k	0,15 Вт / м.к
Удельная теплоемкость, C_p	2500 Дж / кг
Скрытая теплота, L	213 Дж / кг
Коэффициент теплового расширения, β	0,000091 1 / К
Температура плавления, T_m	331-333 К
Начальная температура твердого тела ФТАМ	303 К
Начальная температура жидкости ФТАМ	353 К
Температура зарядки (теплоноситель)	358 К
Температура разряда	301 К
Массовый расход, (теплоноситель)	0,0833 кг/с, 5 л/мин

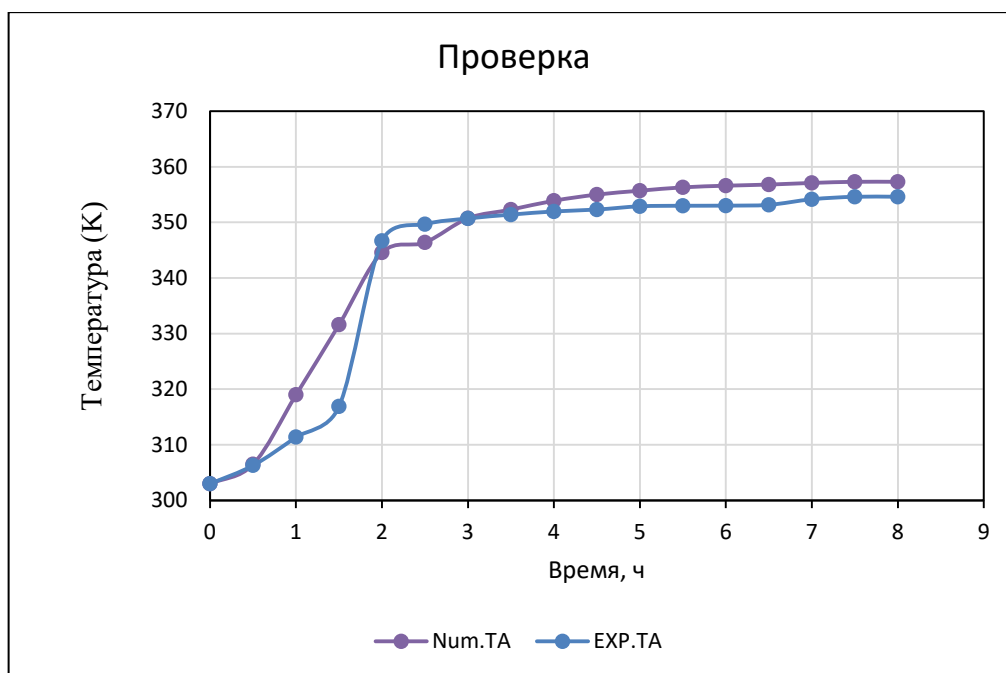


Рисунок 3.4 – Проверка экспериментальных и численных результатов измерения температуры по времени в верхней части блока ФТАМ[24].

Для моделирования области фазового перехода был использован метод на основе энтальпии [39, 135] благодаря его преимуществам: (i) управляющие уравнения аналогичны

однофазному уравнению; (ii) не требуется никаких явных условий на границе раздела твердое тело-жидкость; (iii) энтальпийная формулировка включает решение в мягкой зоне, включающей как твердые, так и жидкие материалы, между двумя стандартными фазами; и (iv) задача изменения фазы может быть решена более легко [16].

Кроме того, были сделаны следующие предположения:

- Термофизические свойства ФТАМ и теплоносителя не изменяются при постоянной температуре;
- ФТАМ однороден и изотропен;
- Теплопроводность осесимметрична внутри трубы с теплоносителем;
- Движение жидкого ФТАМ ламинарно, нестационарно и несжимаемо.

Численная модель

Коэффициент локальной конвекции теплопередачи для рабочего тела может изменяться вдоль трубы. В энтальпийном методе управляющее уравнение одинаково как для твердой, так и для жидкой фаз, и положение границы раздела твердое-жидкость явно не отслеживается. Граница раздела обозначена мягкой зоной, разделяющей две фазы [17]. Уравнения для непрерывности, энергии и импульса используются так же, как и в предыдущей части.

Вычислительное исследование выполняется с использованием приложения Fluent программного обеспечения ANSYS. Модели застывания и плавления решаются для ламинарного потока с помощью уравнений Навье-Стокса с использованием метода энтальпии-пористости. Двумерный осесимметричный вертикальный срез цилиндра моделируется для сокращения времени вычислений. После предыдущих численных исследований с использованием Fluent [17, 40, 121], для уравнения коррекции давления использовалась имитация переходного процесса с использованием схемы с изменением давления (PRESTO), а для соединения скорости среды со скоростью давления использовался алгоритм Coupled. Для решения уравнений импульса и энергии использовалась схема «против потока» второго порядка. Численные результаты подтверждаются сравнением с экспериментальными результатами Rathod и Banerjee [99], как показано на рисунке 3.4. Это сравнение показывает, что численные результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Границы / Начальные условия

В обеих моделях граничные условия определяются тем, что внешние поверхности, а также верхняя и нижняя крышки контейнера хорошо изолированы, т.е. теплопередача во внешнюю среду отсутствует. Первоначальное состояние ФТАМ – твердое с температурой 303 К в начале плавления. ФТАМ в жидком состоянии имеет температуру 353 К в начале процесса

застывания. Расход теплоносителя во внутренней трубе составляет 5 л / мин. Температура теплоносителя на входе составляет 358 К.

Результаты и обсуждения(Процесс зарядки)

Для обеспечения решения с независимостью от сетки и времени моделировались три различных размера сетки (1000, 2000 и 4000) и три размера шага по времени: 0,05 с, 0,1 с и 0,2 с, как показано на рисунке 3.5 и рисунке 3.6. Можно видеть, что модель с 2000 ячейками и временными шагами 0,05 с, 0,1 с и 0,2 с производит аналогичное изменение температуры. Увеличение количества элементов до 4000 не приводит к значительным изменениям. Кроме того, предельная сетка 2000 ячеек и шаг по времени 0,1 с достаточны для достижения заранее определенного порога сходимости (10^{-6}) для уравнения энергии.

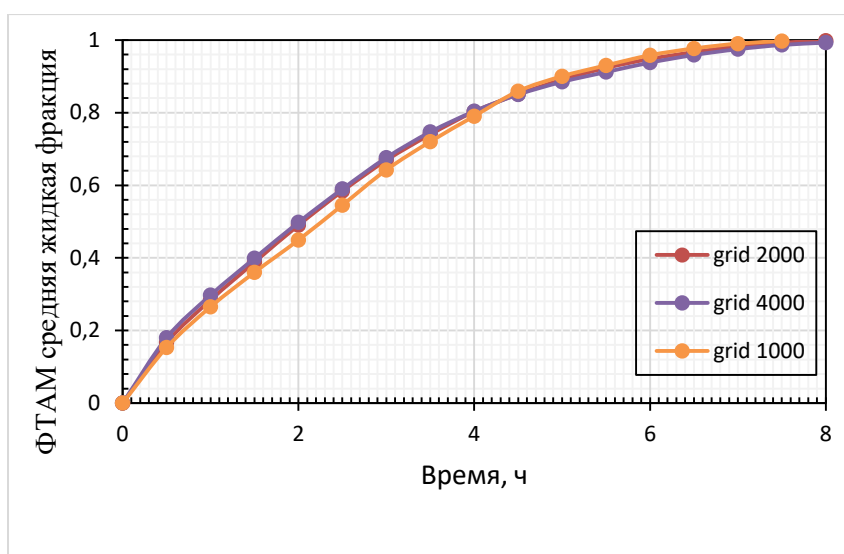


Рисунок 3.5- Независимость размера сетки

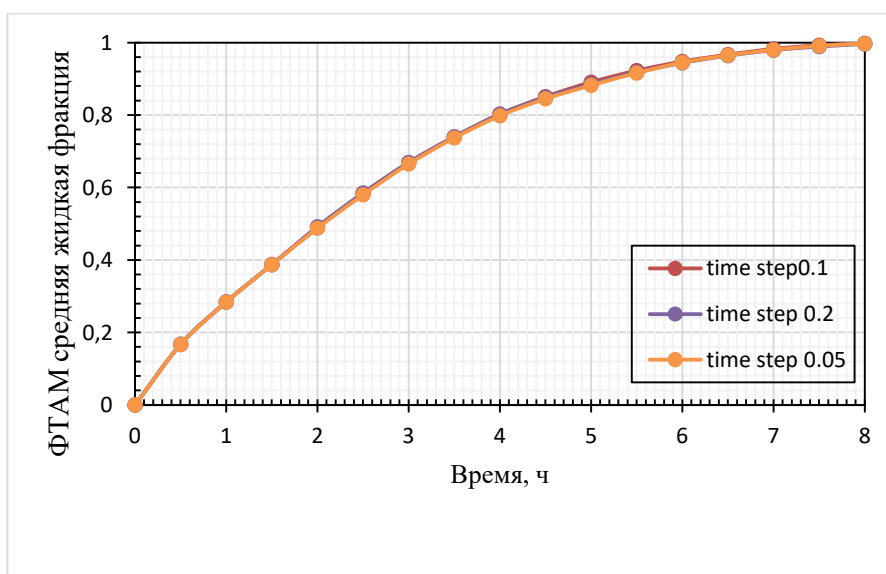


Рисунок 3.6 – Независимость от времени

На рисунке 3.7б показаны контуры температуры в ФТАМ с использованием комбинированной модели проводимости и конвекции во время процесса зарядки. Температура ФТАМ существенно изменяется в осевом направлении в разное время зарядки. В комбинированной модели теплопередача от стенки внутренней трубы к ФТАМ первоначально осуществляется посредством проводимости, прежде чем ФТАМ начнет плавиться. Когда ФТАМ плавится, между внутренней стенкой трубы и твердофазным материалом образуется тонкий слой жидкости, и начинается естественная конвекция. По мере того, как расплавленная зона становится больше, конвекция становится сильнее, и фронт поверхности раздела движется быстрее.

Теплопередача в цилиндре основана на двух механизмах: (1) в жидком ФТАМ, пространстве между жидким ФТАМ и поверхностью внутренней трубы и пространстве между жидким ФТАМ и твердым ФТАМ, передача тепла главным образом осуществляется конвекцией и (2) в твердом ФТАМ теплообмен осуществляется за счет теплопроводности. Из-за плавучести жидкий ФТАМ поднимается вверх и постепенно заполняет верхнюю часть системы. Фронт плавления движется в осевом направлении от вершины к нижней части цилиндра, как показано на рисунке 3.7а. Следовательно, фронт плавления не имеет цилиндрической формы и визуализируется как коническая форма. Верхняя часть ФТАМ в цилиндре плавится намного быстрее, чем нижняя. Этот вывод согласуется с тем, что наблюдалось во время экспериментов.

Можно видеть, что разница температур очень мала в начале процесса зарядки до того момента, как температура ФТАМ достигнет точки плавления. Это подтверждает, что проводимость доминирует над теплопередачей в течение этого начального периода зарядки. Как только температура ФТАМ достигает точки плавления, комбинированная модель проводимости-конвекции все еще может точно предсказать температуру ФТАМ. В основном, это вызвано естественной конвекцией. Как только ФТАМ начинает плавиться, тонкий слой жидкого ФТАМ начинает формироваться вдоль стены с теплоносителем. В теплопередаче преобладает естественная конвекция, которая ускоряет плавление ФТАМ. Жидкий ФТАМ поднимается вверх и естественная конвекция проявляется сильнее в верхней части, чем в нижней. Поэтому температуры ФТАМ в верхней части выше, чем в нижней части (Рисунок 3.4б).

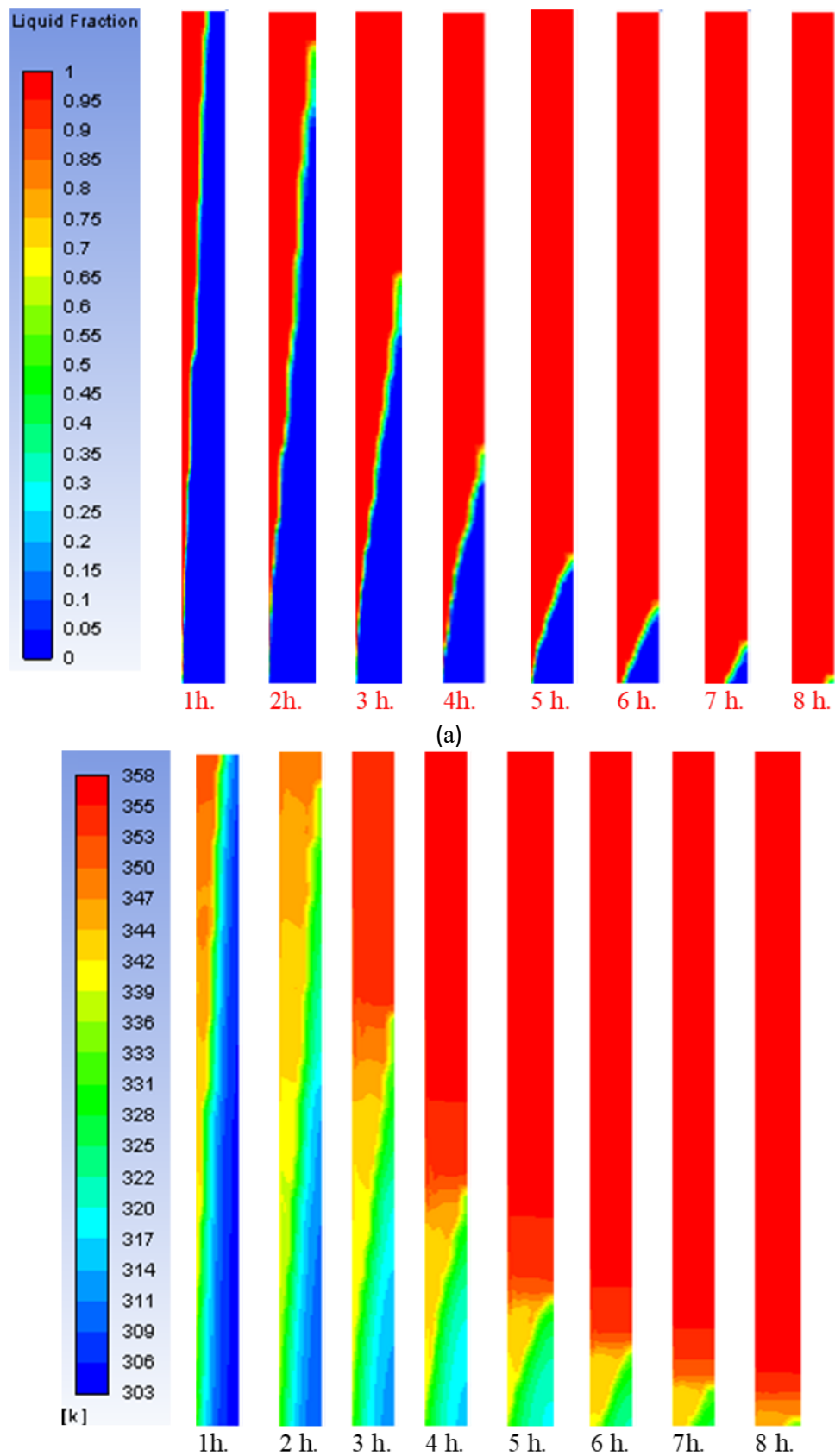


Рисунок 3.7 – Контуры (а) жидкой фракции (б) температуры ФТАМ в процессе загрузки.

Экспериментальные результаты показывают, что время достижения всеми ФТАМ 358 К составляет 8 часов. Это время почти совпадает с моделируемым полным временем зарядки с использованием комбинированной модели проводимости-конвекции. Приведенные выше результаты сравнения показывают, что процесс зарядки в основном осуществляется естественной конвекцией и что проводимость почти становится незначительной.

Таким образом, комбинированная модель проводимости-конвекции может лучше описать теплообмен в ФТАМ. Тепло передается твердым ФТАМ в начале процесса теплопроводностью, а затем за счет естественной конвекции в расплавленном ФТАМ. Поскольку явное тепло намного меньше скрытого тепла, проводимость менее значительна, а естественная конвекция является основным механизмом передачи тепла во время процесса зарядки.

3.2 Исследование поведения ФТАМ в вертикальном кожухотрубном теплоаккумуляторе с поперечными кольцевыми ребрами

Физическая модель

На рисунке 3.8 приведена принципиальная схема вертикальной оболочки и трубки с кольцевыми ребрами. Он состоит из двух концентрических трубок длиной 1 м. Внутренний и внешний диаметр внутренней трубы составляет 0,033 м и 0,035 м соответственно. Внутренний диаметр оболочки составляет 0,128 м, а высота системы - 1 м. Кольцевые медные ребра находятся на наружной поверхности внутренней трубы толщиной t и высотой h равномерно распределены (интервал d). Парафин используется в качестве материала с фазовым переходом для хранения тепловой энергии и полностью заполняется в кольцевом пространстве. Свойства теплоносителя и парафина показаны в таблице 3.1. Наружная поверхность системы хорошо изолирована. Вода используется в качестве теплоносителя и протекает через внутреннюю трубу. Во время процесса зарядки горячая вода циркулирует по внутренней трубе. Холодная вода циркулирует через внутреннюю трубу в процессе разрядки.

Начальные и граничные условия

Материал с фазовым переходом (ФТАМ), теплоноситель и теплопередающая труба первоначально устанавливаются на температуру 303К в начале процесса плавления и устанавливаются на температуру 353К в начале процесса застывания. Расход теплоносителя во внутренней трубе составляет 5 л/мин при температуре 358 К для зарядки и 301 К для разрядки. Граничные условия определяются тем, что внешние поверхности, а также верхняя и нижняя крышки контейнера хорошо изолированы, т.е. теплопередача во внешнюю среду отсутствует.

Теплопередача при плавлении описывается уравнением энергии, и для упрощения пренебрегается расширением объема вследствие плавления парафина. Член вязкой диссипации был проигнорирован.

Численная процедура

Программное обеспечение ANSYS-Fluent использовалось для решения основных уравнений, описывающих переходную задачу теплообмена с движущейся границей. Модели застывания и плавления решаются с использованием метода энтальпии-пористости. Двумерный осесимметричный вертикальный срез цилиндра моделируется для сокращения времени вычислений. Изменение объема ФТАМ при изменении фазы было проигнорировано. Моделирование переходного процесса с использованием схемы с изменением давления (PRESTO) используется для пространственной дискретизации давления, позволяя давать более точные результаты, так как допущенные ошибки интерполяции и нулевой градиент давления (стандартная дискретизация) на границах отсутствуют. Связанный алгоритм был использован для связи скоростей давления. Для решения уравнений импульса и энергии использовалась схема «против потока» второго порядка. Точность решения переходной задачи в значительной степени зависит от качества сетки и временного шага. Чтобы учесть это, и сетка, и чувствительность к временным шагам проверяются тремя наборами сеток с элементами 22648, 30176 и 36177 и временными шагами с 0,05 с, 0,1 с и 0,2 с, как показано на рисунках 3.9 и 3.10. Блок накопления скрытой тепловой энергии в трубчатой оболочке имеет шесть ребер ($N = 6$). Граничные и начальные условия: $T_{in} = 358$ К, массовый расход на входе = 5 л / мин, $T_i = 303$ К. Сравнивая численные результаты с различными сетками и временными шагами, можно увидеть, что сетка с общим элементом 30176 и временным шагом 0,1 с достаточно хороша для получения высокой точности. Увеличение количества элементов до 36177 не приводит к значительным изменениям.

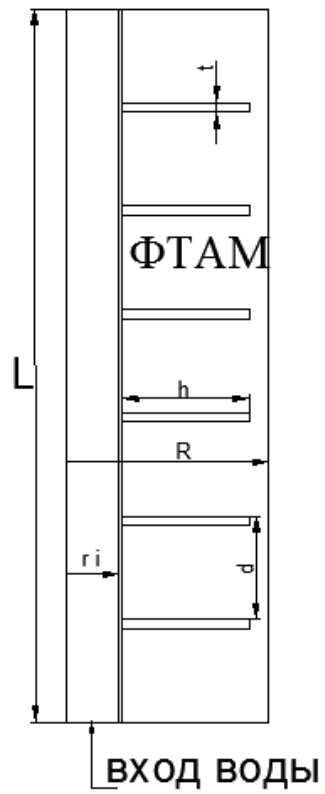


Рисунок 3.8 – Принципиальная схема вертикальной оболочки и трубы с кольцевыми ребрами

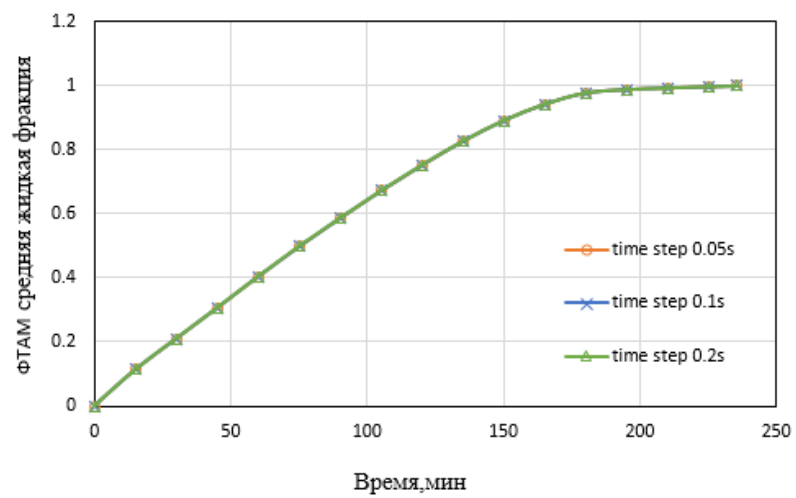


Рисунок 3.9 – Независимость от времени

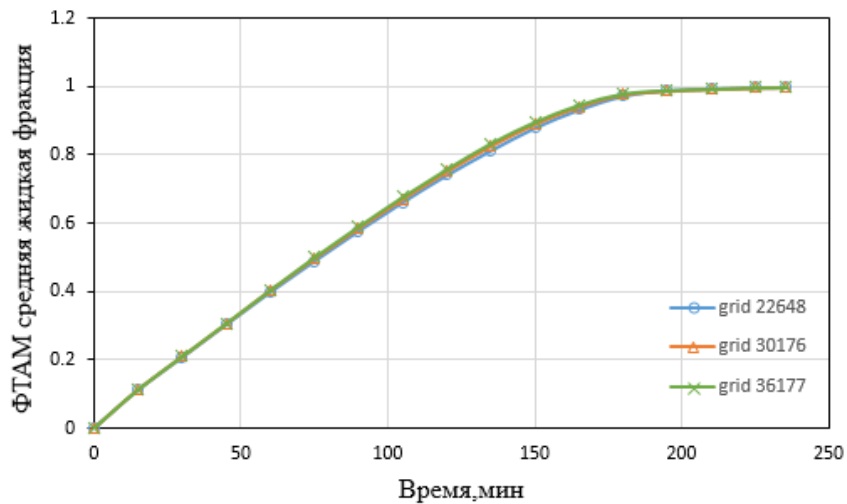


Рисунок 3.10 – Независимость размера сетки

Результаты и обсуждение (Процесс зарядки)

На рисунках 3.11 и 3.12 показаны контуры жидкой фракции и температура парафина в блоке накопления тепловой энергии с внутренней трубой с 6 кольцевыми ребрами в процессе зарядки. В начале нагрева материала небольшая часть расплавленного парафина образуется вблизи стенки и ребер за счет теплопередачи благодаря проводимости твердого ФТАМ, где энергия поглощается в форме теплоемкости. Следовательно, можно наблюдать, что средняя жидкая фракция составляла около 21% через 30 минут. Твердый парафин, прилегающий к ребру, в первую очередь локально плавится с более высокой скоростью плавления, чем вдали от ребер. По прошествии времени во время фазового перехода образуется больше жидкой пленки расплавленного парафина, прилегающей к поверхности ребра, что обеспечивает пространство для локальной естественной конвекции, а затем происходит теплопередача за счет естественной конвекции, вызванной плавучестью, в расплавленном материале фазового перехода в результате разницы температур. Можно наблюдать, что расплавленный парафин в задней части ребра имеет более высокую скорость плавления, чем в верхней части. Это связано с тем, что более высокотемпературная жидкость течет вверх и приводит к локальному усилению передачи тепла плавления. Средняя жидкая фракция быстро увеличивается со временем в первые 150 минут процесса плавления, в котором средняя жидкая фракция достигает примерно 89,1%. Это связано с тем, что материал с фазовым переходом достигает высоких температур и преобладает эффект естественной конвекции. Затем скорость увеличения жидкой фракции снижается. Это связано с уменьшением разности температур между теплоносителем и материалом фазового переходника и, следовательно, скорость теплопередачи становится медленной. Происходит утолщение расплавленной фазы, что увеличивает термическое сопротивление между

поверхностью теплопередачи и границей раздела твердой и жидкой фаз. Для полного расплавления парафина требуется около 225 минут (3,75 часа). Время плавления уменьшается на 53,125% по отношению к оболочке и трубе без ребер.

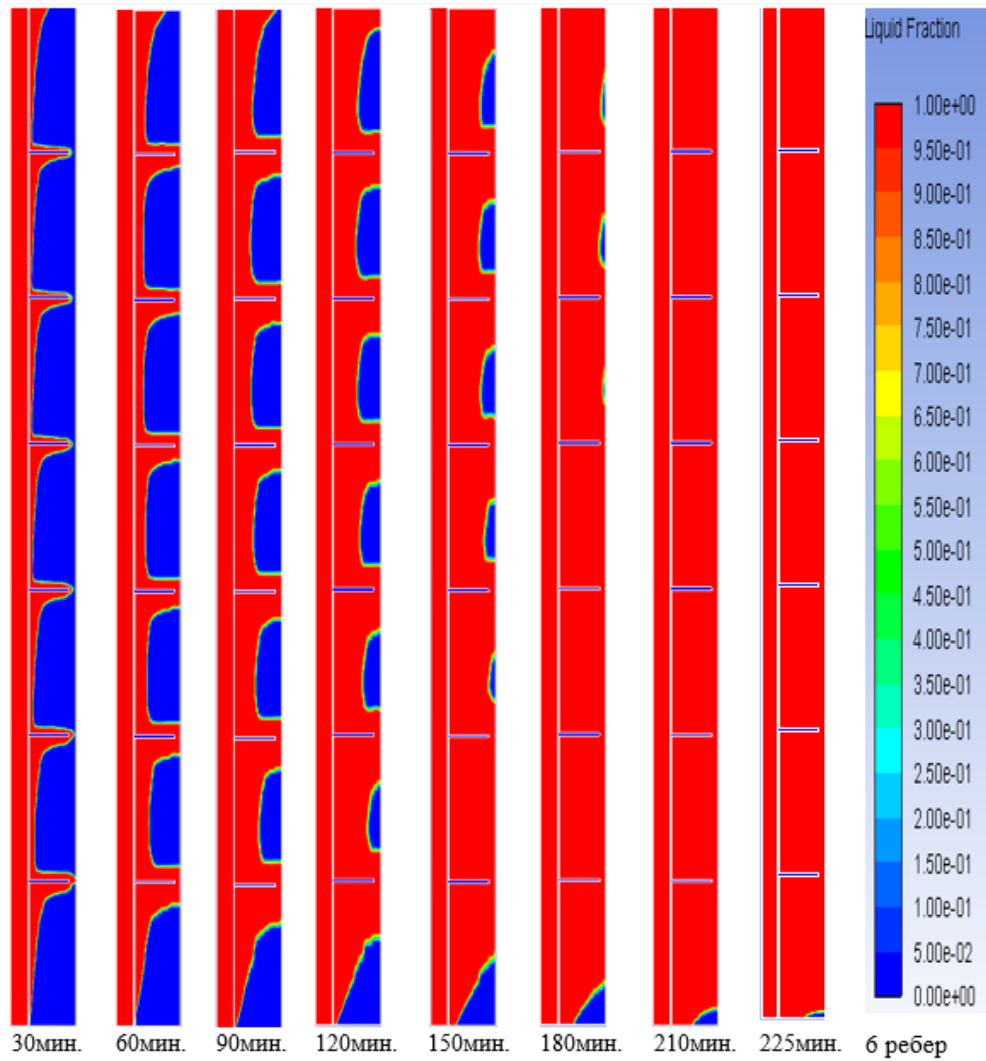


Рисунок 3.11 – Контур фракций при плавлении ($N = 6$)

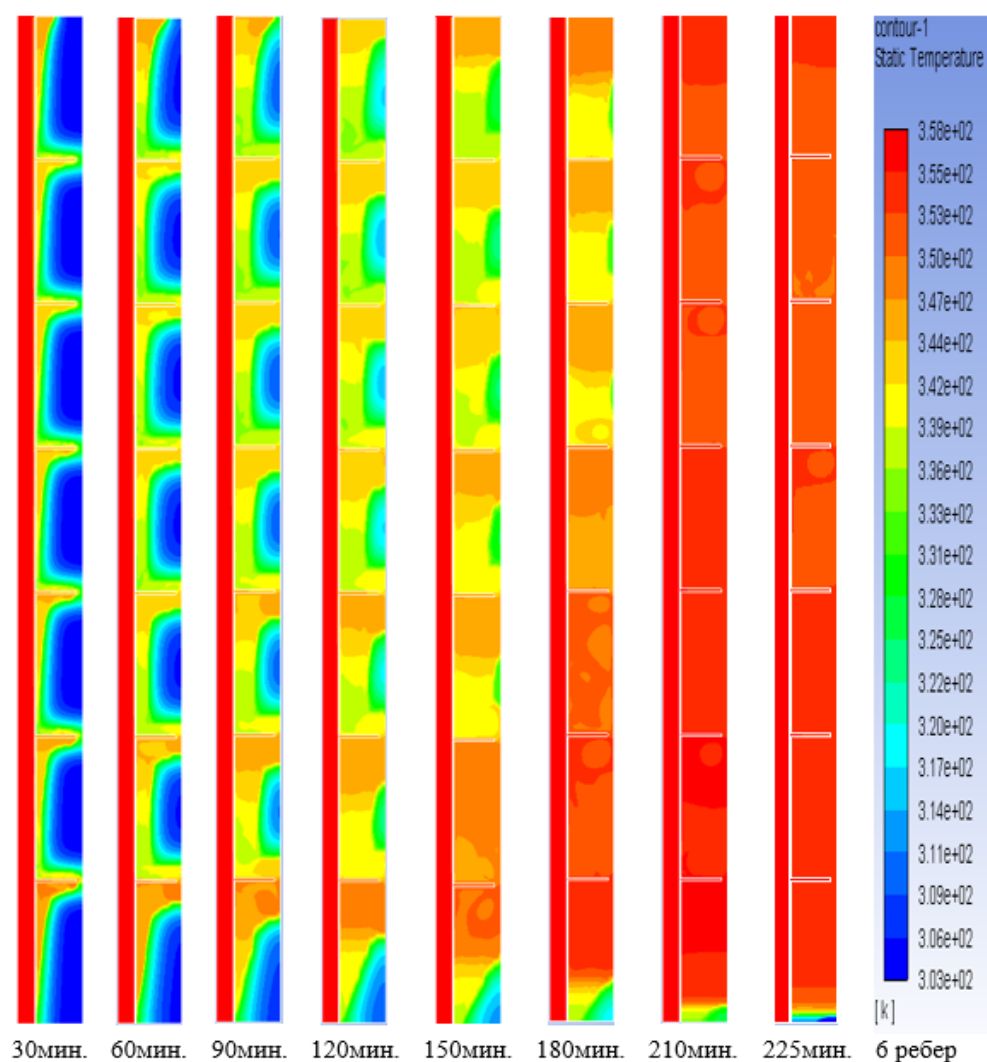


Рисунок 3.12 – Контур температуры (N = 6)

На рисунке В.1 и рисунке В.2 (Приложении В) показаны контуры жидкой фракции и температуры парафина для блока накопления тепловой энергии с 9 кольцевыми ребрами в процессе зарядки. Можно наблюдать, что средняя доля жидкости составляла около 22,4% через 30 минут. Твердый парафин, прилегающий к ребру, в первую очередь локально плавится с более высокой скоростью плавления, чем вдали от ребер.

По прошествии времени во время фазового перехода образуется больше жидкой пленки расплавленного парафина, прилегающей к поверхности ребра, что обеспечивает пространство для локальной естественной конвекции, а затем происходит теплопередача за счет естественной конвекции, вызванной плавучестью расплавленного ФТАМ и перепадов температуры. Можно наблюдать, что расплавленный парафин в задней части ребра имеет более высокую скорость плавления, чем в верхней части. Это связано с тем, что более высокотемпературная жидкость течет вниз вверх дном и приводит к локальному усилению передачи тепла плавления. Скорость

увеличения жидкой фракции с 9 плавниками больше, чем у 6 плавников. Средняя жидкая фракция быстро увеличивается со временем в течение первых 150 минут процесса плавления, в котором средняя жидкая фракция достигает примерно 93,1%. Это связано с тем, что ФТАМ достигает высоких температур и эффект естественной конвекции преобладает. Затем скорость увеличения жидкой фракции снижается. Это связано с уменьшением разности температур между теплоносителем и ФТАМ и, следовательно, скорость теплопередачи становится медленной. Время полного плавления ФТАМ занимает около 180 минут (3 часа). Время плавления уменьшается на 62,5% относительно оболочки и трубы без ребер.

На рисунке В.3 и рисунке В.4 (Приложение В) показаны контуры жидкой фракции и температура парафина для блока накопления тепловой энергии со скрытой теплотворной трубкой с 18 кольцевыми ребрами в процессе зарядки. Можно наблюдать, что средняя жидкая фракция составляла около 24,7% через 30 минут.

Скорость увеличения жидкой фракции с 18 ребрами больше, чем у 9 ребер. Средняя жидкая фракция быстро увеличивается со временем в течение первых 120 минут процесса плавления, в котором средняя жидкая фракция достигает примерно 89,2%. Это связано с тем, что ФТАМ достигает высоких температур и эффект естественной конвекции преобладает. Время полного плавления парафина в системе с 18 ребрами занимает около 165 минут (2,75 часа). Время плавления уменьшается на 65,625% по отношению к оболочке и трубе без ребер.

На рисунке В.5 и рисунке В.6 (Приложение В) показаны контуры жидкой фракции и температуры парафина для блока накопления тепловой энергии с 24 кольцевыми ребрами. Можно наблюдать, что средняя жидкая фракция составляла около 25,1% через 30 минут. Твердый парафин, прилегающий к ребру, в первую очередь локально плавится с более высокой скоростью плавления, чем вдали от ребер.

Скорость увеличения жидкой фракции с 24 ребрами больше, чем с 18 ребрами. Средняя жидкая фракция быстро увеличивается со временем в первые 90 минут процесса плавления, при этом средняя жидкая фракция достигает около 76,3%. Это связано с тем, что ФТАМ достигает высоких температур и эффект естественной конвекции преобладает. Затем скорость увеличения жидкой фракции снижается. Это связано с уменьшением разности температур между теплоносителем и ФТАМ и, следовательно, скорость теплопередачи становится медленной. Время полного плавления парафина в системе с 24 ребрами занимает около 150 минут (2,5 часа). Время плавления уменьшается на 68,75% по отношению к оболочке и трубе без ребер.

На рисунке В.7 и рисунке В.8 (Приложение В) показаны контуры жидкой фракции и распределение температур парафина для системы с 30 кольцевыми ребрами. Можно наблюдать, что средняя жидкая фракция составляла около 25,2% через 30 минут. Твердый парафин, прилегающий к ребру, в первую очередь локально плавится с более высокой скоростью плавления, чем вдали от ребер.

По прошествии времени во время фазового перехода образуется больше жидкой пленки расплавленного парафина, прилегающей к поверхности ребер, что обеспечивает пространство для локальной естественной конвекции, а затем происходит теплопередача за счет естественной конвекции, вызванной плавучестью в расплавленном ФТАМ и перепадом температур. Можно наблюдать, что расплавленный парафин в задней части ребра имеет более высокую скорость плавления, чем в верхней части. Это связано с тем, что более высокотемпературная жидкость течет вверх и приводит к локальному усилению передачи тепла плавления. Скорость увеличения жидкой фракции с 30 ребрами больше, чем у 24 ребер. Средняя жидкая фракция быстро увеличивается со временем в течение первых 90 минут процесса плавления, в котором средняя жидкая фракция достигает примерно 80,6%. Это связано с тем, что ФТАМ достигает высоких температур и эффект естественной конвекции преобладает. Затем скорость увеличения жидкой фракции снижается. Это связано с уменьшением разности температур между теплоносителем и ФТАМ и, следовательно, скорость теплопередачи становится медленной. Время полного плавления парафина занимает около 135 минут (2,25 часа). Время плавления меньше на 71,875% по сравнению с системой без ребер.

На рисунке В.9 и рисунке В.10 (Приложение В) показаны контуры жидкой фракции и температуры парафина для системы с 36 кольцевыми ребрами. Средняя жидкая фракция составляла около 25,8% от всего объема через 30 минут.

Скорость увеличения жидкой фракции с 36 ребрами почти равна скорости плавления парафина с 30 ребрами. Как и в случае с 30 ребрами, время плавления парафина занимает около 135 минут (2,25 часа), а время плавления уменьшается на 71,875% по отношению к системе без ребер.

На рисунке В.11 и рисунке В.12 (Приложение В) показаны контуры жидкой фракции и распределение температур парафина внутри контейнера для системы с 45 кольцевыми ребрами. Анализ процессов плавления в этом случае показал, что динамика плавления при увеличении числа ребер практически не меняется. Средняя жидкая фракция составила около 26,1% через 30 минут плавления. Как и в предыдущих случаях (для 30 и 36 ребер) время полного плавления парафина практически не изменилось и составило 135 минут (2, 25 часа).

Кроме того, полное время плавления так же меньше на 71,875% по сравнению с системой без ребер, как и для предыдущих случаев.

Оптимизация параметров ребер

Предыдущие исследования показали, что, добавляя ребра, можно повысить эффективность процессов плавления и застывания материала. Кроме увеличения количества ребер, важным вопросом является оптимизация конструктивных размеров самих ребер, т.е. высота, толщина и шаг ребер.

Оптимизация конструкции параметров ребра для повышения теплопередачи осуществляется следующим образом. В кольцевом пространстве несколько ребер распределены одинаково с одинаковым интервалом. В соответствии с принятой физической моделью соотношение общего объема между ребром и межреберным пространством, заполненным ФТАМ, установлено на уровне 1,42 процента, а высота ребра равна 40 мм. Ввиду этого в качестве переменной оптимизации выбрано число ребер, поскольку число ребер, толщина и интервал являются зависимыми параметрами. В таблице 3.2 представлены расчетные параметры кольцевых ребер для заданного соотношения объема ребер (1,42%) и высоты ребер (40 мм). При увеличении количества ребер (6–45) интервал между ребрами уменьшается с 143,28 мм до 21,74 мм, а толщина ребер уменьшается с 3 до 0,4 мм. Параметры ребер h , t , d и L – приведены на рисунке 3.8.

Таблица 3.2 – Расчетные параметры кольцевых ребер для заданного соотношения объема ребер (1,42%) и высоты ребер (40 мм).

Число ребер (N)	$h(\text{mm})$	$t(\text{mm})$	t/h	t/d	$d(\text{mm})$	d/L	Объем ребра / общий объем кольцевого пространства $\text{Об}_{\text{ребра}} / \text{Об}_{\text{об}}$	Время плавления (мин)
6	40	3	0.075	0.02093	143.28	0.1433	1.42%	225
9	40	2	0.05	0.01996	100.2	0.1002	1.42%	180
18	40	1	0.025	0.01898	52.684	0.05268	1.42%	165
24	40	0.75	0.01875	0.01873	40.03	0.04003	1.42%	150
30	40	0.6	0.015	0.01858	32.277	0.03227	1.42%	135
36	40	0.5	0.0125	0.01849	27.04	0.02704	1.42%	135
45	40	0.4	0.01	0.01839	21.74	0.0217	1.42%	135

На рисунке 3.13 показано влияние числа ребер на фронтальное плавление в разное время плавления. Был проведен ряд численных расчетов для проверки влияния параметров ребер (числа ребер, толщины и интервала) на теплопередачу при плавлении в накопителе тепловой энергии со скрытой теплотой. Можно наблюдать, что средняя доля жидкости увеличивается

монотонно со временем, и скорость увеличения доли жидкости сначала становится крутой и постепенно становится медленной, что указывает на медленную скорость распространения границы плавления. Это связано, главным образом, с утолщением фазы расплава, которая увеличивает термическое сопротивление между поверхностью теплопередачи и границей раздела твердой и жидкой фаз. В дополнение к уменьшению разности температур между теплоносителем и материалом с фазовым переходом, скорость теплопередачи тоже уменьшается. Через 30 минут средняя доля жидкости слегка увеличивается с увеличением числа ребер. Средняя жидкая фракция увеличивается, достигая почти полного плавления за время 135 минут и число ребер 30.

На рисунке 3.14 показано влияние числа ребер на полное время плавления. Можно наблюдать, что время полного плавления постепенно уменьшалось с увеличением числа ребер, пока оно не достигло минимального времени полного плавления, а затем почти стало постоянным, что указывает на оптимальное число ребер в отношении минимального времени полного плавления. С увеличением числа ребер, с одной стороны, увеличивается теплопроводность, что способствует распространению фронта плавления; с другой стороны, пространство между ребрами (промежуток между ребрами) становится меньше, что ограничивает начало и развитие локальной естественной конвекции. Кроме того, поскольку общий объем ребер фиксирован, увеличение числа ребер приводит к уменьшению толщины ребер. Следовательно, усиление теплопередачи ослабляется излишними ребрами. С этой точки зрения, прогнозируется оптимальная группа параметров ребра, включающая число ребер, толщину, интервал и соотношение сторон. Анализируя численные результаты, можно определить оптимальную группу параметров ребер: число ребер $N = 30$, отношение $t / d = 0,01858$, интервал $d / L = 0,03227$ и соотношение сторон $t / h = 0,015$, что будет использоваться в данном исследовании для дальнейших расчетов системы аккумуляции.

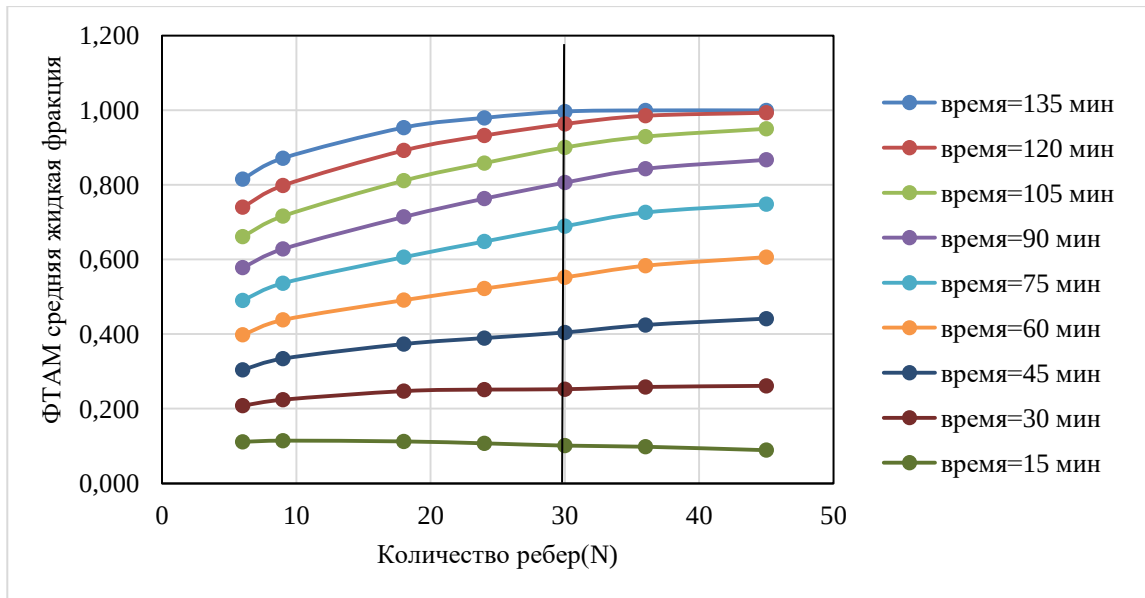


Рисунок 3.13 – Влияние числа ребер на фронтальное плавление.

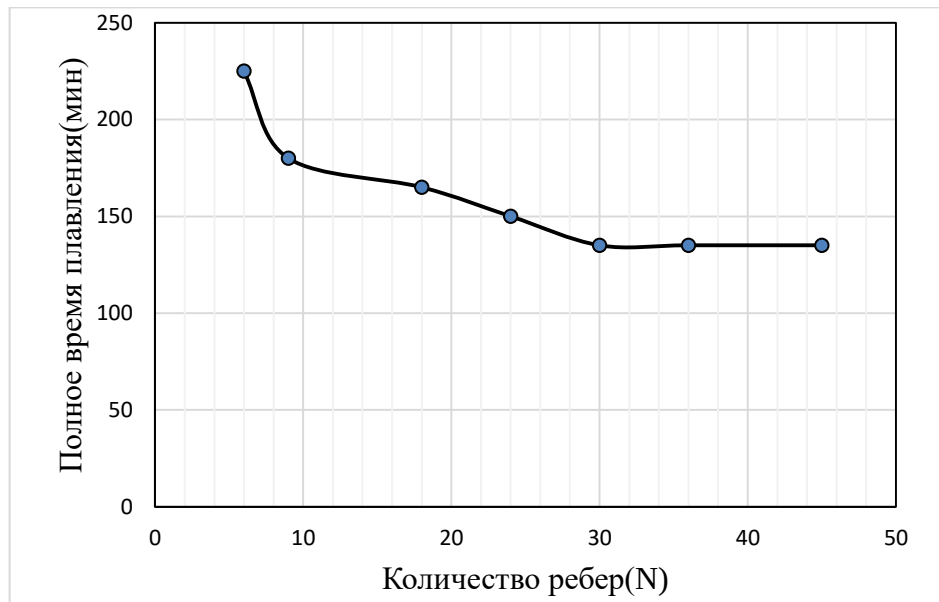


Рисунок 3.14 – Влияние числа ребер на полное время плавления.

3.3 Исследование влияния эксплуатационных факторов на поведение теплоаккумулирующего материала.

Влияние изменения температуры на входе

Исследование поведения теплоаккумулирующего материала показало, что теплофизические процессы в материале существенно зависят от эксплуатационных факторов – температуры теплоносителя на входе, расхода теплоносителя, направления потока теплоносителя и др.

Для исследования влияния входной температуры теплоносителя на процессы плавления-застывания ФТАМ использована система с тридцатью ребрами. Температура на входе теплоносителя изменяется от 343К до 358К. Начальными условиями являются массовый расход теплоносителя на входе 5 л/мин и начальная температура ФТАМ 303К.

На рисунке В.13 и рисунке В.14 (Приложение В) показано влияние изменения температуры на входе теплоносителя на жидкую фракцию парафина для кожухотрубного скрытого накопителя тепловой энергии с 30 кольцевыми ребрами в процессе зарядки. Можно наблюдать, что при увеличении температуры на входе теплоносителя с 343 К до 348 К средняя фракция жидкости увеличивается на 119% и на 334% при увеличении температуры на входе теплоносителя с 343 К до 358 К в течение 30 минут. Это связано с тем, что увеличение разности температур между стенками ребер и парафином приводит к локальному усилению теплопередачи. Затем скорость появления жидкой фракции уменьшается. Это происходит из-за уменьшения разности температур между теплоносителем и ФТАМ, и, следовательно, скорость теплопередачи уменьшается. Через 120 мин процесса плавления средняя жидкая фракция при повышении температуры на входе теплоносителя увеличилась на 42,1 % (с 343 К до 348 К) и 94% (с 343 К до 358 К) соответственно.

Влияние изменения температуры на входе на среднюю жидкую фракцию ФТАМ в процессе зарядки показано на рисунках 3.15 и 3.16. Из графиков видно, что общее время плавления при повышении температуры на входе теплоносителя уменьшается примерно на 28,6 % (с 343 К до 348 К) и 57% (с 343 К до 358 К) соответственно.

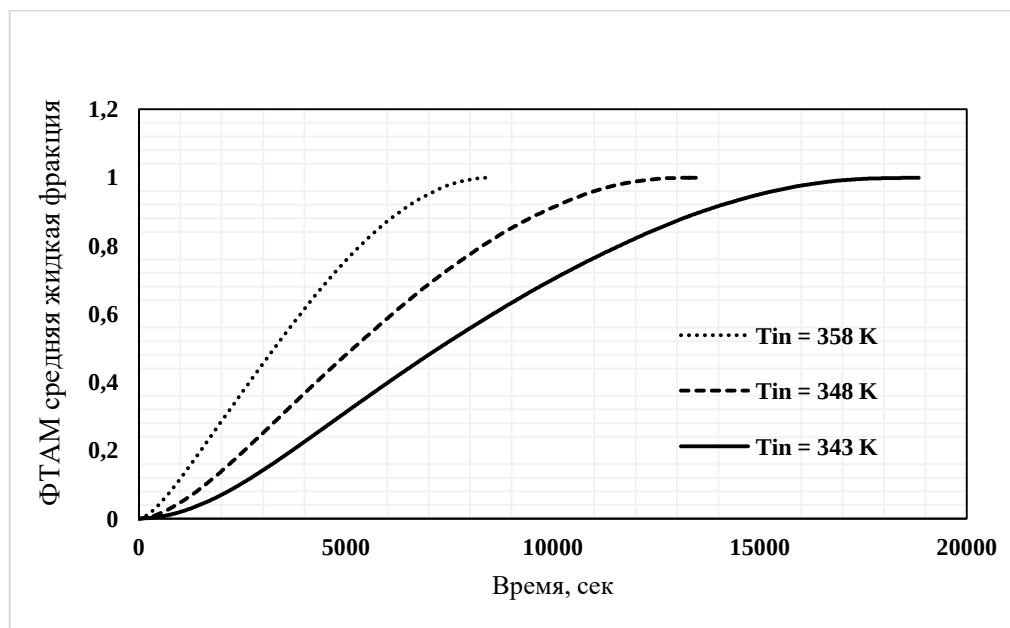


Рисунок 3.15 – Влияние температуры на входе на образование жидкой фракции парафина в процессе плавления.

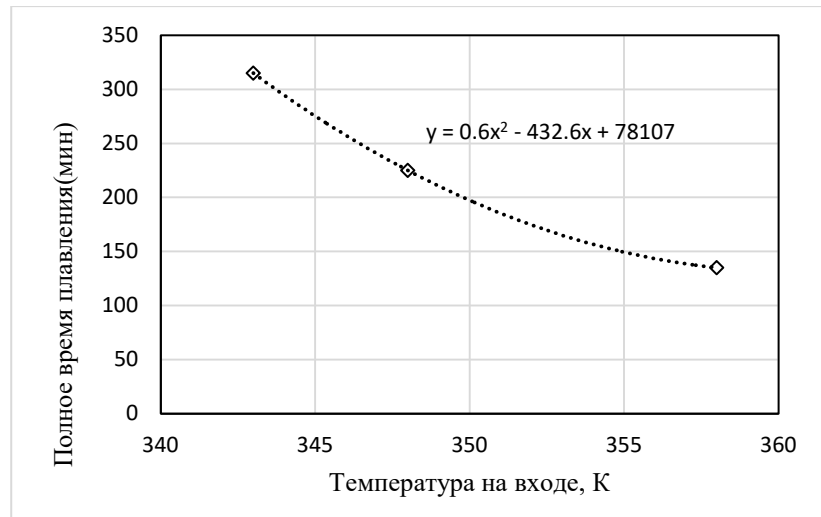


Рисунок 3.16 – Влияние температуры на входе на время плавления парафина

Влияние изменения расхода теплоносителя

На рисунках В.15 и В.16 (Приложение В) показано влияние изменения массового расхода теплоносителя на жидкую фракцию парафина для кожухотрубного накопителя тепловой энергии с 30 кольцевыми ребрами в процессе зарядки. Можно видеть, что при увеличении массового расхода теплоносителя с 0,15 л/мин до 0,5 л/мин, с 0,15 л/мин до 1 л/мин и с 0,15 л/мин до 5 л/мин средняя фракция жидкости через 120 мин увеличивалась соответственно на 94,2%, 149,3% и 251,5%.

Влияние изменения массового расхода теплоносителя на среднюю жидкую фракцию ФТАМ в процессе зарядки показано на рисунках 3.17 и 3.18. Можно видеть, что общее время плавления уменьшается примерно на 36,6%, 49,6% и 70,5% при увеличении массового расхода.

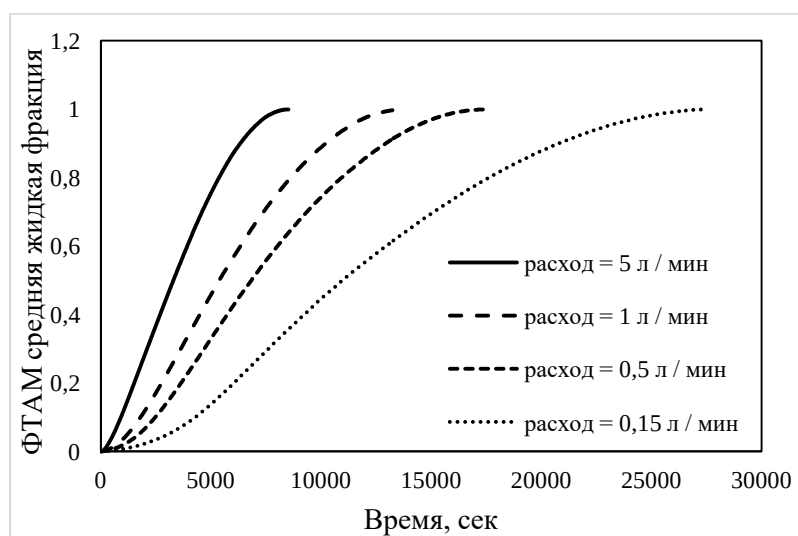


Рисунок 3.17 – Влияние расхода на образование жидкой фракции парафина в процессе плавления

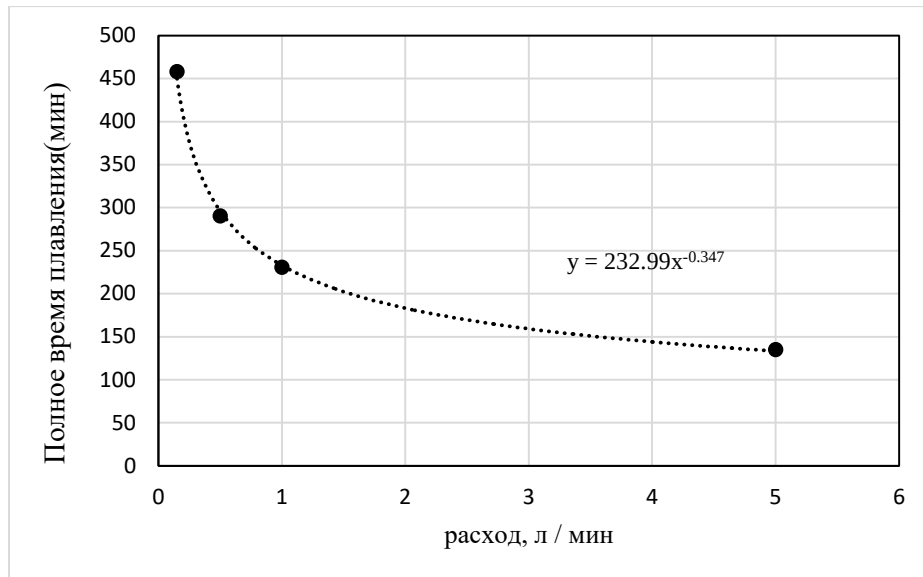


Рисунок 3.18 – Влияние расхода на время плавления парафина

Влияние изменения расхода теплоносителя на процесс застывания

На рисунках В.17 - В.20 (Приложение В) показаны контуры жидкой фракции и температуры парафина для кожухотрубного теплового накопителя тепловой энергии с 30 кольцевыми ребрами в процессе разрядки путем изменения расхода теплоносителя.

На рисунке 3.19 показано влияние изменения расхода теплоносителя на жидкую фракцию парафина для кожухотрубного теплового накопителя тепловой энергии с 30 кольцевыми ребрами в процессе разрядки. Можно наблюдать, что при увеличении массового расхода теплоносителя с 0,15 л/мин до 0,5 л/мин, с 0,15 л/мин до 1 л/мин и с 0,15 л/мин до 5 л/мин средняя фракция жидкости через 60 мин уменьшалась соответственно на 20,7%, 31% и 48,8%. Это означает увеличение доли средней затвердевшей фракции. При начале разрядки затвердевший ФТАМ образуется вокруг стеновой трубы и ребер на нижней стороне кожуха и трубы при низком расходе. Это происходит в основном за счет эффекта естественной конвекции, которая является основной формой теплопередачи в данный момент.

Жидкий ФТАМ поднимется вверх, а затвердевший ФТАМ опускается вниз. Теплопередача происходит между ФТАМ и теплоносителем за счет теплопроводности. Это происходит из-за более быстрого снижения температуры ФТАМ, которая вскоре достигает температуры застывания ФТАМ. Было замечено, что время застывания больше, чем время плавления.

Влияние изменения массового расхода теплоносителя на среднюю жидкую фракцию ФТАМ в процессе разрядки показано на рисунке 3.20. Можно показать, что общее время

застывания уменьшается примерно на 33%, 44,4% и 61,1% при увеличении массового расхода с 0,15 л/мин до 0,5 л/мин, с 0,15 л/мин до 1 л/мин и с 0,15 л/мин до 5 л/мин соответственно.

Перепады температур при низких скоростях потока больше, чем при высоких, как показано на рисунке 3.21. Перепады температур со временем уменьшаются при всех значениях расхода. Это связано с низким выделением тепла из ФТАМ, что вызвано увеличением твердого слоя ФТАМ и, следовательно, повышением теплового сопротивления в этом слое. Было замечено, что перепады температур между входом и выходом теплоносителя велики для случая низкого расхода. Это происходит главным образом из-за низкой скорости перемещения теплоносителя, что приводит к увеличению времени нагрева теплоносителя и, следовательно, увеличению температуры выхода теплоносителя. В силу того, что перепады температур при высоком расходе невелики, это приводит к уменьшению времени нагрева теплоносителя и, следовательно, к снижению выходной температуры теплоносителя.

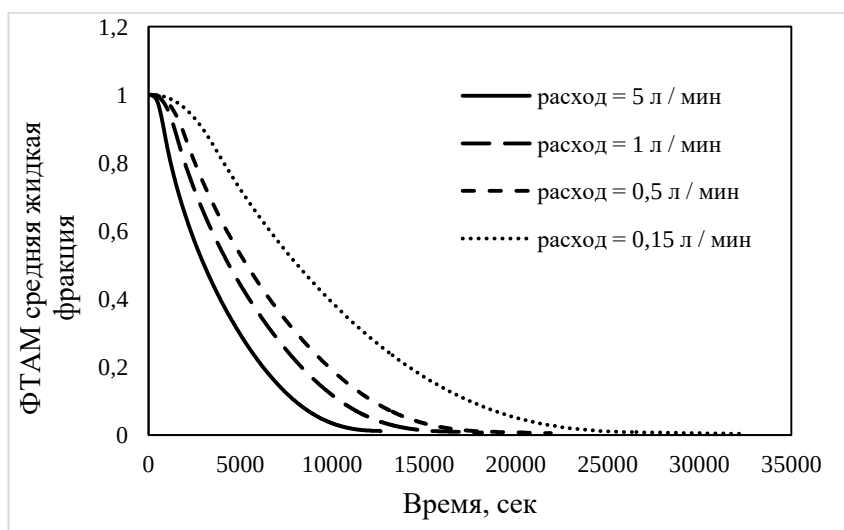


Рисунок 3.19 – Влияние массового расхода на среднюю жидкую фракцию парафина в процессе застывания.

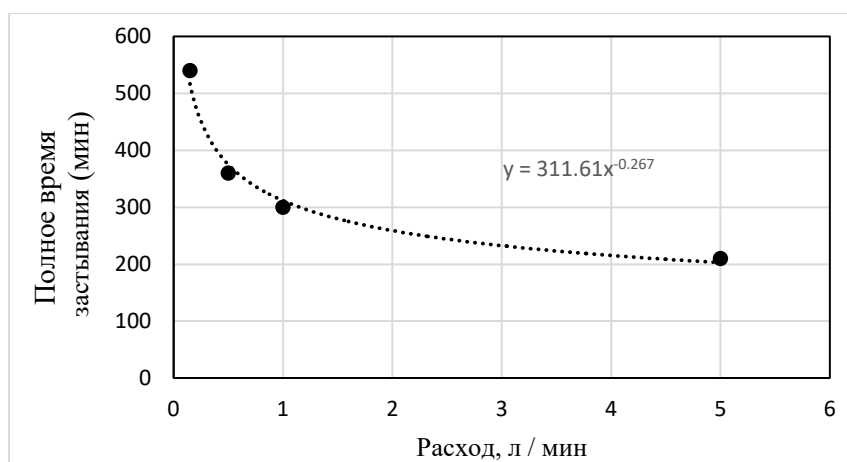


Рисунок 3.20 – Влияние скорости потока на время застывания парафина

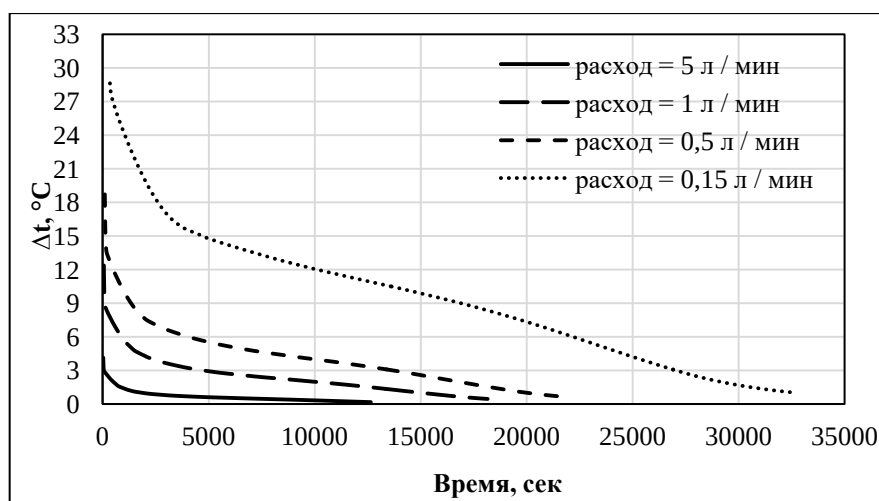


Рисунок 3.21 – Влияние скорости потока на разницу температур теплоносителя.

Влияние изменения направления потока теплоносителя на процесс зарядки

На рисунках В.21 и В.22 (Приложение В) показаны контуры жидкой фракции и распределение температур парафина для кожухотрубного накопителя тепловой энергии с 30 кольцевыми ребрами в процессе зарядки при нисходящем направлении потока (сверху вниз). В начале нагрева ФТАМ небольшая часть расплавленного парафина образуется в верхней части в непосредственной близости от теплопередающей стенки и ребер за счет теплопроводности.

Можно наблюдать, что средняя жидкая фракция была одинаковой при восходящем потоке около 25,2% через 30 минут. Твердый парафин, прилегающий к ребрам, локально расплавляется в первую очередь с более высокой скоростью плавления, чем тот, который находится далеко от ребер. Доля расплавленного парафина увеличивается в верхней части и уменьшается в нижней части в первые 30 минут времени плавления, но в то же время между ребрами в задней части ребра парафин имеет более высокую скорость плавления, чем в верхней.

С течением времени образуется жидкая пленка расплавленного парафина, прилегающая к поверхности ребра, что обеспечивает растущее пространство для локальной естественной конвекции, а затем происходит теплопередача за счет естественной конвекции плавучести в расплавленном ФТАМ в результате перепадов температур. Средняя жидкая фракция быстро увеличивается со временем в начальные 90 минут процесса плавления, в котором средняя жидкая фракция достигает около 79,9 %. Это связано с тем, что ФТАМ достигает высоких температур и преобладает эффект естественной конвекции. Затем скорость увеличения жидкой фракции уменьшается. Это происходит из-за уменьшения разности температур между

теплоносителем и ФТАМ и, следовательно, скорость теплопередачи становится меньше. Средняя жидкая фракция достигает значения около 98,4 % при 135 мин. Остальная часть твердого парафина (1,6%) остается в нижней части аккумулятора и для нее требуется много времени, чтобы быть полностью расплавленной. Для полного расплавления парафина требуется около 180 минут (3 часа). Время плавления уменьшается на 62,5% по сравнению с оболочкой и трубой без ребер.

На рисунке 3.22 показано влияние направления потока на среднюю жидкую фракцию и время плавления. Замечено, что образование средней жидкой фракции увеличивалась со временем одинаково как в восходящем, так и в нисходящем направлении, за исключением того, что в конце времени плавления небольшая твердая часть парафина около 1,6% в нижней части корпуса долго не плавилась полностью, а средняя температура ФТАМ в нисходящем потоке несколько меньше, чем в восходящем. Поэтому время плавления при восходящем потоке меньше времени плавления при нисходящем потоке из-за наличия небольшой твердой фазы в нижней части. Результаты моделирования подтвердили выводы, сделанные в предыдущем исследовании [94], что восходящий поток сокращает время зарядки за счет усиления эффектов естественной конвекции. В другом исследовании также указывается, что не наблюдается заметного изменения времени плавления или застывания при изменении направления потока сверху вниз или наоборот [113].

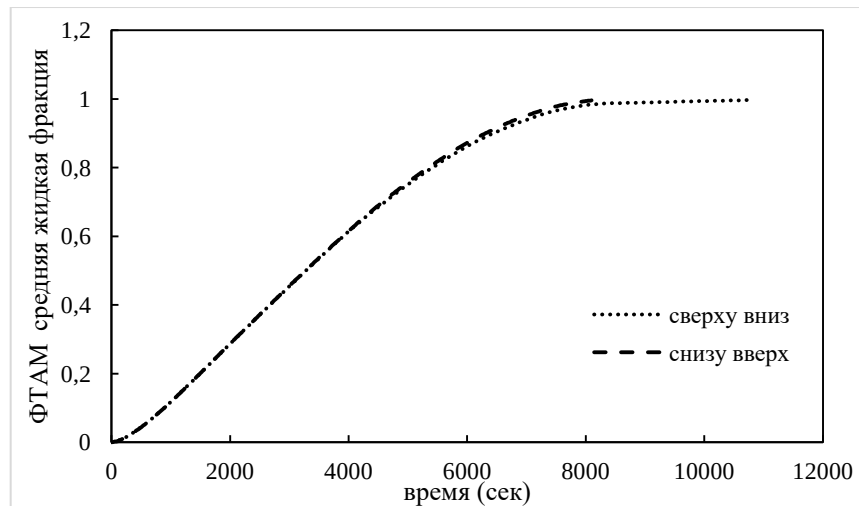


Рисунок 3.22 – Влияние направления потока на среднюю жидкую фракцию и время плавления

Влияние изменения диаметра внутренней трубы на зарядку

Контуры жидкой фракции и распределение температур парафина для кожухотрубного накопителя тепловой энергии с 30 кольцевыми ребрами в процессе зарядки при восходящем направлении потока при изменении внутреннего диаметра трубы в диапазоне 20-44 мм

показаны на рисунках В.23 - В.26 (Приложение В). Можно наблюдать, что при увеличении внутреннего диаметра трубы теплоносителя с 20 мм до 33 и с 20 мм до 44 мм средняя жидкая фракция незначительно увеличивалась на 2,1% и 9,1% соответственно через 30 минут.

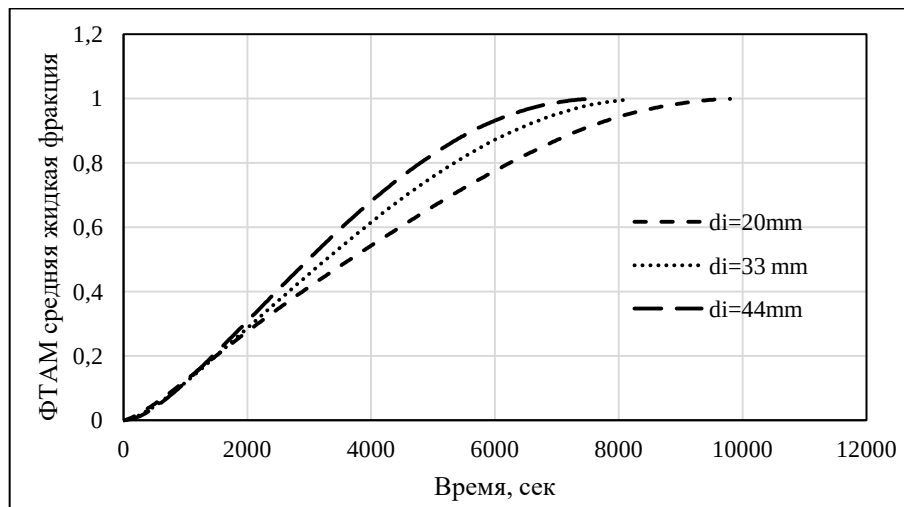


Рисунок 3.23 – Влияние изменения внутреннего диаметра трубы теплоносителя на образование жидкой фракции парафина в процессе плавления при $T=358\text{K}$ и расходе $=5\text{л/мин}$

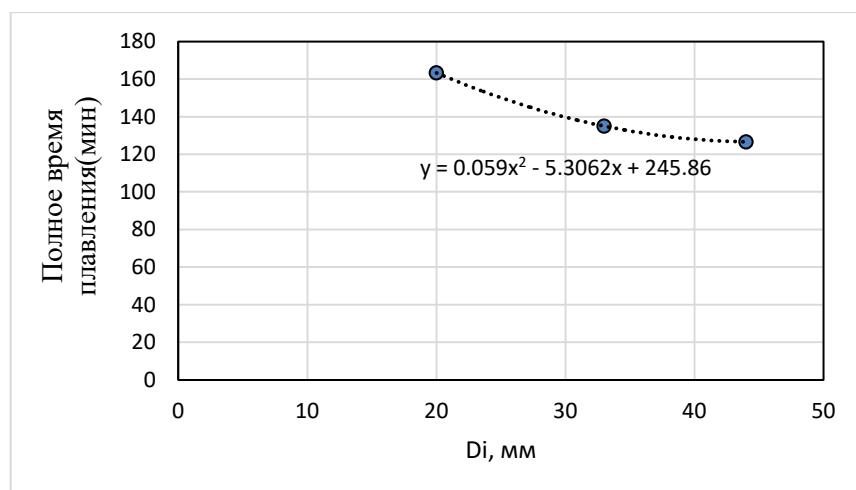


Рисунок 3.24 – Влияние изменения внутреннего диаметра трубы теплоносителя на время плавления парафина при $T=358\text{K}$ и расходе 5л/мин .

Влияние изменения внутреннего диаметра трубы теплоносителя на среднюю жидкую фракцию ФТАМ в процессе зарядки показано на рисунках 3.23 и 3.24. Средняя жидкая фракция быстро увеличивается со временем в первые 100 минут процесса плавления, в котором средняя жидкая фракция достигает примерно 77,5, 87,2 и 93,2% соответственно. Это связано с тем, что увеличение внутреннего диаметра трубы приводит к увеличению площади поверхности теплопередачи и, следовательно, увеличению скорости теплопередачи, а средняя фракция жидкости увеличивается при увеличении внутреннего диаметра. Затем скорость увеличения

жидкой фракции уменьшается. Это происходит из-за уменьшения разности температур между теплоносителем и ФТАМ, и, следовательно, скорость теплопередачи становится меньше. Для остальной твердой фазы парафина с долей 22,5, 12,8 и 6,8 % требуется время 63, 35 и 26 минут, чтобы полностью расплавиться. Можно показать, что общее время плавления уменьшается примерно на 17,3% и 27,2% при увеличении внутреннего диаметра трубы теплоносителя с 20 мм до 33 и с 20 мм до 44 мм соответственно, что вполне согласуется с результатами предыдущего исследования с аналогичной конфигурацией контейнера и трубы [94].

3.4 Исследование поведения ФТАМ в горизонтальном кожухотрубном теплоаккумуляторе с продольным размещением ребер

Физическая модель

В данной работе исследуется поведение ФТАМ в теплоаккумуляторах двух физических конструкций:

- 1) горизонтальный контейнер и труба с 6 продольными ребрами;
- 2) горизонтальный контейнер с 6 продольными разветвленными ребрами.

Целью исследования является определение влияния горизонтального расположения контейнера и продольного размещения ребер различной конструкции на процессы плавления и застывания ФТАМ.

На рисунке 3.25 приведена принципиальная схема горизонтальной обечайки и внутренней трубы с 6 продольными ребрами. Внутренний и наружный диаметр внутренней трубы составляет 0,033 м и 0,035 м соответственно. Внутренний диаметр корпуса-0,128 м. Продольные медные ребра, расположенные на наружной поверхности внутренней трубы толщиной $t=0,5$ мм и высотой $h=44$ мм, равномерно распределены под углом 60° . Парафин используется в качестве материала фазового перехода для аккумулирования тепловой энергии и полностью заполняет кольцевое пространство. Внешняя поверхность системы хорошо изолирована. На рисунке 3.26 показана принципиальная схема теплового аккумулятора оригинальной конструкции (патент № 202391, Приложение Г) с продольными разветвленными ребрами. Он имеет аналогичные размеры и состоит из 6 продольных ребер. Каждое ребро включает в себя 4 первичных пластины высотой 20 мм и толщиной 0,5 мм и 8 вторичных пластин высотой 10 мм и толщиной 0,5 мм.

Начальные и граничные условия

ФТАМ первоначально имеет температуру 30°C (303 К) в процессе плавления и температуру 80°C (353 К) в процессе застывания. Температура теплоносителя была выбрана

постоянной в соответствии с рекомендациями [54, 62, 10] и была установлена 85°C (358 K) для зарядки и 28°C (301 K) для разрядки. Граничные условия для наружной поверхности стенки контейнера определяются хорошей изоляцией, т.е. потери теплоты в окружающую среду отсутствуют. Теплопередача при плавлении описывается уравнением энергии, и для упрощения объемным расширением, вызванным плавлением парафина, пренебрегают. Явление вязкой диссипации не учитывается.

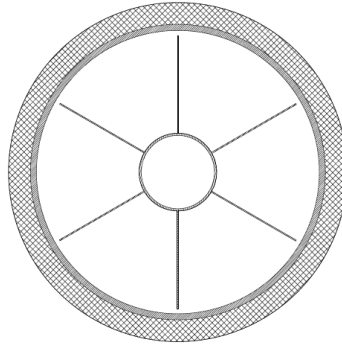


Рисунок 3.25 – Принципиальная схема горизонтальной обечайки и трубы с 6 продольными ребрами

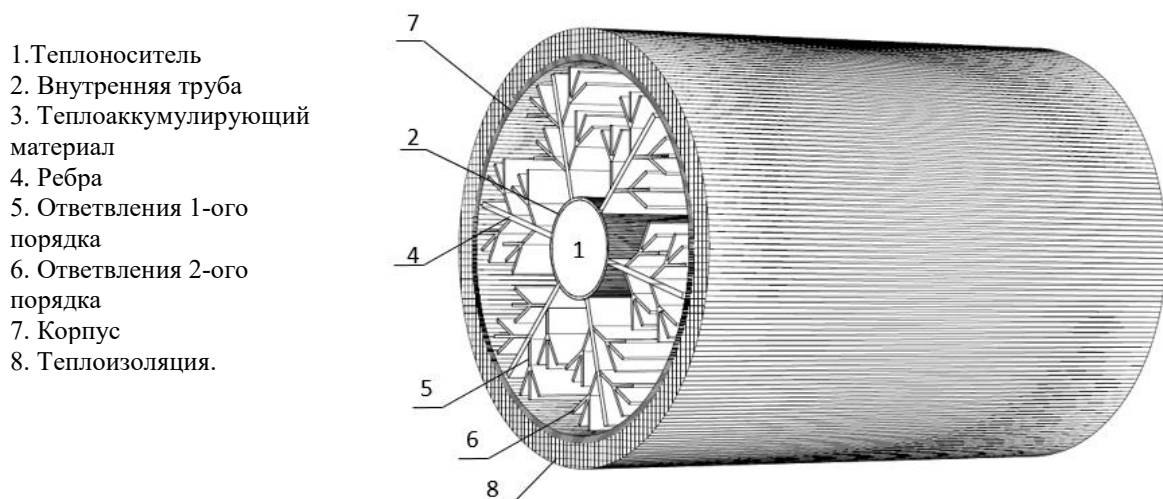


Рисунок 3.26 – Принципиальная схема теплоаккумулятора с продольными разветвленными ребрами[8]

Численная процедура

Для решения управляющих уравнений, описывающих переходную задачу теплопередачи с движущейся границей, было использовано программное обеспечение ANSYS-Fluent. Модели застывания и плавления решаются с использованием метода энтальпии-пористости и метода конечных объемов[95]. Модель была представлена в виде 2D модели, чтобы сократить время вычислений. Изменение объема ФТАМ из-за изменения фазы не учитывалось. Для пространственного распределения давления используется переходное моделирование со схемой

staggering option (PRESTO), способствующее получению более точных результатов, поскольку исключаются ошибки интерполяции и допущения нулевого градиента давления (стандартная дискретизация) на границах. Метод PRESTO является рекомендуемым подходом для расчета естественного конвективного потока [10]. Для определения скорости изменения давления использовался связанный алгоритм. Для решения уравнений импульса и энергии использовалась схема второго порядка со стороны потока. Размеры сетки численной модели для продольных ребер и разветвленных ребер составляют 9000 и 13000 соответственно. Для чувствительности к временному шагу в качестве стандартного значения были выбраны данные при 0,1 с.

Процесс зарядки для продольных ребер

Контуры фракции расплава и температуры ФТАМ в накопительном блоке с конфигурацией продольных ребер во времени показаны на рисунках В.27 и В.28 (Приложение В). При начале плавления горячая стенка внутренней трубы передает тепло твердому ФТАМ путем проводимости до того момента, когда ФТАМ начинает плавиться. В результате небольшая часть расплава парафина образуется вдоль продольной ребристой поверхности и горячей стенки трубы за счет теплопроводности, при этом энергия поглощается в виде явного тепла. Таким образом, можно наблюдать, что средняя жидкая фракция составляла около 24,3% через 10 минут. Твердый парафин, прилегающий к ребру, локально плавится с более высокой скоростью плавления, чем тот, который находится далеко от ребер. Масса расплавленного парафина вокруг верхних ребер больше, чем у нижних из-за эффекта естественной конвекции.

С течением времени при фазовом переходе образуется более жидкая пленка расплавленного парафина, прилегающая к поверхности ребра, что обеспечивает растущее пространство для локальной естественной конвекции, а затем происходит теплопередача за счет естественной конвекции плавучести в расплавленном ФТАМ в результате перепадов температур. Можно заметить, что расплавленный парафин в верхней части имеет более высокую скорость плавления, чем в нижней. Это связано с локальным усилением коэффициента теплопередачи при плавлении. Средняя жидкая фракция быстро увеличивается со временем в начальные 50 минут процесса плавления, при этом средняя жидкая фракция достигает около 86,8 %. Это связано с тем, что ФТАМ достигает высоких температур и преобладает эффект естественной конвекции, а твердая часть ФТАМ опускается вниз из-за своей высокой плотности. Затем скорость увеличения жидкой фракции уменьшается. Это связано с уменьшением разности температур между горячей стенкой внутренней трубы и

ФТАМ, и, следовательно, скорость теплопередачи становится меньше. Оставшейся твердой части парафина (13,2 %) потребовалось около 60 мин, чтобы полностью расплавиться. Для полного расплавления ФТАМ требуется около 110 минут (1,83 часа).

Процесс разрядки аккумулятора для продольных ребер

Распределение затвердевшей фракции и изменение температур ФТАМ в аккумуляторном блоке с продольными ребрами в разное время показаны на рисунках В.29 и В.30 (Приложение В). В начале разрядки происходит теплообмен между холодной стенкой внутренней трубы и ФТАМ за счет теплопроводности, которая доминирует в процессе застывания. Это происходит из-за более быстрого снижения температуры ФТАМ, которая довольно скоро достигает температуры застывания материала. В результате образуется небольшая порция затвердевшего парафина в окружении продольной ребристой поверхности и холодной стенки трубки за счет теплопередачи за счет теплопроводности, когда энергия выделяется в виде явного тепла. Таким образом, можно наблюдать, что средняя затвердевшая фракция составила около 19,05% через 10 минут. Жидкий парафин, прилегающий к ребрам, локально застывает с более высокой скоростью, чем вдали от ребер. Масса застывшего парафина вокруг нижних ребер больше, чем у верхних ребер из-за меньшего эффекта естественной конвекции, которая помогает жидкому ФТАМ подниматься вверх, а застывшему ФТАМ опускаться вниз в начале процесса застывания в течении 10 минут.

С течением времени доля затвердевшего парафина увеличивается. Через 50 минут после начала процесса застывания средняя затвердевшая фракция достигает примерно 54,3%. Затем скорость увеличения доли затвердевшей фракции уменьшается. Это связано с уменьшением разности температур между холодной стенкой внутренней трубы и ФТАМ, и, следовательно, скорость теплопередачи становится меньше. Через 100 минут средняя затвердевшая фракция достигает примерно 75,2 %. Оставшейся части парафина (24,8 %) потребовалось около 150 мин, чтобы полностью затвердеть. Для полного застывания парафина требуется около 250 минут (4,16 часа).

Процесс зарядки разветвленных продольных ребер

Контуры фракции расплава и температур ФТАМ в накопительном блоке с разветвленными продольными ребрами для разных периодов времени показаны на рисунках В.31 и В.32 (Приложение В). В начале зарядки аккумулятора горячая стенка внутренней трубки передает тепло твердому телу ФТАМ путем теплопроводности до того, как ФТАМ начинает плавиться, что доминировало в процессе плавления на ранней стадии. При этом начинает

образовываться небольшая порция расплава парафина вблизи горячей стенки и разветвленных продольных ребер за счет теплопроводности только ФТАМ и энергия поглощается в виде явного тепла. Таким образом, можно наблюдать, что средняя жидкая фракция составляла около 29,6% через 10 минут. Твердый парафин, примыкающий к разветвленному ребру, локально расплавляется в первую очередь с более высокой скоростью плавления, чем тот, что находится дальше от ребер. Доля расплавленного парафина вокруг верхних разветвленных ребер больше, чем у нижних из-за эффекта естественной конвекции.

С течением времени при фазовом переходе образуется более жидкая пленка расплавленного парафина, прилегающая к поверхности ребер, что обеспечивает растущее пространство для локальной естественной конвекции, а затем происходит теплопередача за счет естественной конвекции в результате перепадов температур. Можно заметить, что расплавленный парафин в верхней части имеет более высокую скорость плавления, чем в нижней. Это связано с усилением теплопроводности и конвективной передачи тепла при плавлении. Со временем жидкая фракция увеличивается и распространяется во всех направлениях от трубы. Средняя жидкая фракция быстро увеличивается со временем в начальные 40 минут процесса плавления, при этом доля средней жидкой фракции достигает примерно 96,3 %. Затем скорость увеличения жидкой фракции уменьшается. Это связано с уменьшением разности температур между горячей стенкой внутренней трубы и ФТАМ, и, следовательно, скорость теплопередачи уменьшается. Для полного расплавления парафина требуется около 55 минут.

Процесс разрядки для разветвленных продольных ребер

Затвердевшая фракция и температурные контуры ФТАМ в аккумуляторном блоке с разветвленными продольными ребрами в разное время показаны на рисунках В.33 и В.34 (Приложение В). При начале разрядки застывающий ФТАМ образуется вокруг холодной стенки внутренней трубы и ребер. Теплопередача происходит между ФТАМ и теплоносителем за счет теплопроводности. Это происходит из-за более быстрого снижения температуры ФТАМ, которые достигают температуры застывания. В результате большая часть затвердевшего парафина образуется в окруженной разветвленными продольными ребрами поверхности, а холодная стенка трубки за счет теплопередачи нагревается. Таким образом, можно наблюдать, что доля средней затвердевшей фракции составляет около 54,4% через 10 минут. Жидкий парафин, прилегающий к ребрам, локально затвердевает с более высокой скоростью

застывания, чем вдали от ребер. Разветвленные продольные ребра увеличивают скорость теплопередачи и, следовательно, увеличивают скорость застывания.

Через 30 минут доля средней затвердевшей фракции достигает примерно 96,5 %. Затем скорость увеличения доли затвердевшей фракции уменьшается. Это связано с уменьшением разности температур между холодной стенкой внутренней трубы и ФТАМ, и, следовательно, скорость теплопередачи становится меньшей. Оставшейся части парафина (3,5%) потребовалось около 50 мин, чтобы полностью затвердеть, при этом требуется около 80 минут (1,33 часа), чтобы парафин полностью затвердел.

Сравнение продольных ребер и разветвленных продольных ребер в процессе плавления

Сравнение распределения фракций расплава и температурных контуров ФТАМ в аккумуляторе с конфигурацией продольных ребер и разветвленных продольных ребер в разное время процесса плавления показано на рисунках В.35 и В.36 (Приложение В) и рисунке 3.27. Было отмечено, что средняя жидкая фракция составила около 24,3% и 29,6% через 10 минут для продольных ребер и разветвленных продольных ребер соответственно. Это указывает на то, что конструкция разветвленных ребер незначительно увеличивает среднюю фракцию жидкой фазы в первые 10 минут. В температурных контурах температура парафина для разветвленных продольных ребер выше, чем для продольных ребер. Через 20 минут эффективность разветвленных ребер становится выше, при этом доля средней жидкой фракции достигает 66,3%, а доля средней жидкой фракции для продольных ребер достигает 45,9%. Через 40 минут верхняя часть парафина полностью расплавляется в разветвленных продольных ребрах, а небольшая часть остатка твердого парафина остается внизу между областями разветвленных продольных ребер. В продольных ребрах небольшая часть остатка твердого парафина остается в середине, ближе к наружной трубке, а большая часть остается в нижней части контейнера. Для полного расплавления парафина в аккумуляторе с разветвленными продольными ребрами требуется около 55 минут, а с продольными ребрами-около 110 минут. Полученные результаты показали, что использование разветвленных продольных ребер повышает теплопередачу и, следовательно, сокращает время плавления примерно на 50% по сравнению с продольными ребрами.

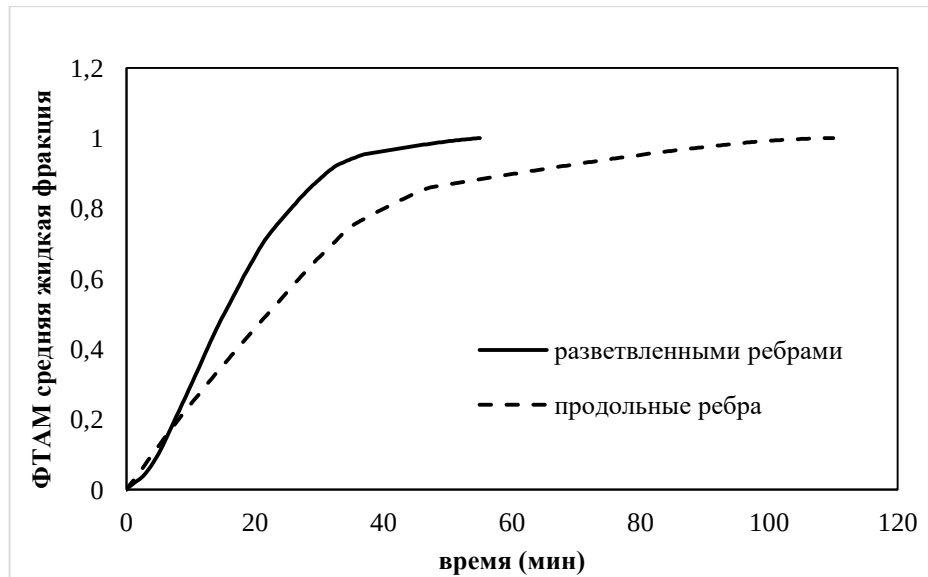


Рисунок 3.27 Влияние двух конфигураций продольных ребер на формирование жидкой фракции парафина в процессе плавления

Сравнение продольных ребер и разветвленных продольных ребер в процессе застывания

Сравнение затвердевшей фракции и температурных контуров ФТАМ в накопительном блоке с продольными ребрами и разветвленными продольными ребрами в разное время процесса застывания показано на рисунках В.37 и В.38 (Приложение В) и рисунке 3.28. Было замечено, что быстрое снижение температуры парафина связано с потерей тепла в обеих конфигурациях. Отмечено, что средняя затвердевшая фракция составила около 19,05 % и 39,6% через 10 минут для продольных ребер и разветвленных продольных ребер соответственно. Это указывает на то, что эффект разветвленных ребер увеличивает скорость теплопередачи за счет теплопроводности и, следовательно, увеличивает затвердевшую фракцию в первые 10 минут. В температурных контурах температура парафина для разветвленных продольных ребер ниже, чем для продольных ребер. Через 30 минут доля затвердевшей фракции достигает 79,03 %, а доля затвердевшей фракции для продольных ребер достигает 41,14%. Через 50 минут большая часть парафина затвердевает в разветвленных продольных ребрах, где доля затвердевшей фракции достигает 93,3 %, а небольшая часть остального парафина остается между областями разветвленных продольных ребер. В продольных ребрах большая часть парафина остается незатвердевшей в области между ребрами, при этом доля затвердевшей фракции достигает 54,3 %.

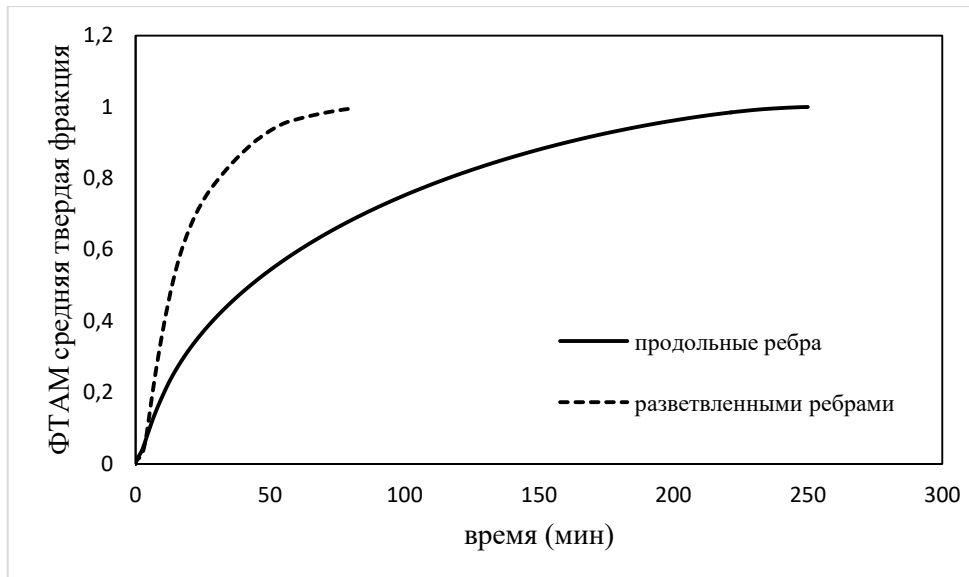


Рисунок 3.28 Влияние двух конфигураций продольных ребер на образование затвердевшей фракции парафина в процессе зарядки

Парафину необходимо около 80 минут, чтобы полностью затвердеть в разветвленных продольных ребрах, в то время как в продольных ребрах процесс застывания занимает около 250 минут. Полученные результаты показали, что использование разветвленных продольных ребер повышает теплопередачу и, следовательно, сокращает время застывания примерно на 68% по сравнению с продольными ребрами.

3.5 Выводы по главе 3

В третьей главе решены вторая, третья и четвертая задачи исследования.

Разработана численная модель процессов изменения свойств материала с фазовым переходом, основанная на энтальпийном методе анализа теплообмена твердотельных и жидкостных фазах ФТАМ.

Результаты показывают, что время достижения всеми ФТАМ температуры 358 К составляет 8 часов. Это время почти совпадает с моделируемым полным временем зарядки с использованием комбинированной модели проводимости-конвекции. Приведенные выше результаты сравнения показывают, что процесс зарядки в основном осуществляется естественной конвекцией и что теплопроводность становится незначительной. Численные результаты, полученные в данном исследовании, были подтверждены сравнением с опубликованными экспериментальными результатами.

Проведены исследования поведения ФТАМ в вертикальном кожухотрубном ТА с поперечными ребрами в зависимости от конструктивных и эксплуатационных параметров.

Исследовано поведение ФТАМ и изменение тепловых характеристик плавления материала фазового перехода (парафина) внутри оболочки в системе с кольцевыми ребрами. Определено влияние параметров ребер (числа ребер, толщины ребер и интервала между ребрами) на теплопередачу при плавлении материала внутри блока и определены оптимальные параметры ребер.

Произведен анализ и рекомендованы к практическому внедрению зависимости влияния эксплуатационных и конструктивных факторов (температуры теплоносителя на входе, расхода, направления потока и диаметра внутренней трубы) на время плавления, время застывания, распределение температуры, распределение объемной доли жидкой фазы теплоаккумулирующего материала внутри теплоаккумулятора.

Проведены исследования поведения ФТАМ в горизонтальном кожухотрубном ТА с продольным размещением ребер.

Численно исследовано и проведено сравнение поведения ФТАМ в процессе плавления и застывания для двух конструкций теплоаккумуляторов: горизонтального с 6 продольными ребрами и горизонтального с продольными разветвленными ребрами. Результаты показали, что для полного расплавления парафина в аккумуляторе с разветвленными продольными ребрами требуется около 55 минут, а с продольными ребрами - около 110 минут. Таким образом, полученные результаты показали, что использование предложенной конструкции теплоаккумулятора с разветвленными продольными ребрами повышает теплопередачу и, следовательно, сокращает время плавления примерно на 50% по сравнению с продольными ребрами.

Эффективность процесса разрядки аккумулятора (при застывании ФТАМ) выше для системы разветвленных продольных ребер. Полученные результаты показали, что использование разветвленных продольных ребер повышает теплопередачу и, следовательно, сокращает время застывания примерно на 68% по сравнению с продольными ребрами.

ГЛАВА 4 ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА РАЗРАБОТКИ СИСТЕМ АККУМУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОТЫ С ФТАМ

4.1 Определение основных параметров системы аккумулирования теплоты

В настоящее время для теплоснабжения бытовых и промышленных объектов используются теплогенерирующие установки, работающие на органическом топливе в качестве источника энергии. На рисунке 4.1 показана традиционная схема теплоснабжения производственных процессов с использованием котельного оборудования для промышленного процесса.

В настоящем исследовании предлагаемая система теплоснабжения представляет собой комбинированную теплогенерирующую установку, использующую как традиционный источник энергии (сжигание органического топлива), так и солнечную водонагревательную систему с аккумулированием тепла за счет использования материала с фазовым переходом. Предлагается рассмотреть три сценария использования системы солнечного нагрева теплоносителя:

- 1) Солнечный подогрев питательной вводы для котла в дневное время (8 часов) без аккумулирования тепла, рисунок 4.2;
- 2) Подогрев питательной вводы для котла в ночное время (16 часов) с аккумулированием тепла, рисунок 4.3;
- 3) Комбинированная генерация тепла с подогревом питательной вводы для котла солнечным источником энергии в дневное время и использованием системы аккумулирования тепла в ночное время, рисунок 4.4.

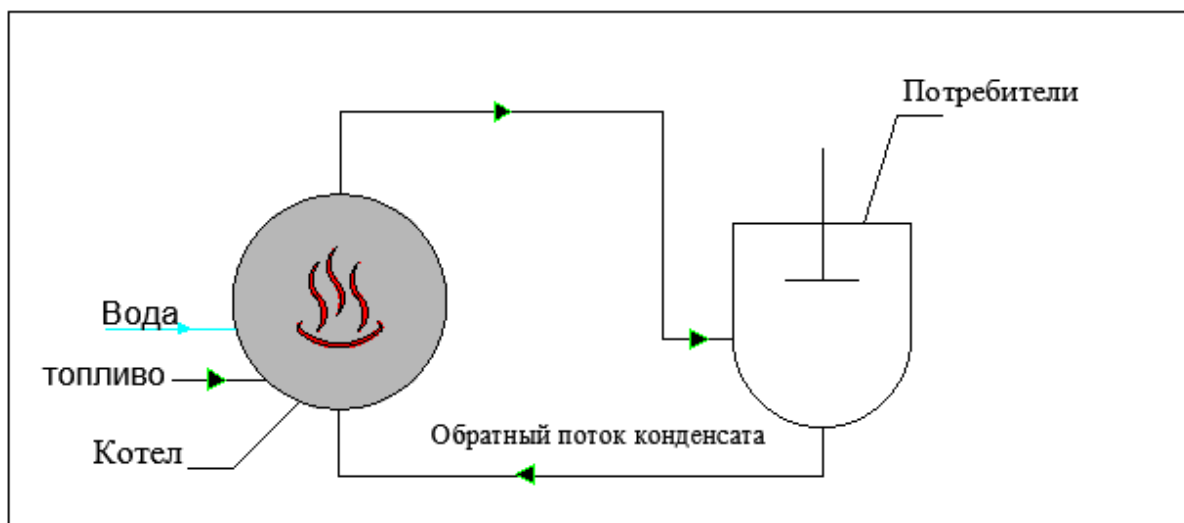


Рисунок 4.1 – Традиционная система теплоснабжения с котлом в качестве источника энергии

Первый сценарий. Система теплоснабжения состоит из 1) блока солнечных коллекторов, 2) котельной установки, 3) потребителя тепла для производственных процессов (рисунок 4.2). Система работает в солнечное время, когда присутствует солнечная радиация и вода нагревается внутри солнечных коллекторов. Горячая вода из солнечного коллектора подается в котел и далее потребителям в течение солнечного времени. Котел работает только в ночное время для питания потребителей.

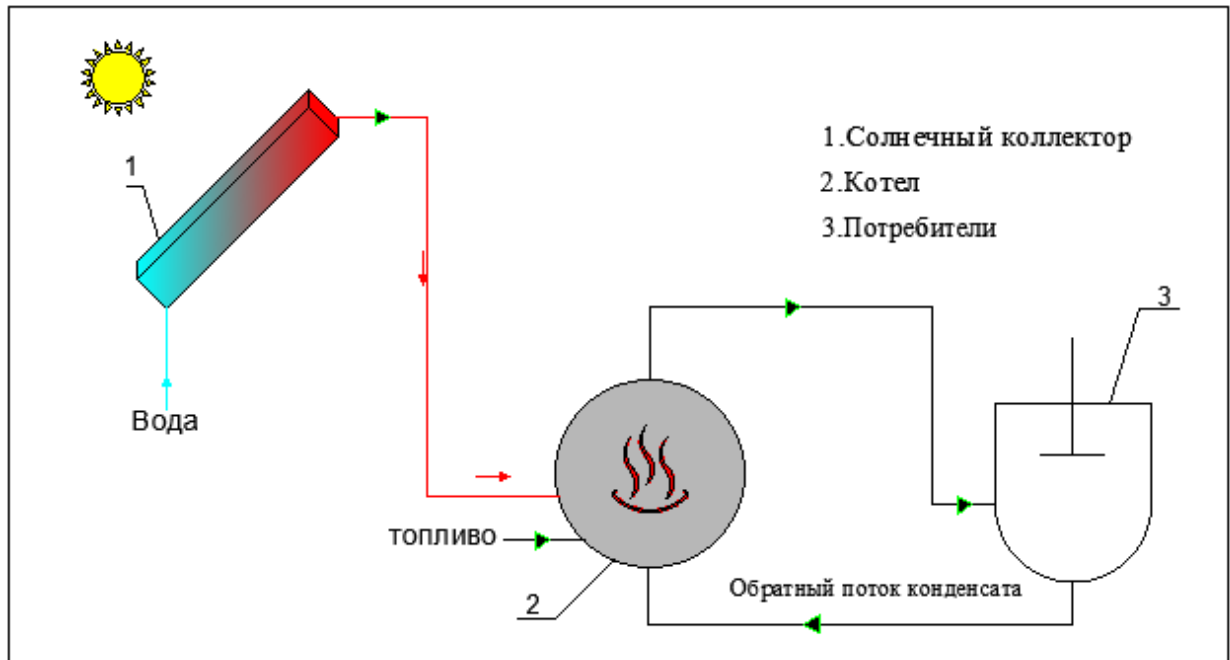


Рисунок 4.2 – Солнечный подогрев питательной воды в дневное время (8 часов)

Второй сценарий. Система теплоснабжения состоит из 1) блока солнечных коллекторов, 2) кожухотрубного теплового аккумулятора с ФТАМ, 3) котла, 4) потребителей тепла (рисунок 4.3). Система имеет два режима работы: режим зарядки и режим разрядки. Во время режима зарядки, в солнечное время, когда присутствует солнечное излучение, питательная вода нагревается внутри солнечных коллекторов, а затем подается непосредственно в блок теплового аккумулятора для его зарядки. Вода на выходе из теплового аккумулятора циркулирует в солнечном коллекторе по замкнутому циклу. Котел работает только днем для питания потребителей. В течение периода зарядки в дневное время клапаны 1, 3 и 4 остаются открытыми, в то время как клапаны 2 и 5 остаются закрытыми. В ночное время, при отсутствии солнечного излучения, клапан 1, 3 и 4 необходимо закрыть, так как нет необходимости циркулировать воду через коллектор, а клапан 2 и 5 открыть для пропуска воды непосредственно через блок теплового аккумулятора для подогрева воды в котел. ФТАМ начинает затвердевать и, будучи полностью затвердевшим, этот ФТАМ можно снова

использовать для зарядки. В ночное время горячая вода из аккумулятора подается в котельную установку и далее потребителям.

Третий сценарий рассматривается как объединение первого и второго сценариев. Система теплоснабжения состоит из 1) блока солнечных коллекторов, 2) кожухотрубного теплового аккумулятора, 3) котла, 4) потребителей (рисунок 4.4). Подогрев воды происходит как по первому, так и по второму сценарию.

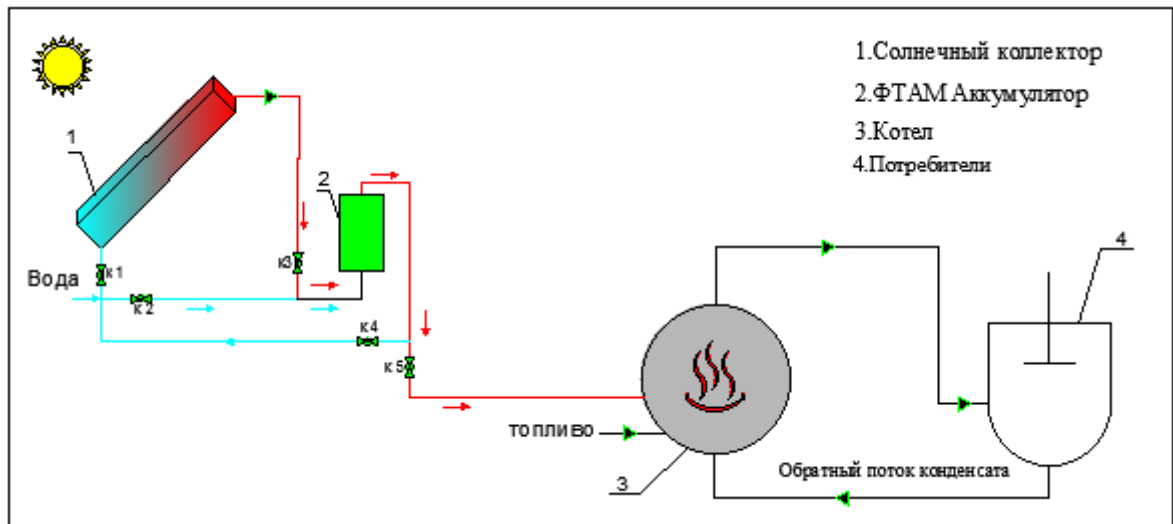


Рисунок 4.3 – Солнечная система теплоснабжения с системой теплового аккумулятора (подача тепла от аккумулятора в ночное время в течение 16 часов)

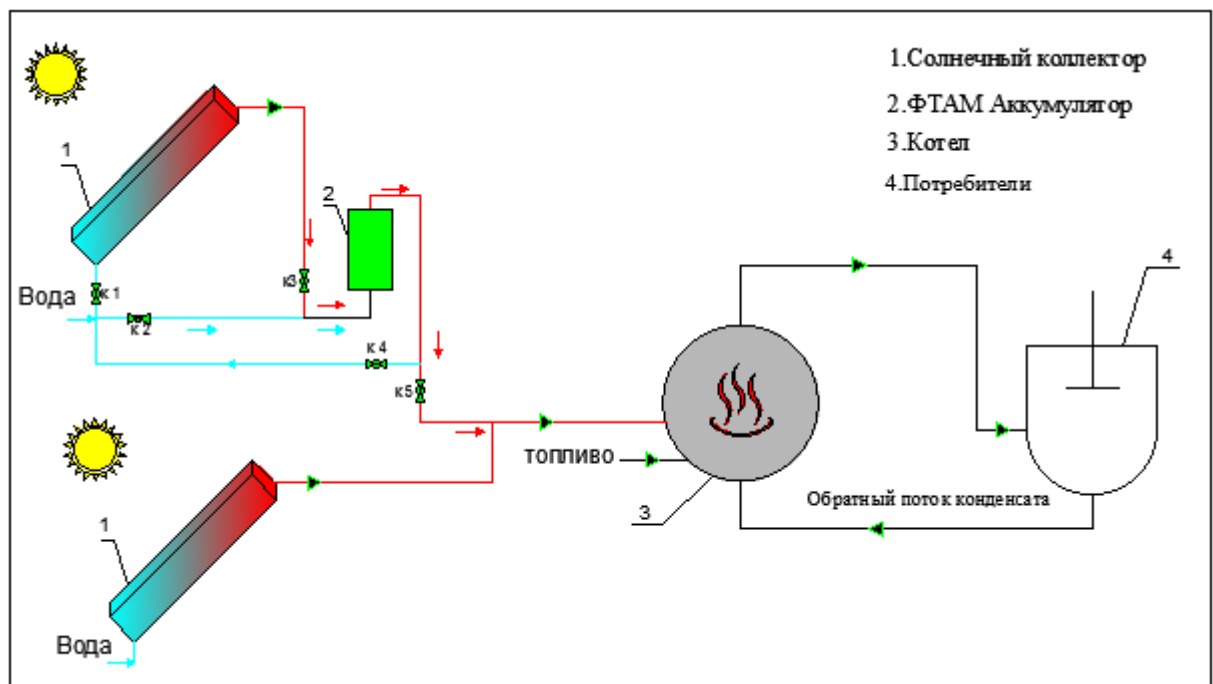


Рисунок 4.4 – Комбинированная система подогрева питательной воды котла в дневное время и использования теплового аккумулятора тепла в ночное время

В настоящей методике используется вертикальный кожухотрубный тепловой аккумулятор с ФТАМ и 30 кольцевыми ребрами. Кольцевые медные ребра на наружной поверхности внутренней трубы толщиной t (0,6 мм) и высотой h (40 мм) распределены равномерно с интервалом D (32,27 мм). Парафин используется в качестве материала фазового перехода для хранения тепловой энергии и полностью заполняет кольцевое пространство. Парафин является наиболее подходящим материалом из-за его доступности, термостойкости и некоррозионности, допустимых температур плавления и низкой стоимости [60, 18]. Внешняя поверхность системы хорошо изолирована. Вода используется в качестве теплоносителя и протекает через внутреннюю трубу. Наиболее высокая достижимая в дневное время температура воды на выходе из солнечного коллектора составляет 85,9 °C [37]. Температура воды на входе в теплоаккумулятор 85 °C была выбрана в соответствии с прототипом [37]. Цикл разряда теплоаккумулятора начинается при температуре воды около 28 °C.

4.2 Методика расчета системы солнечного телоснабжения с теплоаккумулятором с фазовым преходом

Кожухотрубный тепловой аккумулятор с кольцевыми ребрами, ФТАМ и направлением потока теплоносителя показан на рисунке 4.5. Приведенные выше результаты исследований такого теплоаккумулятора показывают, что общее время зарядки меньше общего времени разрядки. Это связано с тем, что естественная конвекция является основным механизмом теплопередачи в процессе плавления. В начале разрядки затвердевший ФТАМ образуется вокруг стенок трубы и ребер и со временем увеличивается сопротивление теплопередаче, а это значит, что количество тепла, получаемого теплоносителем из расплавленной фазы, уменьшается.

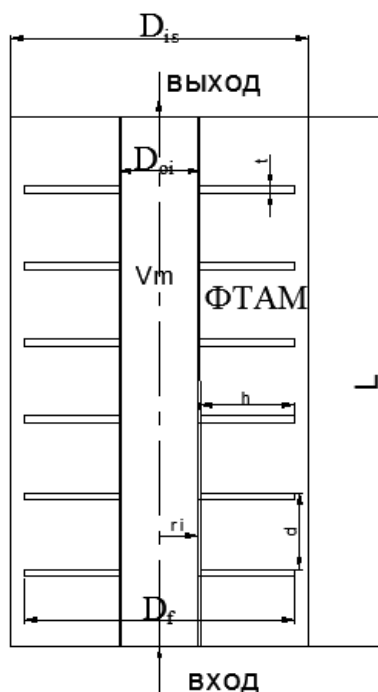


Рисунок 4.5 – Принципиальная схема кожухотрубного теплового аккумулятора с кольцевыми ребрами и направлением потока теплоносителя.

Исходные данные для теплового расчета теплоаккумулятора:

- Общее количество накопленного тепла Q_s определяется по формуле(4.1)

$$Q_s = m_{\text{ФТАМ}}[C_{sp}(T_m - T_i) + LH + C_{lp}(T_f - T_m)] \quad (4.1)$$

Где $m_{\text{ФТАМ}}$ -масса парафина.

LH -скрытая теплота фазового перехода парафина;

T_i - начальная температура парафина;

T_m - температура плавления парафина;

T_f - конечная температура парафина в конце зарядки;

C_{sp} и C_{lp} - удельная теплоемкость парафина в твердой и жидкой фазах соответственно.

- Масса ФТАМ (4.2)внутри кольцевого пространства между внутренней трубой с ребрами и оболочкой

$$M_{\text{ФТАМ}} = V_{\text{ФТАМ}} \times \rho \quad (4.2)$$

- $V_{\text{ФТАМ}}$ – объем ФТАМ(4.3) внутри кольцевого пространства между внутренней трубкой с ребрами и оболочкой;

ρ – плотность ФТАМ

$$V_{\text{ФТАМ}} = V_A - V_{ft} \quad (4.3)$$

- V_A – объем кольцевого пространства между внутренней трубой без ребер и оболочкой(4.4);

$$V_A = \frac{\pi}{4} (D_{is}^2 - D_{oi}^2) \times L \quad (4.4)$$

D_{is} - внутренний диаметр корпуса;

D_{oi} - наружный диаметр внутренней трубы;

L - длина корпуса;

- V_f – объем одного кольцевого ребра(4.5)

$$V_f = \frac{\pi}{4} (D_f^2 - D_{oi}^2) \times t \quad (4.5)$$

D_f - наружный диаметр ребра;

t - толщина ребра;

- Общий объем ребер(4.6);

$$V_{ft} = N \times V_f \quad (4.6)$$

N – количество ребер.

- Средняя скорость подачи или отвода тепла во время зарядки или разрядки может быть найдена из следующего уравнения для теплоносителя, Вт(4.7):

$$Q_f = \dot{m}_{HTF} \times C_{P,HTF} \times \Delta T_f \quad (4.7)$$

Где ΔT_f - это средняя разница температур между входным и выходным потоком воды:

$$\Delta T_f = T_{вы} - T_{вх}$$

$T_{вы}$ - температура возврата теплоносителя из системы теплового аккумулятора, °C;

$T_{вх}$ - температура подачи теплоносителя в систему теплового аккумулятора, °C.

- $\dot{m}_{HTF}$ -массовый расход теплоносителя (воды) (4.8):

$$\dot{m}_{HTF} = \rho_{HTF} \times G1 \quad (4.8)$$

$C_{P,HTF}$ - удельная теплоемкость воды;

ρ_{HTF} - плотность теплоносителя (воды).

- G_1 – расход теплоносителя внутри одного блока теплового аккумулятора можно рассчитать по формуле(4.9):

$$G_1 = A_C \cdot V_m = \frac{\pi d_i^2}{4} \cdot V_m \quad (4.9)$$

V_m - средняя скорость теплоносителя (м/с);

d_i - диаметр внутренней трубы, по которой течет теплоноситель (м);

- Q_{ft} : Полная энергия, подаваемая или рекуперлируемая теплоносителем во время зарядки и разрядки, может быть найдена уравнением(4.10):

$$Q_{ft} = Q_f \cdot t_{пл,за} \quad (4.10)$$

$t_{пл,за}$ - время плавления или затвердевания системы теплового аккумулятора, ч;

- $G_{общ}$ - общий расход теплоносителя внутри теплового аккумулятора(4.11):

$$G_{общ} = G_1 \times n \quad (4.11)$$

n - количество тепловых аккумуляторов в системк аккумуляирования рассчитывается по формуле(4.12):

$$n = \frac{\text{требуемое количество тепла}}{\text{накопленное тепла для одного аккумулятора}} \quad (4.12)$$

- В настоящем исследовании длина теплового аккумулятора составляет 1 м ($L=1$ м)
- $L_{общ}$ - общая длина тепловых аккумуляторов рассчитывается по формуле(4.13):

$$l_{общ} = L \times n \quad (4.13)$$

Для обеспечения необходимой тепловой нагрузки теплоаккумуляторы могут быть распределены параллельно, как показано на Рисунок 4.6.

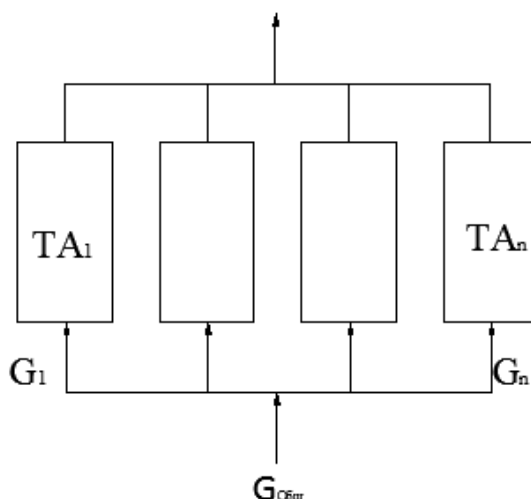


Рисунок 4.6 – Схема параллельно работающих тепловых аккумуляторов

- Расчет количества ребер(4.14):

$$N = \frac{V_{ft}}{V_f}$$

Для постоянного объема всех ребер (V_{ft}) и постоянной высоты ребра (h) необходимо иметь постоянную D_f .

$$N = \frac{V_{ft}}{\frac{\pi}{4}(D_f^2 - D_{oi}^2) \times t} \quad (4.14)$$

Таким образом, чтобы увеличить количество ребер, необходимо уменьшить толщину ребра, поэтому интервал (d) уменьшается.

Влияние числа ребер на полное время плавления в настоящем исследовании показано на рисунке 3.14. Можно заметить, что полное время плавления постепенно уменьшается с увеличением числа ребер, пока не достигает минимального полного времени плавления, а затем становится постоянным, что указывает на оптимальное число ребер по отношению к минимальному полному времени плавления. Для настоящего исследования рекомендуется оптимальная группа параметров ребер: число ребер $N = 30$, относительная толщина $t/d = 0,01858$, относительный интервал $d/L = 0,03227$ и соотношение сторон $t/h = 0,015$.

- выбор эксплуатационных параметров ТА
 - Влияние изменения температуры теплоносителя на входе в ТА на время плавления (рисунок 3.16).

Общее время плавления уменьшается при повышении температуры на входе. Зависимость между временем плавления и входной температурой теплоносителя определена по результатам исследования (4.15):

$$t_{\text{пл}} = 0.6T_{\text{вх}}^2 - 432.6T_{\text{вх}} + 78107 \quad (4.15)$$

- Влияние изменения расхода теплоносителя на время плавления (Рис. 3.18)

Общее время плавления уменьшается при увеличении расхода. Зависимость между временем плавления и расходом теплоносителя по результатам исследования (4.16):

$$t_{\text{пл}} = 232.99G^{-0.347} \quad (4.16)$$

- Влияние изменения расхода теплоносителя на время застывания ФТАМ (рисунок 3.20)

Общее время застывания уменьшается при увеличении расхода. Зависимость между временем застывания и расходом теплоносителя по результатам исследования (4.17):

$$t_{\text{за}} = 311.61G^{-0.267} \quad (4.17)$$

- Влияние направления потока теплоносителя на среднюю жидкую фракцию и время плавления (рисунок 3.22)

В результате проведенных исследований определено, что средняя жидкая фракция увеличивалась со временем одинаково как в восходящем, так и в нисходящем направлении, за исключением того, что в конце времени плавления небольшая твердая часть парафина в нижней части долго не плавилась полностью. Поэтому время плавления при восходящем потоке меньше времени плавления при нисходящем потоке.

- Влияние изменения диаметра внутренней трубы на зарядку (рисунок 3. 24)

Общее время плавления уменьшается при увеличении внутреннего диаметра трубы теплоносителя. Зависимость между временем плавления и внутренним диаметром трубы теплоносителя по результатам исследования (4.18):

$$t_{\text{пл}} = 0.059D_I^2 - 5.3062D_I + 245.86 \quad (4.18)$$

4.3 Пример расчета системы солнечного теплоснабжения для фирмы «Spanish for engineering works, Испанская компания по инженерным работам».

Система теплоснабжения предприятия в качестве источника тепловой энергии использует паровой котел. Котел работает на дизельном топливе. Пар используется для подачи 4 горизонтальных моечных агрегатов, 8 паровых сушилок, секции парового утюга для одежды и различных промышленных процессов.

Моделирование системы нагрева горячей воды из солнечного коллектора

Есть три варианта, которые можно применить в компании:

- 1) Солнечный нагрев питательной воды для котла в дневное время (8 часов), рисунок 4.2.
- 2) Солнечная система подогрева воды с системой аккумулирования скрытого тепла, подача энергии от аккумулятора в ночное время (16 часов), рисунок 4.3.
- 3) Комбинация между солнечным нагревом воды для котла в дневное время и солнечной системой нагрева воды от системы аккумулирования скрытого тепла ночью, рисунок 4.4.

Во всех из них используется паровой котел. Характеристики парового котла в компании указаны ниже:

- Паровой котел турецкой промышленности производительностью 2 тонны пара в час с давлением пара 10 бар (рисунок 4.7);
- дизельный бак объемом 1000 lt;
- Количество воды, потребленной за 8 часов - 4 м³;
- Количество воды, потребленной за 24 часов-12 м³;
- Количество потребляемого дизельного топлива за 8 часов-100 литров;
- Количество потребляемого дизельного топлива за 24 часов-300 литров;



Рисунок 4.7 – Паровой котел турецкого изготовления

Потребность в горячей воде рассчитывается в соответствии с уравнением (4.19):

$$Q_{hw} = G_{hw} * (T_{hw} - T_{TW}) * 4.18 \quad (4.19)$$

Q_{hw} - потребность в энергии при использовании горячей воды (кДж);

G_{hw} - количество горячей воды (м³);

T_{hw} - температура горячей воды (°C);

T_{TW} - температура городской воды (°C).

Для расчета температуры городской воды можно использовать уравнение, выведенное Nabeshima(4.20)[88]:

$$T_{TW} = 1.28 + 0.19T_{a1} + 0.72T_{a2} \quad (4.20)$$

T_{a1} - среднесуточная температура наружного воздуха в данный день, (°C);

T_{a2} - средняя температура наружного воздуха за предыдущие семь дней, (°C).

Допущения:

Первый сценарий:

$$G_{hw} = 4 \text{ м}^3 / \text{сут горячей воды}$$

Подставляем в формулу (4.20) значения температур $T_{a1} = 31^\circ\text{C}$ и $T_{a2} = 28.93^\circ\text{C}$, получаем $T_{TW} = 28^\circ\text{C}$

Подставляя в уравнение (4.19) $G_{hw} = 4 \text{ м}^3 / \text{сут}$, $T_{hw} = 85^\circ\text{C}$, $T_{TW} = 28^\circ\text{C}$ можно определить, что количество тепловой энергии, передаваемой нагретой воде, составляет $264,73 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ ($953,04 \text{ МДж}$).

Энергия от коллектора используется непосредственно в течение солнечного дня (8 ч) для нагрева воды до котла.

Второй сценарий

Массовый расход теплоносителя в одном аккумуляторе составляет 0,15 л/мин, а общее время плавления - почти 7,7 ч. Таким образом, количество воды, нагреваемой за ночь составляет 68 л.

Необходимое количество аккумуляторов для накопления энергии с расходом воды $8 \text{ м}^3 / \text{сутки}$ (16 ч) = 117,6 т.е необходимо взять 118 штук.

Таким образом, количество накопленной тепловой энергии в ФТАМ для нагрева $8 \text{ м}^3 / \text{ночь}$ (16 ч) составляет $Q_S = 110,24 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ ($396,869 \text{ МДж}$)

Третий сценарий

Количество тепловой энергии, передаваемой 4 м^3 нагретой воды в течение солнечного дня, составляет $264,73 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ ($953,04 \text{ МДж}$)

Количество накопленной тепловой энергии в ФТАМ для нагрева $8 \text{ м}^3 / \text{ночь}$ (16 ч) составляет $Q_S = 110,24 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ ($396,869 \text{ МДж}$)

Общая энергия в этом случае составит $374,9715 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ ($1349,909 \text{ МДж}$)

Теплота солнечного коллектора

Фредерик [123] представил уравнение (4.21) для расчета площади плоского пластинчатого солнечного коллектора, необходимой для солнечной тепловой системы:

$$I_G A_C = Q_U + Q_{LOSS} + Q_{stg} \quad (4.21)$$

где I_G – величина солнечной радиации на единицу площади коллектора ($\text{кВт} \cdot \text{ч} / \text{м}^2 / \text{сут}$) (рисунок 1.2);

A_C - площадь поверхности коллектора (м^2);

Q_U - полезная энергия, передаваемая жидкости внутри трубок коллектора (Вт);

Q_{loss} (Потери)- потери тепла из коллектора (Вт);

Q_{stg} -энергия, накопленная в коллекторе [$Q_{stg} = 0$, из-за предположения, что солнечная тепловая система находится в стационарном состоянии] (Вт);

Тепловые потери от солнечного коллектора определяются по его эффективности (КПД), который определяется как отношение количества тепла, собранного теплоносителем, к количеству солнечного излучения, собранного пластинами коллектора.

Эль-Нашар [42] вывел уравнения (4.22) и (4.23) для расчета КПД плоского пластинчатого солнечного коллектора (η_c):

$$x = \frac{0,5(T_1 + T_2) - T_a}{I_G} \quad (4.22)$$

x - параметр солнечного коллектора ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{м}^2 / \text{кВт}$);

T_1 - температура теплоносителя во впускном коллекторе, ($^{\circ}\text{C}$);

T_2 - температура в выходном коллекторе, ($^{\circ}\text{C}$);

T_a - температура окружающей среды, ($^{\circ}\text{C}$);

$$\eta_c = 0,76 - 4,36X \quad (4.23)$$

Для нашей системы теплоснабжения выбран плоский пластинчатый коллектор, а эффективность плоских пластинчатых солнечных коллекторов, используемых в системе, равна

$$x = \frac{0,5(28 + 85) - 31}{2007,5} = 0,0127$$

$$\eta_c = 0,76 - 4,36 \cdot 0,0127 = 0,7046$$

Тепловые потери от солнечного коллектора рассчитываются из уравнения (4.24)

$$\eta_c = \frac{Q_U}{Q_U + Q_{loss}} \quad (4.24)$$

Задачей дальнейшего расчета является определение площади поверхности солнечного коллектора A_C .

Подставляя в уравнение (4.21) среднее значение I_G , которое составляет $5,5 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{м}^2 / \text{сут}$, тепловые потери составляют $Q_{loss} = 0,4192 Q_U$,

Для первого сценария $Q_U = 953,04 \text{ МДж}$, таким образом из уравнения 4.21 получаем:

$$5,5 \cdot 3600 \cdot A_c = Q_U + Q_{loss}$$

$$\text{Отсюда} \quad A_c = 68,31 \text{ м}^2$$

Для второго сценария $Q_U = 396,869 \text{ МДж}$, таким образом

$$A_c = 28,446 \text{ м}^2$$

Для третьего сценария

$$A_c = 96,75 \text{ м}^2$$

Методика выбора параметров и структуры теплоаккумулятора.

Для применения в солнечной системе выбран вертикальный кожухотрубный тепловой аккумулятор с 30 кольцевыми ребрами. Кольцевые медные ребра на наружной поверхности внутренней трубы толщиной t (0,6 мм) и высотой h (40 мм) распределены равномерно (интервал $D(32,27 \text{ мм})$). Парафин используется в качестве материала фазового перехода для хранения тепловой энергии и полностью заполняет кольцевое пространство.

Объем кольцевого пространства между внутренней трубой без ребра и оболочкой, содержащей ФТАМ:

$$V_A = \frac{\pi}{4} (D_{is}^2 - D_{oi}^2) \times L = \frac{\pi}{4} (0,128^2 - 0,035^2) \times 1 \text{ м} = 0,0119 \text{ м}^3$$

где D_{is} - внутренний диаметр корпуса (128 мм);

D_{oi} - наружный диаметр внутренней трубы (35 мм);

L - длина корпуса (1 м);

Объем одного кольцевого ребра:

$$V_f = \frac{\pi}{4} (D_f^2 - D_{oi}^2) \times t = 5,6548 \times 10^{-6} \text{ м}^3$$

где D_f - наружный диаметр ребра (115 мм);

t - толщина ребра (0,6 мм);

Общий объем 30 ребер:

$$V_{ft} = N \times V_f = 1,696 \times 10^{-4} \text{ м}^3$$

Объем ФТАМ внутри кольцевого пространства между внутренней трубкой с ребрами и оболочкой

$$V_{\text{ФТАМ}} = V_A - V_{ft} = 0.011731 \text{ м}^3$$

Объем ФТАМ для всех аккумуляторов (118):

$$V_{\text{В,ФТАМ}} = 1,384258 \text{ м}^3$$

Масса ФТАМ внутри кольцевого пространства между внутренней трубой с ребрами и оболочкой

$$M_{\text{ФТАМ}} = 10,1 \text{ кг}$$

Масса ФТАМ для всех аккумуляторов (118)

$$M_{\text{В,ФТАМ}} = 1191,8 \text{ кг}$$

Количество накопленной энергии для одного аккумулятора

$$Q_s = m[C_{sp}(T_m - T_i) + a_m \Delta h_m + C_{lp}(T_f - T_m)]$$

$$Q_s = 3,3633 \text{ МДж}$$

где $m_{\text{ФТАМ}}$ -масса парафина;

Δh_m -скрытая теплота парафина;

T_i - начальная температура парафина;

T_m - температура плавления парафина;

T_f - конечная температура парафина в конце зарядки;

C_{sp} и C_{lp} - удельные теплоемкости парафина в твердой и жидкой фазах соответственно.

Количество накопленной энергии для 118 аккумуляторов:

$$Q_s = 110,24 \text{ кВт} \cdot \text{ч} (396,869 \text{ МДж})$$

Аккумулятор с ФТАМ имеет объем $1,51842 \text{ м}^3$

Скорость подачи или отвода тепла во время зарядки или разрядки может быть найдена из следующего уравнения для теплоносителя:

$$Q_f = \dot{m}_{\text{НТФ}} \times C_{p,\text{НТФ}} \times \Delta T_f$$

где $\dot{m}_{\text{НТФ}}$ - массовый расход теплоносителя (воды);

$C_{p,\text{НТФ}}$ - удельная теплоемкость воды;

ΔT_f -разность температур между входным и выходным потоками воды;

Общая энергия, подаваемая или рекуперлируемая теплоносителем во время зарядки и разрядки, может быть найдена с помощью уравнения :

Δt - длительность каждого временного шага.

Общее количество воды, необходимое для котла, составляет $12 \text{ м}^3/24\text{ч}$. Солнечные коллекторы с площадью поверхности $A_c = 68,31 \text{ м}^2$ необходимы для получения горячей воды температурой 85 (358 К) и количеством воды $4 \text{ м}^3/8\text{ч}$ во время дневного использования. Горячая вода из остальных солнечных коллекторов с площадью поверхности $A_c = 28,446 \text{ м}^2$ используется для хранения энергии в аккумуляторах. Массовый расход на входе в один блок аккумулятора выбирается равным 0,15 л/мин в процессе зарядки. Для получения количества воды $8 \text{ м}^3/16\text{ч}$ в течение ночи и процесса застывания массовый расход на входе в один блок аккумулятора выбирается равным 0,15 л/мин. Необходимое количество единиц аккумулятора для накопления энергии для получения $8 \text{ м}^3/сутки$ (16 ч) составляет 118. Половина аккумуляторов будет работать в первые 8 часов, а другая половина аккумуляторов будет работать во вторые 8 часов.

Количество ребер аккумулятора выбрано 30 в соответствии с рисунками 3.25 и 3.26. Направление потока выбирается снизу вверх в соответствии с рисунком 3.22. Расход принимается 0,15 л/мин в соответствии с рисунками 3.19-3.21.

На рисунке 4.8 показаны входная и выходная температуры теплоносителя в процессе зарядки при расходе 0,15 л/мин. Выходная температура низкая в начале зарядки. Затем температура со временем повышается. Это связано с повышением температуры парафина и его переходом в жидкое состояние.

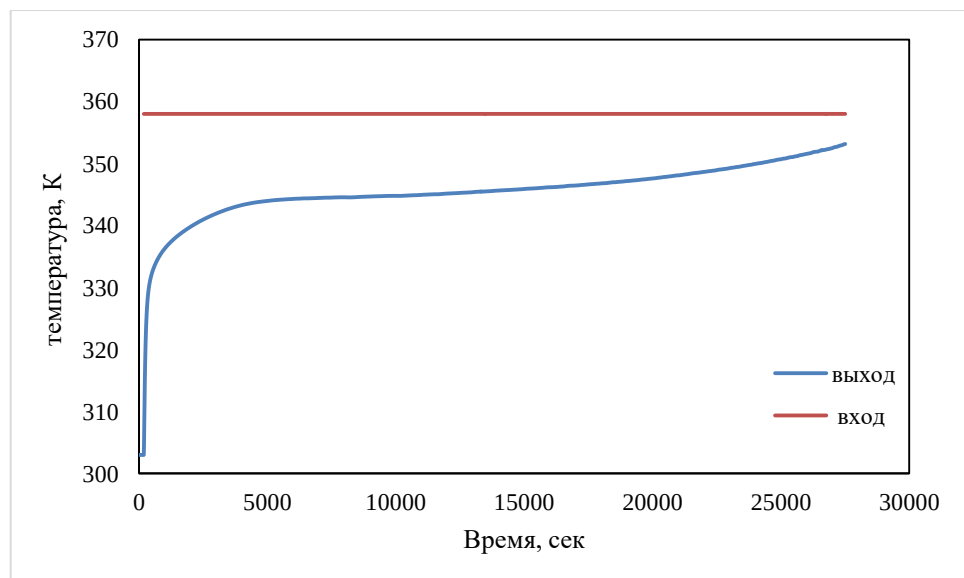


Рисунок 4.8 – Температура на входе и выходе теплоносителя в процессе загрузки при расходе 0,15 л/мин

На рисунке 4.9 показаны входная и выходная температуры теплоносителя в процессе разрядки аккумулятора при расходе 0,15 л/мин. Выходная температура теплоносителя высока в

начале разрядки. Затем со временем температура снижается. Это связано с понижением температуры парафина и уменьшением количества накопленной энергии со временем.

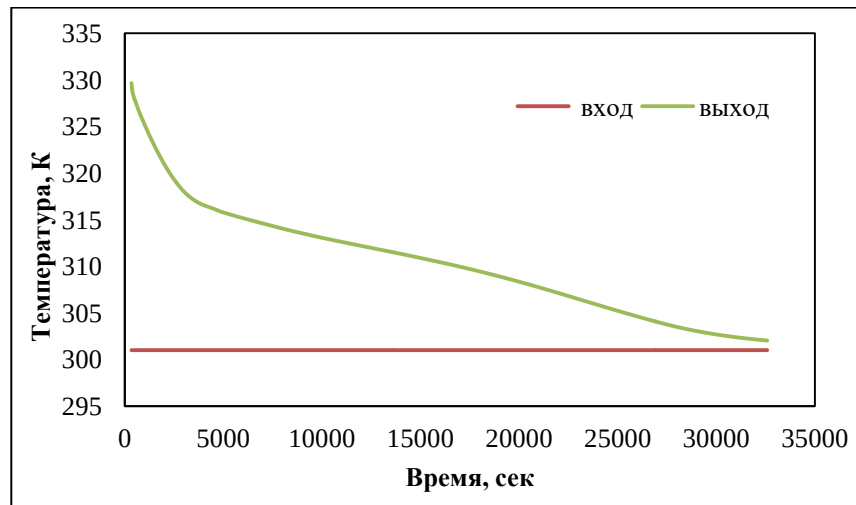


Рисунок 4.9 – Температура на входе и выходе теплоносителя в процессе разрядки при расходе 0,15 л/мин

На рисунке 4.10 показан закон отбора энергии в одном аккумуляторе в процессе разрядки при расходе 0,15 л/мин. Количество расходуемого тепла велико в начале разрядки. Затем количество отбираемого тепла со временем уменьшается. Это происходит из-за уменьшения разности температур между входом и выходом воды из-за повышения температуры парафина и уменьшения количества накопленной энергии со временем. Объем отобранной энергии достигает 80,2% через 5 часов. Отбор остальной части энергии занимает больше времени до полного застывания.

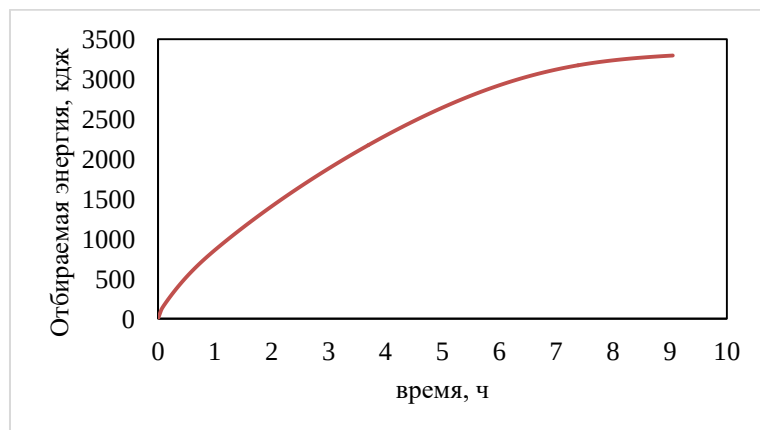


Рисунок 4.10- График отбора энергии в одном аккумуляторе в процессе разрядки при расходе 0,15 л/мин

На рисунке 4.11 показан процесс отбора энергии из накопленной энергии во всех аккумуляторах в процессе разрядки при расходе 0,15 л/мин. Видно, что половина отобранной

энергии из аккумуляторов происходит в первые 8 часов, а другая половина отобранной энергии из аккумуляторов - во вторые 8 часов.

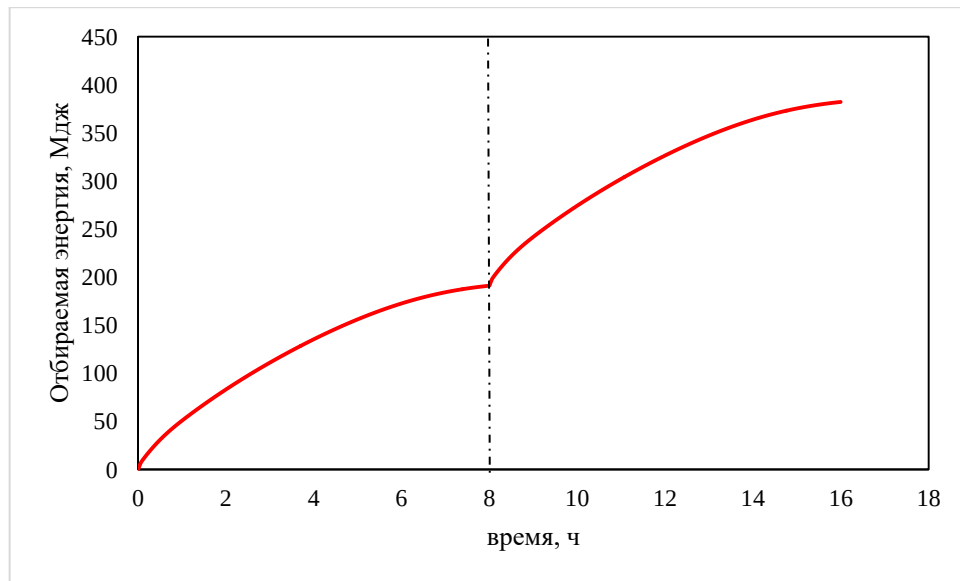


Рисунок 4.11 – График отбора энергии в системе аккумуляторов в процессе разрядки при расходе 0,15 л/мин

Экономический анализ использования системы аккумулярования тепла с ФТАМ

Исходные данные для экономического анализа:

- Цена на дизельное топливо в Египте - 0,429 \$/литр;
- Общая цена дизельного топлива, потребляемого за 24 часа =
 $\text{количество потребляемого дизельного топлива за 24 часа} \times \text{цена на дизельное топливо в Египте} = 300 \times 0,429 = 128,7 \text{ $/сутки};$
- Общая цена потребляемого дизельного топлива в год=
 $\text{Общая стоимость дизельного топлива, потребляемого в сутки (24 часа)} \times 365 = 46975,5 \text{ $/ год};$
- Один литр дизельного топлива имеет энергетическое содержание примерно 10 кВт * ч;
- Общая энергия от дизельного топлива в течение года =
 $\text{Количество дизельного топлива, потребляемого за 24 часа (литры)} \times \text{энергия одного литра дизельного топлива} \times 365 = 1095 \text{ МВт*ч (3942 ГДж)}$

Первый сценарий:

- Общая экономия дизельного топлива в сутки =

$$\frac{\text{Количество тепловой энергии, передаваемой нагретой воде}}{\text{Энергия одного литра дизельного топлива}} = \frac{264,73}{10} = 26,47 \text{ литров}$$

- Общая экономия дизельного топлива в год =
 $\text{Общая экономия дизельного топлива в сутки} \times 365 = 9662,645 \text{ литров}$
- Общая цена сэкономленного дизельного топлива в год =
 $\text{цены на дизельное топливо в Египте (0,429 \$/литр)} \times \text{Общая экономия дизельного топлива в год(литры)} = 4145,27 \text{ \$/год;}$
- Снижение использованного дизельного топлива за счет солнечной системы=
 $(\text{Количество дизельного топлива, потребленного за 24 часа (литры)} \text{ после использования солнечной энергии} - \text{Количество дизельного топлива, потребленного за 24 часа (литры) без солнечной энергии}) / \text{Количество дизельного топлива, потребленного за 24 часа (литры) без солнечной энергии} = 8,82 \text{ \%};$
- Общая полезная энергия в течение года = $\text{Количество тепловой энергии, передаваемой нагретой пресной воде в сутки} \times 365 = 96,6264 \text{ МВтч (347,8596 ГДж);}$
- Общая цена сэкономленного дизельного топлива за 20 лет =
 $\text{Общая цена сэкономленного дизельного топлива в год} \times 20 = 82905.4 \text{ \$}$

Второй сценарий:

- Общая экономия дизельного топлива в сутки =
 $\frac{\text{Количество тепловой энергии, передаваемой нагретой воде}}{\text{Энергия одного литра дизельного топлива}} = \frac{110,24}{10} = 11,024 \text{ литров;}$
- Общая экономия дизельного топлива в год =
 $\text{Общая экономия дизельного топлива в сутки} \times 365 = 4023,76 \text{ литров;}$
- Общая цена сэкономленного дизельного топлива в год =
 $\text{цены на дизельное топливо в Египте (0,429 \$/литр)} \times \text{Общая экономия дизельного топлива в год(литры)} = 1726,2 \text{ \$/год;}$
- Снижение использованного дизельного топлива за счет солнечной системы=
 $(\text{Количество дизельного топлива, потребленного за 24 часа (литры)} \text{ после использования солнечной энергии} - \text{Количество дизельного топлива, потребленного за 24 часа (литры) без солнечной энергии}) / \text{Количество дизельного топлива, потребленного за 24 часа (литры) без солнечной энергии} = 3,67 \text{ \%};$
- Общая полезная энергия в течение года =
 $\text{Количество тепловой энергии, передаваемой нагретой воде в сутки} \times 365 = 40,2376 \text{ МВтч (144,857185 ГДж);}$

- Общая цена сэкономленного дизельного топлива за 20 лет =

$$\text{Общая цена сэкономленного дизельного топлива в год} \times 20 = 34523,86 \$$$

Третий сценарий:

- Общая экономия дизельного топлива в сутки =

$$\text{Общая экономия дизельного топлива в сутки по первому сценарию} + \text{Общая экономия дизельного топлива в сутки по второму сценарию} = 37,5 \text{ литра};$$

- Общая экономия дизельного топлива в год =

$$\text{Общая экономия дизельного топлива в год по первому сценарию} + \text{Общая экономия дизельного топлива в год по второму сценарию} = 13685,31 \text{ литра};$$

- Общая цена сэкономленного дизельного топлива в год =

$$\text{Общая цена сэкономленного дизельного топлива в год по первому сценарию} + \text{Общая цена сэкономленного дизельного топлива в год по второму сценарию} = 5871 \$/\text{год};$$

- Снижение использования дизельного топлива за счет солнечной системы =

$$\text{Снижение использования дизельного топлива за счет солнечной системы по первому сценарию} + \text{Снижение использования дизельного топлива за счет солнечной системы по второму сценарию} = 12,5 \%;$$

- Общая полезная энергия в течение года =

$$\text{Общая полезная энергия в течение года по первому сценарию} + \text{Общая полезная энергия в течение года по второму сценарию} = 136,864 \text{ МВт} \cdot \text{ч} (492,716785 \text{ ГДж});$$

- Общая цена сэкономленного дизельного топлива за 20 лет =

$$\text{Общая цена сэкономленного дизельного топлива за 20 лет по первому сценарию} + \text{Общая цена сэкономленного дизельного топлива за 20 лет по второму сценарию} = 117420 \$$$

В таблице 4.1 приведено экономическое исследование различных систем. Общая стоимость сэкономленного дизельного топлива в год составляет 4145,27, 1726,2, 5871 долл. для первого, второго и третьего сценариев соответственно. Общая стоимость дизельного топлива, сэкономленного за 20 лет, составляет 82905,4, 34523,86 и 117420 долларов соответственно для первого, второго и третьего сценариев.

Таблица 4.1 – Экономическое исследование различных систем

	концепция	Первый сценарий	Второй сценарий	Третий сценарий
Капитальные затраты (долл.)				
Солнечный Коллектор	92 \$/2m ² [87]	3128	1308,5	4436,5
Материал (ФТАМ)	0,82 \$/kg [93]	-	977,276	977,276
Тепловой аккумулятор	\$	-	1800	1800
Эксплуатационные затраты	7% от капитальных затрат[44]	218,96	286	504,964
Общие Капитальные Затраты		3346,96	4371,78	7718,74
Экономия топлива за год	\$	4145,27	1726,2	5871
Экономия топлива за 20 лет	\$	82905,4	34523,86	117420

Оценка воздействия системы аккумулярования теплоты с ФТАМ на окружающую среду

В последние годы многие экологические проблемы стали очевидными благодаря их ощутимому воздействию на естественный баланс земной жизни. Загрязнение окружающей среды является следствием деятельности человека, особенно в промышленной сфере. В развивающихся странах проблема изменения климата не имеет большого значения. Вопросы чистой воды, продовольственной безопасности и сокращения бедности являются для этих стран более важными, чем проблема изменения климата [81]. Последствия этого экстремального загрязнения окружающей среды проявились в:

- Глобальное потепление. Из-за увеличения выбросов CO₂ многие части Земли сталкиваются с необычным повышением своей температуры и это приводит к таянию льда на северном и южном полюсах. Действительно, некоторые исследования показали, что лед в некоторых местах уже начал таять. В результате уровень моря повышается и это приводит к экстремальным последствиям для многих частей земли.
- Истощение озонового слоя. Озоновый слой, который поглощает большую часть ультрафиолетового солнечного света, истощается, эти ультрафиолетовые излучения оказывают очень опасное воздействие на человека, растения и животных.
- Кислотные дожди. Когда SO₂ и NO_x реагируют с H₂O, образуется смесь серной кислоты и азотной кислоты, а затем выпадают, образуя кислотные дожди. Эти кислотные дожди наносят ущерб сельскохозяйственным угодьям, растениям, воде в реках и зданиям.

Концентрация углекислого газа в атмосфере Земли в настоящее время составляет почти 412 частей на миллион (ppm) и растет. Это представляет собой 47-процентный рост с начала

индустриальной эпохи, когда концентрация была около 280 ppm, и 11-процентный рост с 2000 года, когда она была около 370 ppm [28]. Многие усилия предпринимаются для того, чтобы сократить выбросы загрязняющих веществ и защитить окружающую среду.

Предотвращенные выбросы с помощью предлагаемой системы

В таблице 4.2 приведены стандартные значения выбросов для различных видов ископаемого топлива [120]. Система будет производить энергию 347,8 ГДж, 144,8 ГДж и 492,7 ГДж в год) для первого, второго и третьего сценариев. В таблице 4.3 показано количество вредных выбросов, которых эта система будет избегать ежегодно для трех сценариев.

Таблица 4.2 – Выбросы от различных видов ископаемого топлива, приведены в кг на ГДж .

Эмиссия	дизельное топливо
Углекислый газ	70,4933
Монооксид углерода	0,0141
Оксиды азота	0,1925
Диоксид серы	0,4822
Твердые частицы	0,0361
Ртуть	0,000003

Таблица 4.3 – Уменьшение ежегодных выбросов в кг.

Эмиссия	дизельное топливо		
	Первый сценарий	второй сценарий	третий сценарий
Углекислый газ	24521,77	10211,46	34733,23
Монооксид углерода	4,9	2,0424	6,9424
Оксиды азота	66,96	27,885	94,845
Диоксид серы	167,737	69,85	237,587
Твердые частицы	12,557	5,229	17,786
Ртуть	0,001043	0,00043457	0,00147757

На рисунке 4.12 показан процент годовых выбросов CO₂ из котла, если источником энергии является дизельное топливо и солнечная энергия для трех сценариев.

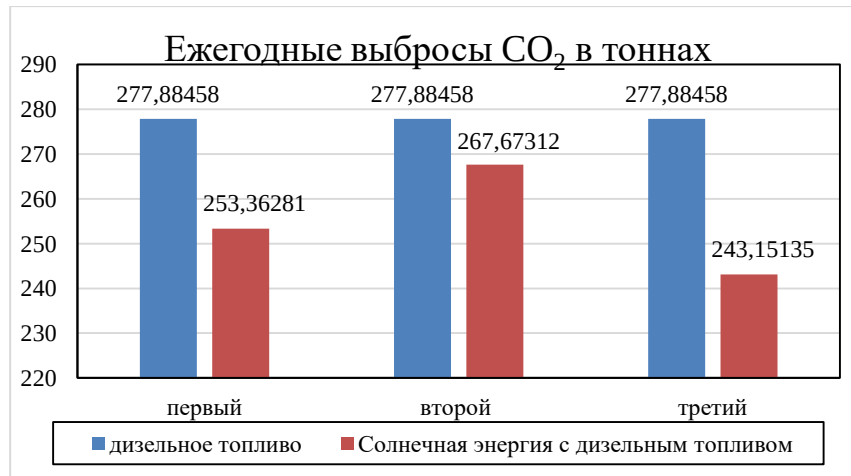


Рисунок 4.12 – Ежегодные выбросы CO₂ в тоннах для случаев использования дизельного топлива и солнечной энергии для трех вариантов системы солнечного теплоснабжения.

Применение различных солнечных систем в Египте позволило бы избежать выбросов CO₂ в год в количестве 24,5 тонн, 10,2 тонн и 34,7 тонн для первого, второго и третьего сценариев построения систем солнечного теплоснабжения соответственно .

4.5 Выводы по главе 4

В четвертой главе решена пятая задача исследования - разработана инженерная методика создания систем аккумулирования теплоты с ФТАМ для солнечного теплоснабжения.

Система солнечного теплоснабжения предусматривает комбинированный вариант построения источника с использованием котельной установки и системы аккумулирования тепла с ФТАМ.

Произведен экономический анализ использования системы аккумулирования тепла с ФТАМ.

Снижение потребления дизельного топлива за счет использования солнечной системы составляет 8,82, 3,67 и 12,5% для первого, второго и третьего сценариев соответственно.

Общая стоимость сэкономленного дизельного топлива в год составляет 4145,2; 1726,2 и 5871 долларов для первого, второго и третьего сценариев соответственно. Общая стоимость дизельного топлива, сэкономленного за 20 лет, составляет 82905,4\$, 34523,86 \$ и 117420 \$ для первого, второго и третьего сценариев соответственно.

Произведена оценка воздействия системы аккумулирования теплоты с ФТАМ на окружающую среду и произведен расчет количества предотвращенных выбросов. Применение различных солнечных систем в Египте позволило бы избежать выбросов CO₂ в год в количестве 24,5 тонн, 10,2 тонн и 34,7 тонн для первого, второго и третьего сценариев построения систем солнечного теплоснабжения соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой предлагается новое решение актуальной научной задачи - повышение эффективности систем аккумулирования теплоты в солнечных системах теплоснабжения путем использования материалов с фазовым переходом.

По результатам выполненной диссертационной работы сделаны следующие выводы и рекомендации:

1. Проведен анализ материалов с фазовым переходом. Разработаны требования к материалам, а также критерии их выбора. Разработана методика выбора ФТАМ на основе метода анализа иерархий. Показано, что в наибольшей степени критериям выбора соответствует парафин, который используется как рабочее тело в дальнейших исследованиях.

2. Разработана численная модель процессов изменения свойств материала с фазовым переходом при плавлении и затвердевании в ФТАМ на основе двумерных CFD-моделей с использованием программного обеспечения ANSYS/FLUENT.

При разработке модели использован метод энтальпии-пористости. С помощью модели исследованы эффекты естественной конвекции и кондуктивного теплообмена в ФТАМ. Численные результаты, полученные в данном исследовании, были подтверждены сравнением с опубликованными экспериментальными результатами.

3. Проведено исследование поведения ФТАМ в вертикальном кожухотрубном ТА с поперечными ребрами. Определено влияние числа ребер на полное время плавления. Показано, что при увеличении числа ребер более 30 снижения времени плавления ФТАМ не происходит.

В работе также проведены исследования влияния основных эксплуатационных и конструктивных параметров на режим работы ТА: влияние температуры на входе и расхода теплоносителя на время плавления парафина, влияние скорости потока теплоносителя на время затвердевания парафина, влияние направления потока на параметры и время плавления, а также влияние изменения внутреннего диаметра трубки с ФТАМ на время плавления парафина при $T=358\text{K}$ и расходе теплоносителя 5л/мин.

Рассмотрены вопросы оптимизации параметров ребер, таких как количество ребер, шаг ребер, геометрические параметры (длина и толщина ребер).

4. Проведено исследование поведения ФТАМ в горизонтальном кожухотрубном ТА с продольным размещением ребер. Моделирование оригинальной конструкции ТА (патент на полезную модель) с разветвленной системой продольных ребер показало повышение теплопередачи и, следовательно, сокращение времени плавления и затвердевания примерно на 50% и 68% соответственно по сравнению с традиционной схемой продольного оребрения.

Результаты диссертационных исследований могут быть использованы в проектной и конструкторской документации при разработке систем аккумулирования теплоты, при выполнении научно-исследовательских работ в области повышения эффективности теплоэнергетических систем, а также в учебном процессе для направления подготовки «Теплоэнергетика и теплотехника».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Амер А. Э.** Выбор материалов с фазовым переходом с использованием метода анализа иерархий (МАИ)/ А. Э. Амер, К. Рахмани, В. А. Лебедев // Международный научно-исследовательский журнал. – 2020. — № 6 (96) Часть 1. — С. 35—48.
2. **Амер А.Э.** Влияние термоциклирования на выбор рабочего тела с фазовым переходом для теплоаккумуляторов систем солнечного теплоснабжения/ А.Э. Амер А.Э., В.А. Лебедев // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2020. – Т. 24. – № 3. – С. 570–581.
3. Бабаев. Б. Д. Разработка и исследование энергосистем на основе возобновляемых источников с фазопереходным аккумулированием тепла: Дис. на соискание ученой степени док.техн. наук. – Махачкала: Даге-станский государственный университет, 2016/ Б. Д. Бабаев –2016. –С. 9-10.
4. Кругликов П.А. . Перспективы использования систем аккумулирования тепла на атом-ных электрических станциях/ П.А. Кругликов, В.А. Лебедев, С.А. Рудченко// Сб. трудов Международной научно-практической конференции,» «Энергоэф-фективность энергетического оборудования», том 1, 8-9 октября 2014 г., СПб, НМСУ «Горный», – С. 204-210.
5. Куколев, М.И. Модели тепловых процессов в накопителях энергии для обоснования проектных решений. : Дис. на соискание ученой степени д-ра тех. наук. – Петрозаводский государственный университет; Санкт-Петербургский государственный политехнический университет / М.И. Куколев // 2006.
6. Лебедев В.А. Проблема накопления и сохранения тепловой энергии в теплоэнергетике. Состояние и пути решения/ В.А. Лебедев, **А. Амер** // Современные образовательные технологии в подготовке специалистов для минерально-сырьевого комплекса: Сб. науч. Трудов II Всероссийской науч. конф. (г. Санкт-Петербург, 27–28 сент. 2018 г.). Санкт-Петербург. – 2018. – С. 929–935.
7. Осташенков А.П. Аккумулятор теплоты на фазовых переходах со шнековым теплообменником / А.П.Осташенков, Е.М.Онучин и А.А.Медяков // Научный журнал КубГАУ. – 2013. – №91(07) . – С. 1-12.
8. Патент на полезную модель № 202 391 Российская Федерация . МПК F24H 7/00, F24D 11/002. Аккумулятор теплоты с фазовым переходом: № 2020139947: заявл. 04.12.2020 : опубл. 16.02.2021. бюллетень полезные модели. № 5 / **Амер А. Э. А. А.**, Лебедев В.А. // заявитель и патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». – 7 с.

9. Умеренков Е.В. Моделирование процесса разрядки фазопереходного аккумулятора теплоты кожухотрубного типа// Е.В.Умеренков и Э. В. Котенко / Научный вестник ВГАСУ. Строительство и архитектура. – 2011. – № 1(21) . – С. 34-39.
10. Abdulateef, A. Experimental and computational study of melting phase-change material in a triplex tube heat exchanger with longitudinal/triangular fins. / A. Abdulateef, S. Mat, K. Sopian, J. Abdulateef и A. .. Gitan // Solar Energy. – 2017. – Vol. 155. – P. 142-153.
11. Abhat, A. Development of a modular heat exchanger with an integrated latent heat storage/ A. Abhat, D. Heine, M. Heinisch, N. A. Malatidis, G. Neuer, // Germany Ministry of Science and Technology Bonn. –1981. – №. BMFT FBT 81-050.
12. Agyenim F. A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS)/ F. Agyenim, N. Hewitt, P. Eames , M. Smyth // Renewable and Sustainable Energy Reviews. –2010. –Vol. 14. –No. 2. –P. 615–628. DOI:10.1016/j.rser.2009.10.015.
13. Akgun M. Thermal Energy Storage Behavior of a Paraffin during Melting and Solidification / M. Akgun, O. Aydin, K. Kaygusuz // Energy Sources, Part A. –2007. –Vol. 29. –P. 1315–1326.
14. Akgün M. Thermal energy storage performance of paraffin in a novel tube-in-shell system/ M. Akgün, O. Aydın , K. Kaygusuz // Applied thermal engineering. – 2008. – Vol. 28. – № 5-6. – P. 405-413.
15. Akrami M. A Zero-Liquid Discharge Model for a Transient Solar-Powered Desalination System for Greenhouse/ M. Akrami, A. Salah, M. Dibaj, M. Porcheron, A. Javadi, R. Farmani, H. Fath, A. Negm // Water. – 2020. –Т. 12, –№ 5. –P. 1440 .
16. Al-abidi A. A. CFD applications for latent heat thermal energy storage: a review./ A. A. Al-abidi, S. Bin Mat, K. Sopian, M. Y. Sulaiman , A. T. Mohammed // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2013. – Vol. 20. – P. 353-363.
17. Al-Abidi, A.A. Internal and external fin heat transfer enhancement technique for latent heat thermal energy storage in triplex tube heat exchangers/ A. A. Al-Abidi, S. B. Mat, K. Sopian, M. Y. Sulaiman, A. T. Mohammad // Applied Thermal Engineering. – 2013. –Vol. –53 (1). – P. 147-156.
18. Al-Hinti I. Experimental investigation on the use of water-phase change material storage in conventional solar water heating systems / I. Al-Hinti, A. Al-Ghandoor, A. Maaly, I. Abu Naqeera, Z. Al-Khateeb и O. ., Al-Sheikh // Energy Convers. Manag. – 2010. – Vol. 51. – № 8. – P. 1735–1740.
19. Alkan, C. Preparation, thermal properties and thermal reliability of form-stable paraffin/polypropylene composite for thermal energy storage / C. Alkan, K. Kaya и A. Sari // Polymers and the Environment. – 2009. –V. 17. –P. 254–258.

20. Aly K. Enhancement of solidification rate of latent heat thermal energy storage using corrugated fins./ K. Aly, A. El-Lathy, M. Fouad // Journal of Energy Storage. –2019. – Vol. 24. –P. 100785.
21. **Amer A. E. A.** Thermal Energy Storage by Using Latent Heat Storage Materials / A. E. A. Amer и V. Lebedev // International Journal of Scientific & Engineering Research. –2018. – Vol. 9. –№ 5. –P. 1442-1447.
22. **Amer A. E.** Using the Analytic Hierarchy Process (AHP) method for selection of phase change materials for solar energy storage applications/ A. E. Amer, K. Rahmani, V. A. Lebedev // J. Phys. Conf. Ser. – 2020. – Vol. 1614. – No. 1. – P. 012022.
23. **Amer A.E.** Numerical Investigations on Latent Heat Storage Unit using Phase Change Material/ A.E. Amer, V. A. Lebedev // J. Phys. Conf. Ser. – 2020 – Vol. 1565. – No. 1. – P. 012099.
24. **Amer, A.E.** Numerical Investigations on Latent Heat Storage Unit using Phase Change Material/ A.E. Amer, V. A. Lebedev // В сборнике: Thermophysics and Power Engineering in Academic Centers, ТРЕАС-2019. Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием. – 2019. – С. 24-25.
25. Annual report of New & Renewable Energy Authority, 2007/2008, Cairo, Egypt.
26. ANSYS FLUENT 14.0 Theory Guide, : ANSYS, Inc, 2011.
27. Atlam B. Assessing the Future of Energy Security in Egypt./ B. Atlam и A. Rapiea// International Journal of Energy Economics and Policy. – 2016. – VOL. 6. – № 4. – P. 684-700., 2016.
28. Available: – URL: <https://climate.nasa.gov/news/2915/the-atmosphere-getting-a-handle-oncarbondioxide/#:~:text=The%20concentration%20of%20carbon%20dioxide,it%20was%20near%20370%20ppm>. (дата обращения: 08.02.2021). – Текст: электронный.
29. Baetensa R. Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review./ R. Baetensa, B. P. Jelle и Arild Gustavsen // Energy and Buildings. – 2010. – Vol. 42. – P.1361–1368.
30. Bajnóczy G. Heat storage by two-grade phase change material / G. Bajnóczy, E. G. Pálffy, E. Prépostffy , A. Zöld // Periodica Polytechnica Ser. Chem. Eng. –1999. – VOL. 43. – NO. 2. – P.137–147.
31. Baran G. Phase change and heat transfer characteristics of a eutectic mixture of palmitic and stearic acids as PCM in a latent heat storage system / G. Baran и A. Sari // Energy Conversion and Management. –2003. –Vol.44. –P. 3227–3246.
32. Barnes F. S. Large Energy Storage Systems./ F. S. Barnes и J. G. Levine// Taylor & Francis Group, LLC,. –2011.
33. Cabeza L. Experimentation with awater tank including a PCM module / L. Cabeza, M. Ibanez, C. Sole, J. Roca и M. Nogues // Solar Energy Mater Solar Cells. –2006. –Vol. 90. – P. 1273–1282.

34. Cabeza L. Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review./ L. Cabeza, A. Castell, C. Barreneche, A. d. Gracia, A. Fernández // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2011. – Vol.15. – P. 1675–1695.
35. Cabeza, L. Immersion corrosion tests on metal-salt hydrate pairs used for latent heat storage in the 48 to 58 °C temperature range / L. Cabeza, J. Roca, M. Nogués, H. Mehling и S. Hiebler // *Materials and Corrosion*. – 2002. – V. 53. – P. 902–907.
36. Canbazoglu S. Enhancement of solar thermal energy storage performance using sodium thiosulfate pentahydrate of a conventional solar water-heatingsystem / S.Canbazoglu, A. S,ahinaslan, A. Ekmekyapar, Y. G. Aksoy и A. F.// *Energy Build*. –2005. –Vol. 37. –P. 235–242.
37. Chong K. K. Study of a solar water heater using stationary V-trough collector / K.K. Chong, K. G. Chay, and K. H. Chin // *Renewable energy*. – 2012 . – Vol. 39(1). – P. 207-215.
38. Chorin A. J. Numerical solution of the Navier-Stokes equations. / A. J. Chorin // *Mathematics of computation*. – 1968. – Vol. 22(104). – P. 745-62.
39. Crank J. Free and Moving Boundary Problems / J. Crank // Oxford, UK: Clarendon Press. – 1987.
40. Darzi A. R. Numerical study of melting inside concentric and eccentric horizontal annulus/ A. R. Darzi, M. Farhadi, K. Sedighi // *Applied Mathematical Modelling*. – 2012. – Vol. 36 (9). – P. 4080-4086.
41. Egypt Energy Situation– URL: https://energypedia.info/wiki/Egypt_Energy_Situation. (дата обращения: 25.01.2021). – Текст: электронный.
42. El-Nashar, A. M. The economic feasibility of small solar MED seawater desalination plants for remote arid areas / A. M. El-Nashar // *Desalination*. – 2001. – Vol. 134(1-3). – P.173-186.
43. El-Sebaili, A.A. Fast thermal cycling of acetanilide and magnesium chloride hexahydrate for indoor solar cooking/ A.A.El-Sebaili, S.Al-Amir, F. Al-Marzouki, A. Faidah, A. Al-Ghamdi и S.Al-Heniti // *Energy Conversion and Management*. – 2009. – V. 50. – P. 3104–3111.
44. Eltawil, M.A. A review of renewable energy technologies integrated with desalination systems / Eltawil, M.A., Zhengming, Z. and Yuan, L // *Renewable and sustainable energy reviews*. – 2009. – Vol. 13(9). – P.2245-2262.
45. Esen M. Geometric design of solar-aided latent heat store depending on various parameters and phase change materials / M. Esen , A. Durmus, A. Durmus // *Solar Energy*. – 1998. – Vol. 62(1) – P. 19–28
46. Farid M. M. A review on phase change energy storage: materials and applications./ M. M. Farid, A. M. Khudhair, S. A. K.Razack , S. A.-H//*Energy Conversion and Management* . – 2004. – Vol. 45. – P. 1597–1615.

47. GEF5 CEO Endorsement Template-February 2013.doc.-2014. – URL: <http://ccbasilea-crestocolmo.org.uy/wp-content/uploads/2019/05/GEF-GMP2-AFRICA-Project-Document.pdf>
48. Gibbs, B.M. DSC study of technical grade phase change heat storage materials for solar heating applications / B.M. Gibbs, S.M. Hasnain, // Sol. Energy Eng. Asme. – 1995. – Vol. 2, – P. 1053–1062.
49. Gong Z. Finite-element analysis of cyclic heat transfer in a shell and tube latent heat energy storage exchanger/ Z. Gong, A. S. Mujumdar // Applied Thermal Engineering. – 1997. – Vol. 17(4). – P. 583–91.
50. Gracia A. d. Thermal analysis of including phase change material in a domestic hot water cylinder./ A. d. Gracia, E. Oró, M. Farid, L. Cabeza// Applied Thermal Engineering. – 2011. –Vol. 31. – P. 3938-3945.
51. Gu, Z. Thermal energy recovery of air conditioning system—heat recovery system calculation and phase change materials development / Z. Gu, H. Liu и Y. Li // Applied Thermal Engineering. – 2004. – Vol. 24. – P. 2511–2526.
52. Guellil H. Experimental study of the performance of a novel latent heat charging unit on charging and discharging processes/ H. Guellil, A. Korti , S. Abboudi // Heat and Mass Transfer. – 2019. – Vol. 55. – № 3. – P. 855-866.
53. Gumus M. Application of phase change materials to pre-heating of evaporator and pressure regulator of a gaseous sequential injection system / M. Gumus и A. Ugurlu // Applied Energy. – 2011. – Vol. 88. – P. 4803–4810.
54. Guo C .Numerical simulation and parametric study on new type of high temperature latent heat thermal energy storage system / C. Guo и W. Zhang // Energy Convers. Manage. – 2008. – Vol. 49. – P. 919–927.
55. Hadjieva M. Thermophysical properties of some paraffins applicable to thermal energy storage./ M. Hadjieva, S. Kanev и J. Argirov// Sol. Energy Mater. Sol. Cells. – 1992. – Vol. 27. – P. 181–187.
56. Haillot, D. High performance storage composite for the enhancement of solar domestic hot water systems Part 2: Numerical system analysis / Haillot D., Nepveu F., Goetz V., X. Py, M. Benabdelkarim // Solar Energy. –2012. –Vol. 86. –P. 64–77.
57. Hasan A. Some fatty acids as phase-change thermal energy storage materials/ A. Hasan и A. Sayigh // Renew. Energy. –1994. – Vol. 4. – P. 69–76.
58. He, M. Experimental studies on cycling stable characteristics of inorganic phase change material $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ - $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ modified with $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ and CMC / M. He, L. Yang и Z. Zhang // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science . – 2018. –V. 108. – P. 1-15.

59. Hegazy K. Occasional Paper on Egypt's Energy Sector: Regional Cooperation Outlook and Prospects of Furthering Engagement with The Energy Charter./ K. Hegazy // Energy Charter Secretariat Knowledge Centre.— 2015. P. 1-21. — URL: https://energycharter.org/fileadmin/DocumentsMedia/Occasional/Egypt_and_the_Charter.pdf.
60. Ho C. Preparation and thermophysical properties of nanoparticle-inparaffin emulsion as phase change material / C. Ho и G. GaoJ.Y., // Int. Commun. Heat Mass Transf. — 2009. — Vol. 36. —№ (5) . — P. 467–470.
61. Horbaniuc B. Mathematical models for the study of solidification within a longitudinally finned heat pipe latent heat thermal storage system / B. Horbaniuc, G. Dumitrascua, A. Popescub // Energy Conversion & Management. — 1999. — Vol. 40. — P. 1765–74.
62. Hosseini M., A combined experimental and computational study on the melting behavior of a medium temperature phase change storage material inside shell and tube heat exchanger / M. Hosseini, A. Ranjbar, K. Sedighi и M. Rahimi // Int. Commun. Heat Mass Transf. — 2012.— Vol. 39. — P. 1416–1424.
63. Hosseini, M. Experimental and computational evolution of a shell and tube heat exchanger as a PCM thermal storage system/ M. Hosseini, M. Rahimi, R. Bahrampoury // International Communications in Heat and Mass Transfer. — 2014. —Vol. 50. — P.128-136.
64. Hosseini, M.J. Experimental and computational evolution of a shell and tube heat exchanger as a PCM thermal storage system/ M.J. Hosseini, M. Rahimi, R. Bahrampoury // International Communications in Heat and Mass Transfer. — 2014. —Vol. 50. — P.128-136.
65. IEA World Energy Balances 2020 — URL: <https://www.iea.org/subscribe-to-data-services/world-energy-balances-and-statistics>. (дата обращения: 25.01.2021). — Текст: электронный.
66. IRENA (2018), Renewable Energy Outlook: Egypt, International Renewable Energy Agency.Abu Dhabi. — URL: <https://www.irena.org/publications/2018/Oct/Renewable-Energy-Outlook-Egypt>. — Текст: pdf.
67. Ismail K. A. R. Numerical and experimental study on the solidification of PCM around a vertical axially finned isothermal cylinder/ K. A. R. Ismail, C. L. F. Alves, M. S. Modesto // Applied Thermal Engineering. — 2001. — Vol. 21— P. 53-77.
68. Ismail K. Parametric study of solidification of PCM around a cylinder for ice-bank applications./ K. Ismail и d. J. A. Batista // International journal of refrigeration . — 2001. — Vol.24. — Iss. 8. — P.809-822.

69. Joulin, A. A numerical study of the melting of phase change material heated from a vertical wall of a rectangular enclosure / A. Joulin, Z. Younsi, L. Zalewski, D. R. Rousseau и S. Lassue // *International Journal of Computational Fluid Dynamics* . – 2009. – Vol. 23(7) . – P. 553- 56.
70. Kalaiselvam S. Thermal Energy Storage, Technologies for Sustainability, Systems Design, Assessment and Applications. / S. Kalaiselvam и R. Parameshwaran // Elsevier Inc. –2014.
71. Kandasamy R. Application of phase change materials in thermal management of electronics / R. Kandasamy, X.-Q. Wang , Arun S. Mujumdar // *Applied Thermal Engineering*. – 2007. – Vol. 27. – P. 2822–2832.
72. Kaygusuz K. Experimental and theoretical investigation of latent heat storage for water based solar heating systems / K. Kaygusuz // *Energy Convers. Mgmt.* –1995. – Vol. 36. –No. 5. –P. 315-323.
73. Kenisarin M. Solar energy storage using phase change materials / M. Kenisarin, K. Mahkamov // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2007. – V. 11. – P. 1913–1965.
74. Korkor H. Solar Energy Utilization for Industrial Process Heat (IPH), The Case of the Egyptian Textile, Food and Chemical Industries. /; – October 2011.
75. Kosmopoulos P. SOLAR ATLAS OF EGYPT/ P. Kosmopoulos, S. Kazadzis , H. El-Askary // chapman university, usa, faculty of science, alexandria university ,world radiation center, davos, switzerland, national observatory of athens, greece, centre for environment and development for the arab region and europe eh, ministry of state for immigration. – 2018. P. –277. URL: <http://www.nrea.gov.eg/Content/files/SOLAR%20ATLAS%202018%20digital1.pdf>
76. Kousksou, P. PCM storage for solar DHW: From an unfulfilled promise to areal benefit / P. Kousksou, G. Bruel, V. Cherreau, T. E. Rhafiki Leoussoff // *Solar Energy*. –2011. –Vol. 85. –P. 2033-2040.
77. Kurklu, A. Thermal performance of a water-phase change material solar collector / A. Kurklu, A. Ozmerzi , S. Bilgin // *Renewable Energy*. –2002. –Vol. 26. –P. 391–399.
78. La'zaro A. Experimental Study on Phase Change Materials and Plastics Compatibility / A. La'zaro, B. Zalba, M. Bobi, C. Castellón, L.F. Cabeza, // *American Institute of Chemical Engineers (AIChE) journal*. – 2006 . – V. 52– No. 2. – P. 804-808.
79. Lebedev V. A. Limitations of using phase change materials for thermal energy storage/ V. A. Lebedev, **A. E. Amer** // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2019. – Vol. 378. –No. 1. – P. 012044.
80. Leong K.Y. Nano-enhanced phase change materials: A review of thermo-physical properties, applications and challenges/ K.Y. Leong, M.R. Abdul Rahman, B.A. Gurunathan // *Journal of Energy Storage*. – 2019. – № (21). – C. 18–31.

81. Lloyd, B. Development challenges under the Clean Development Mechanism (CDM)—Can renewable energy initiatives be put in place before peak oil?. / B. Lloyd, and S. Subbarao // *Energy Policy*. – 2009. – Vol. 37(1). P.237-245.
82. Macphee D. Performance Investigation of Various Cold Thermal Energy Storages / D. Macphee, 2008.
83. Marks S. An investigation of the thermal energy storage capacity of glauber's salt with respect to thermal cycling/ S. Marks // *Solar Energy*. – 1980. – V. 25. – P. 225-258.
84. Mazmana, M. Utilization of phase change materials in solar domestic hot water systems / M. Mazmana, L. F. Cabeza, H. Mehling, M. Nogues, H. Evliya, H. O" и Paksoy, // *Renewable Energy*. – 2009. – Vol. 34. – P. 1639–1643.
85. Mehling H. Heat and cold storage with PCM. An up to date introduction into basics and applications / H. Mehling, L.F. Cabeza // Springer. – 2008.
86. Mettawee E.B. S. Experimental study of acompact PCM solar collector/ Eman-Bellah S. Mettawee and Ghazy M.R. Assassa. // *Energy*. – 2006. –Vol. 31. – P. 2958-2968.
87. Most Economical and Efficient Flat Plate Solar Collectors for Compact Solar Water Heater. – URL: https://m.made-in-china.com/product/Most-Economical-and-Efficient-Flat-Plate-Solar-Collectors-for-Compact-Solar-Water-Heater-770249292.html?fbclid=IwAR3I7l9zvbt3sKa98fA16kqx4ExK_Q4gBTU0boN27yGOTHKZiGgXT2UwY5M. (дата обращения: 08.02.2021). – Текст: электронный.
88. Nabeshima, M. Techniques of statistical data analysis to offer suggestive observation for the facility designer (Doctoral dissertation, PhD thesis, Osaka City University (Japan))/ M. Nabeshima, – Japan. – 1998.
89. Nallusamya N. Experimental investigation on a combined sensible and latent heat storage system integrated with constant/varying (solar) heat sources / N. Nallusamya, S. Sampatha, R. Velraj// *Renewable Energy*. –2007. –Vol.32. –P.1206–1227.
90. Observatoire Méditerranéen de l'Energie .Technical Study Report on Solar Heat for Industrial Processes (SHIP) State of the Art in the Mediterranean Region./ Observatoire Méditerranéen de l'Energie. Lead author: N. Cottret, contributing author: E. Menichetti// *Global Solar Water Heating Market Transformation and Strengthening Initiative(GSWH Project)*. – 2013. –P. 64.
91. Oró, E. Corrosion of metal and polymer containers for use in PCM cold storage / E. Oró, L. Miró, C. Barreneche, I. Martorell, M. M. Farid и L. F. Cabeza // *Applied Energy*. – 2013. – V. 109. – P. 449–453.

92. Özişik, M.N . Finite difference methods in heat transfer./ M.N. Özişik, H.R. Orlande, M.J. Colaço, R.M. Cotta, // CRC press. – 2017.
93. Paraffin wax. – URL: https://www.alibaba.com/product-detail/CAS-8002-74-2C21H27NO3Factory_62419908793.html?spm=a2700.7724857.normal_offer.d_title.7a4f9a2auqaFD A.(дата обращения: 08.02.2021). – Текст: электронный.
94. Parsazadeh M. Numerical study on the effects of fins and nanoparticles in a shell and tube phase change thermal energy storage unit / M. Parsazadeh и X. Duan, // Appl. Energy. – 2018. –Vol. 216. – P. 142–156.
95. Patankar, S., Numerical Heat Transfer and Fluid Flow / S. Patankar // aylor & Francis. – 2018.
96. Pramod B. Investigations on latent heat storage materials for solar water and space heating applications/ B. Pramod, Salunkhea и D. Jaya Krishna // Journal of Energy Storage. – 2017. – P. 12243–260.
97. Rahimi M. Analysis of geometrical and operational parameters of PCM in a fin and tube heat exchanger/ M. Rahimi, AA. Ranjbar, DD. Ganji, K. Sedighi, MJ. Hosseini, R. Bahrampoury // International Communications in Heat and Mass Transfer. – 2014. – Vol. 53. – P.109-15.
98. Rathod M. K. A methodological concept for phase change material selection based on multiple criteria decision analysis with and without fuzzy environment / M. K. Rathod, H. V. Kanzaria // Materials & Design. –2011. – Vol. –32(6). – P. 3578-85.
99. Rathod M. K. Experimental investigations on latent heat storage unit using paraffin wax as phase change material / M. K. Rathod , J. r. Banerjee // Experimental Heat Transfer. – 2014. –Vol. 27. (1). – P.40-55.
100. Ravi G. Laminar flow forced convection heat transfer behavior of a phase change material fluid in finned tubes./ G. Ravi, JL Alvarado, C. Marsh, DA. Kessler // Numerical Heat Transfer, Part A: Applications. – 2009 . – Vol. 16. –Iss. 55(8). – P. 721-38.
101. Regin A. F. An analysis of a packed bed latent heat thermal energy storage system using PCM capsules: Numerical investigation. / A. F. Regin, S. Solanki и J. Saini // Renewable Energy. –2009. – Vol. 34. –P.1765–1773.
102. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications/ A. Sharma, V. Tyagi, C. Chen, D. Buddhi // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2009. Vol. 13. P. 318–345. DOI:10.1016/j.rser.2007.10.005.
103. Rodriguez-Ubinas E. Applications of phase change material in highly energy-efficient houses / E. Rodriguez-Ubinas, L. Ruiz-Valero, J. Vega S, Neila // Energy and Buildings. – 2012 . – Vol. 50. – P.49-62.

- 104.Saaty T. L. Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process / T. L. Saaty, L. Vargas // Int. Ser. Oper. Res. Management Sci. – 2001. –Vol. 34. P.1-352.
- 105.Saaty T.L. Decision making with the analytic hierarchy process /T.L. Saaty // International journal services sciences. –2008. – V. 1. – No. 1. – P. 83–98.
- 106.Sanusi O. Energy storage and solidification of paraffin phase change material embedded with graphite nanofibers/ O. Sanusi, R. Warzoha, A. S.Fleischer // International Journal of Heat and Mass Transfer. –2011. –Vol. 54. –P.4429–4436.
- 107.Sari A. Some fatty acids used for latent heat storage: thermal stability and corrosion of metals with respect to thermal cycling/ A. Sari, K. Kaygusuz // Renew. Energy. – 2003. – Vol. 28. – P. 939–948.
- 108.Sari A. Synthesis, thermal energy storage properties and thermal reliability of some fatty acid esters with glycerol as novel solidliquid phase change materials / A. Sari, A. Bier, A. Karaipekli, C. Alkan и A. Karadag // Sol. Energy Mater. Sol. Cells. – 2010. – V. 94. – P. 1
- 109.Sarı A. Thermal and heat transfer characteristics in a heat storage system using lauric acid/ A. Sarı и Kamil Kaygusuz // Energy Conversion and Management. –2002. –Vol. 43. –P. 2493–2507.
- 110.Sari A. Thermal reliability test of some fatty acids as PCMs used for solar thermal latent heat storage applications // Energy Convers. Manag. – 2003. – Vol. 44. – P. 2277–2287.
- 111.Sarı A. Thermal properties and thermal reliability of eutectic mixtures of some fatty acids as latent heat storage materials / A. Sarı, H. Sarı и A. Önal // Energy Convers. Manag. –2004. –V. 45. – P. 365–376.
- 112.Sarı, A. Eutectic mixtures of some fatty acids for low temperature solar heating applications:thermal properties and thermal reliability / Sarı, A. // Applied Thermal Engineering . – 2005. – V. 25. – P. 2100–2107.
113. Saydam V. Design and experimental analysis of a helical coil phase change heat exchanger for thermal energy storage / V. Saydam, M. Parsazadeh, M. Radeef и X. Duan // Journal of Energy Storage. – 2019. – Vol. 21. – P. 9-17.
- 114.Seddegh S. A comparative study of thermal behaviour of a horizontal and vertical shell-and-tube energy storage using phase change materials / S. Seddegh, X. Wang, A.D. Henderson // Applied Thermal Engineering. –2016. – Vol. 93. – P. 348-358.
- 115.Sharma A. Accelerated thermal cycle test of acetamide, stearic acid and paraffin wax for solar thermal latent heat storage applications./ A. Sharma, S. Sharma, D. Buddhi // Energy Convers. Manag. – 2002. – Vol. 43. – P. 1923–1930.
- 116.Sharma A. Solar cooker with latent heat storage systems: A review / A. Sharma, C. Chen, V. Murty, A. Shukla // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2009. – Vol. 13. – P. 1599–1605.

- 117.Sharma A. Thermal cycle test of urea for latent heat storage applications / A. Sharma, S.D. Sharma, D. Buddhi и R.L. Sawhney // EnergyResources. . –2001. – Т. 25. –P. 465-468.
- 118.Sharma S. Accelerated thermal cycle test of latent heat-storage materials./ S. Sharma, D. Buddhi, R.L. Sawhney // Sol. Energy. –1999. – Vol. 66. –P. 483–490.
- 119.Sharma S. Latent heat storage materials and systems / S. Sharma и K. Sagara // International Journal of Green Energy. –2005. –Vol. 2. –P. 1–56.
- 120.Shimoda, Y. City-level energy and CO2 reduction effect by introducing new residential water heaters / Shimoda, Y., Okamura, T., Yamaguchi, Y., Yamaguchi, Y., Taniguchi, A. and Morikawa, T. // Energy. – 2010. – Vol. 35(12). – P.4880-4891.
- 121.Shmueli H. Melting in a vertical cylindrical tube: Numerical investigation and comparison with experiments. / H. Shmueli, G. Ziskind и R. Letan // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2010. – Vol. 53(19-20). – P. 4082-4091.
- 122.Shukla A., Thermal cycling test of few selected inorganic and organic phase change materials/ A. Shukla, D. Buddhi, R. Sawhney // Renew. Energy. – 2008. – Vol. 33. – P. 2606–2614.
- 123.Simon, F.F. Flat-plate solar-collector performance evaluation with a solar simulator as a basis for collector selection and performance prediction / Simon, F.F. // Solar energy. –1976. – Vol. 18(5). – P.451-466.
- 124.Socaciu L. Using the analytic hierarchy process to prioritize and select phase change materials for comfort application in buildings / L. Socaciu и P. Unguresan // Mathematical Modelling in Civil Engineering. – 2014. –Vol. 10. – № 1. – P. 21-28.
- 125.Socaciu, L. PCM selection using AHP method to maintain thermal comfort of the vehicle occupants./ L. Socaciu, O. Giurgiu, D. Banyai и M. Simion // Energy Procedia. –2016. – Vol. 85. – P. 489-497.
- 126.Source: Solar Thermal Untapped Potential, RENEWABLE ENERGY WORLD. January–February . –2006.
- 127.Tarhan S. Temperature distributions in trapezoidal built in storage solar water heaters with/without phase change materials / S. Tarhan, A. Sari и M. H. Yardim // Energy Conversion and Management. –2006. –Vol. 47. –P. 2143–2154.
- 128.Tay N.H.S. Comparison of pinned and finned tubes in a phase change thermal energy storage system using CFD/ N.H.S. Tay, F. Bruno, M. Belusko // Applied energy. – 2013. – Vol. 104. –P.79-86.

129. Trp A. Analysis of influence of operating conditions and geometric parameters on heat transfer in water-paraffin shell-and-tube latent thermal energy storage unit / A. Trp, K. Lenic и B. Frankovic // *Applied Thermal Engineering*. – 2006. – Vol. 26. – P. 1830–1839.
130. Tyagi V. Thermal cycle testing of calcium chloride hexahydrate as a possible PCM for latent heat storage / V. Tyagi и D. Buddhi // *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*. – 2008. – V. 92. – P. 891–899.
131. U.S. Energy Information Administration (EIA). Country Analysis Brief: Egypt. – 2018. P.116. – URL: https://www.eia.gov/beta/international/analysis_includes/countries_long/Egypt/egypt.pdf.
132. Vannoni C. IEA SHC Task 33 and Solar PACES Task IV: Solar Heat for Industrial Heat, Potential for Solar Heat in Industrial Processes. / C. Vannoni, R. Battisti, S. Drigo // Department of Mechanics and Aeronautics - University of Rome. Published by CIEMAT, Madrid. – 2008. – P. 21.
133. Versteeg, H. An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method, / H. Versteeg, and W. Malalasekera. // Pearson education. – 2007.
134. Voller V. R. A fixed grid numerical modelling methodology for convection-diffusion mushy region phase-change problems / V. R. Voller, C. Prakash // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 1987. – Vol. 30. – P. 1709–1719.
135. Voller V. R. Fast implicit finite-difference method for the analysis of phase change problems / V. R. Voller // *Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals*. – 1990. – Vol. 17. – P. 155–169.
136. Wada, T. Heat storage capacity of sodium acetate trihydrate during thermal cycling / T. Wada, Y. Matsuo, R. Yamamoto // *Sol. Energy* (United Kingdom). – 1984. – Vol. 33(3/4). – P. 373–375.
137. Wu, S. Dynamic discharging characteristics simulation on solar heat storage system with spherical capsules using paraffin as heat storage material / S. Wu, G. Fang и X. Liu // *Renewable Energy*. – 2011. – Vol. 36. – P. 1190–1195.
138. Yau Y. A review on cool thermal storage technologies and operating strategies. / Y. Yau и Behzad Rismanchi // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2012. – Vol. 16. – P. 787–797.
139. Zalba B. Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications / B. Zalba, J. M. Marín, L. F. Cabeza, H. Mehling // *Applied Thermal Engineering*. – 2003. – Vol. 23. – Iss. 3. – P. 251–283. DOI:10.1016/S1359-4311(02)00192-8
140. Zhang, J.-J. Thermal studies on the solid–liquid phase transition in binary systems of fatty acids / J.-J. Zhang, J.-L. Zhang, S.-M. He, K.-Z. Wu и X.-D. Liu // *Thermochim. Acta*. – 2001. – V. 369. – P. 157–160.
141. Zhong Y. Heat transfer enhancement of paraffin wax using graphite foam for thermal energy storage, *Solar Energy Materials* / Y. Zhong, Quanguo, SizhongLi, JingliShi и LangLiu // *Solar Cells*. – 2010. – Vol. 94. – P. 1011–1014.

142. Zhou D. Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) / D. Zhou, C. Zhao и Y // Applied Energy. –2012. –Vol. 92. –P. 593–605.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Основные теплофизические свойства ФТАМ

Таблица А.1- Влияние термоциклирования на температуру плавления и скрытую теплоту плавления органических материалов[79]

Sr. No.	Теплоаккумулирующие материалы с фазовым переходом	Температура плавления (°C)		Скрытая теплота плавления, кДж/кг		Количество циклов	Источник
		Начальная	Конечная	Начальная	Конечная		
1	Парафин (C22H44.1) (технический сорт)	47.1	46.6	166	163	900	[55]
	Парафин (C23H48.4) (технический сорт)	57.1	57.8	220	224	900	[55]
	Парафиновый воск 53 (товарный сорт)	53	53	184	165	300	[118]
	Парафиновый воск 53 (товарный сорт)	53	50	184	136	1500	[115]
	Парафиновый воск 58–60	58.27	55	129.8	102	600	[122]
	Парафиновый воск 60–62	57.78	59	129.7	109	600	[122]
	Парафин (70 мас.%) + Полипропилен (30 мас.%)	44.77	45.52	136.16	136.59	3000	[19]
2	Ацетамид	82	82	263	268	300	[118]
		82	84	263	260	1500	[115]
3	Эритрит, C ₄ H ₆ ОН ₄	117	119	339	305	1000	[122]
4	Лауриновая кислота	42.6	41.3	176.6	156.6	1200	[110]
		42.6	39.5–44.1	211.6	132.8	910	[107]
5	Миристиновая кислота	50.4	49.8	189.4	163.5	450	[57]
		52.99	46.21	181.0	159.1	1200	[110]
		53.8	45.3–52.2	192.0	159.1	910	[107]
6	Пальмитиновая кислота	57.8	57.7	201.2	184.4	450	[57]
		61.31	55.47	197.9	172.4	1200	[110]
		60.9	55.5–62.2	197.9	162.9	910	[107]
7	Стеариновая кислота	65.2	65.9	209.9	185.3	450	[57]
		62.59	63	154.63	159	300	[118]
		54.7	46.83	159.3	157.7	1200	[110]
		53.8	46.9–50.2	174.6	118.9	910	[107]
		63	64	155	123	1500	[115]

Продолжение таблицы А.1

8	Urea	133.9 133.9	110.3 -	195 195	154 -	30 50	[117]
9	Миристиновая кислота + глицерин	31.96	31.22	154.3	151.8	1000	[108]
10	Пальмитиновая кислота + глицерин	58.50	57.45	185.9	175.8	1000	[108]
11	Стеариновая кислота + глицерин	63.45	62.83	149.4	152.8	1000	[108]

Таблица А.2- Влияние термоциклирования на температуру плавления и скрытую теплоту плавления неорганических материалов[79]

Sr. No.	скрытые материалы аккумуляирования тепла	Температура плавления (°C)		Скрытая теплота плавления, кДж/кг		Количество циклов	Источник
		Начальная	Конечная	Начальная	Конечная		
1	Гексагидрат хлорида кальция	23.26	23.26	125.4	125.4	1000	[130]
2	Гидроксид натрия, NaOH	64	66	227	227	1	[122]
3	Борат динатрия, Na ₂ B ₄ O ₇ ·10H ₂ O	68	72	138	138	1	[122]
4	Нитрат железа, Fe (NO ₃) ₃ ·6H ₂ O	60	52	99	99.23	1	[122]
5	Гидроксид бария, Ba (OH) ₂ ·8H ₂ O	78	-	265	-	1	[122]
6	Гексагидрат хлорида магния (MgCl ₂ ·6H ₂ O)	111.5	124.12	155.11	85	500	[43]
7	Глауберова соль (Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O)	32.4	-	238	63	40	[83]
	Глауберова соль (Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O) + аттапульгитовая глина в качестве загустителя + бура (Na ₂ B ₄ O ₇ ·10H ₂ O) в качестве зародышеобразователя	-	-	202	105	200	[83]
8	Тригидрат ацетата натрия гарантированного качества (NaCH ₃ COO·3H ₂ O) + Na ₂ P ₄ O ₇ ·10H ₂ O в качестве зародышеобразователя	58	-	254	200	30	[136]
		58	-	254	160	400	[136]
	Технический класс ацетат натрия тригидрат (NaCH ₃ COO·3H ₂ O) + Na ₂ P ₄ O ₇ ·10H ₂ O в качестве зародышеобразователя	58	-	259	235	30	[136]
		58	-	259	200	400	[136]

Таблица А.3 - Влияние термоциклирования на температуру плавления и скрытую теплоту плавления эвтектических материалов .[79]

Sr. No.	ТАМ	Температура плавления (°C)		Скрытая теплота плавления, кДж/кг		Количество циклов	Источн ик
		Начальн ая	Конечная	Начальная	Конечная		
1	Лауриновая кислота (77.05 % масс.) + Пальмитиновая кислота (22.95 % масс)	33.09	32.92	150.6	165.69	100	[140]
2	Лауриновая кислота (LA 75,5 % масс) + Стеариновая кислота (SA 24,5 % масс)	37	37.36	182.7	183.1	360	[111]
3	Миристиновая кислота (MA 58 % масс) + Пальмитиновая кислота (PA 42 % масс)	42.6	42.4	169.7	174.6	360	[111]
4	Пальмитиновая кислота (PA 64,2 % масс) + Стеариновая кислота (SA 35,8 % масс)	52.3	53.58	181.7	186.3	360	[111]
5	CaCl ₂ ·6H ₂ O+20% масс MgCl ₂ ·6H ₂ O зародышеобразователь 1% масс SrCl ₂ ·6H ₂ O и загуститель 0,5 %масс карбоксиметилцеллюлозы (КМЦ)	27.29- 25.88	27.39-25.7	123.13	117.88	100	[58]
6	Лауриновая кислота (66 % масс) + Миристиновая кислота (34 мас.%)	34.2	34.12	166.8	168.3	360	[112]
		34.2	33.89	166.8	170.8	1460	[112]
7	Лауриновая кислота (69% масс) + Пальмитиновая кислота (31 мас.%)	35.2	35.43	166.3	170.2	360	[112]
		35.2	34.8	166.3	168.8	1460	[112]
8	Миристиновая кислота (64 % масс) + Стеариновая кислота (36 мас.%)	44.1	43.9	182.4	180.4	1460	[112]
		44.1	42.99	182.4	184.2	1460	[112]

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Результаты попарного сравнения альтернатив ФТАМ по критериям

Таблица Б.1- Результаты, полученные из парной сравнительной матрицы альтернатив, учитывающих критерии скрытой теплоты (LH).

Альтернативы с (К)	среднее геометрическое (GM)	Веса (w)	Матрица $X=A.W$	Значение согласованности (CV)	Максимальное собственное значение (λ_{max})	Индекс согласованности (CI)	Коэффициент согласованности (CR)
Парафин (P)	2,667269	0,4188	2,268712	5,417259	5,35	0,08864	0,07985
Лауриновая кислота (LA)	1,718772	0,2699	1,44978	5,372186			
Миристиновая кислота (MA)	0,644394	0,1012	0,542516	5,362018			
Пальмитиновая кислота (PA)	1	0,1570	0,849546	5,410707			
Стеариновая кислота (SA)	0,338504	0,0531	0,276945	5,210705			

Таблица Б.2- Результаты, полученные из парной сравнительной матрицы альтернатив с соблюдением критериев теплопроводности (K).

Альтернативы с (К)	среднее геометрическое (GM)	Веса (w)	Матрица $X=A.W$	Значение согласованности (CV)	Максимальное собственное значение (λ_{max})	Индекс согласованности (CI)	Коэффициент согласованности (CR)
Парафин (P)	2,40822468	0,4058	2,1883	5,392479	5,20	0,04894	0,09412
Лауриновая кислота (LA)	0,51728185	0,0872	0,44955	5,157328			
Миристиновая кислота (MA)	1,24573094	0,2099	1,078130	5,135855			
Пальмитиновая кислота (PA)	0,51728185	0,0872	0,44955	5,157328			
Стеариновая кислота (SA)	1,24573094	0,2099	1,07813	5,135855			

Таблица Б.3- Результаты, полученные из парной сравнительной матрицы альтернатив с соблюдением критериев плотности (D)

Альтернативы с (К)	среднее геометрическое (GM)	Веса (w)	Матрица X=A.W	Значение согласованности (CV)	Максимальное собственное значение (λ_{max})	Индекс согласованности (CI)	Коэффициент согласованности (CR)
Парафин (P)	0,644394	0,1033	0,562456	5,445185	5,39	0,0974	0,0877
Лауриновая кислота (LA)	2,667268	0,4276	2,265085	5,297765			
Миристиновая кислота (MA)	0,374915	0,0601	0,316391	5,264607			
Пальмитиновая кислота (PA)	1,551845	0,2488	1,362341	5,476616			
Стеариновая кислота (SA)	1	0,1603	0,875910	5,464299			

Таблица Б.4 - Результаты, полученные из парной матрицы сравнения альтернатив с учетом критериев удельной теплоемкости (CP).

Альтернативы с (К)	среднее геометрическое (GM)	Веса (w)	Матрица X=A.W	Значение согласованности (CV)	Максимальное собственное значение (λ_{max})	Индекс согласованности (CI)	Коэффициент согласованности (CR)
Парафин (P)	3,2719469	0,4981	2,53525272	5,090132	5,04	0,01043	0,0094
Лауриновая кислота (LA)	0,5818107	0,0886	0,44405597	5,013835			
Миристиновая кислота (MA)	0,5818107	0,0886	0,44405597	5,013835			
Пальмитиновая кислота (PA)	1,5518455	0,2362	1,19934872	5,077046			
Стеариновая кислота (SA)	0,5818107	0,0886	0,44405597	5,013835			

Таблица Б.5 - Результаты, полученные из матрицы парного сравнения альтернатив с соблюдением критериев термостабильности (ST).

Альтернативы с (К)	среднее геометрическое (GM)	Веса (w)	Матрица X=A.W	Значение согласованности (CV)	Максимальное собственное значение (λ_{max})	Индекс согласованности (CI)	Коэффициент согласованности (CR)
Парафин (P)	4,1459801	0,5426	3,0331095	5,590436	5,45	0,11306	0,08374
Лауриновая кислота (LA)	0,2857380	0,0374	0,2074800	5,548723			
Миристиновая кислота (MA)	1,7187719	0,2249	1,2343279	5,487785			
Пальмитиновая кислота (PA)	1	0,1309	0,6941164	5,304166			
Стеариновая кислота (SA)	0,4911186	0,0643	0,3425592	5,330084			

Таблица Б.6 - Результаты, полученные из парной матрицы сравнения альтернатив с учетом критерия стоимости (CO)

Альтернативы с (К)	среднее геометрическое (GM)	Веса (w)	Матрица $X=A.W$	Значение согласованности (CV)	Максимальное собственное значение (λ_{max})	Индекс согласованности (CI)	Коэффициент согласованности (CR)
Парафин (P)	2,6265278	0,3894	2,035701	5,227135	5,14	0,03415	0,03076
Лауриновая кислота (LA)	0,4216846	0,0625	0,317890	5,084186			
Миристиновая кислота (MA)	0,4216846	0,0625	0,317890	5,084186			
Пальмитиновая кислота (PA)	2,3714406	0,3516	1,767952	5,027937			
Стеариновая кислота (SA)	0,9028804	0,1339	0,704125	5,259582			

Таблица Б.7 - Результаты, полученные из парной матрицы сравнения альтернатив с соблюдением критериев коррозии (COR).

Альтернативы с (К)	среднее геометрическое (GM)	Веса (w)	Матрица $X=A.W$	Значение согласованности (CV)	Максимальное собственное значение (λ_{max})	Индекс согласованности (CI)	Коэффициент согласованности (CR)
Парафин (P)	2,9541769	0,4549	2,413249	5,305313	5,42	0,10390	0,09361
Лауриновая кислота (LA)	1,2457309	0,1918	1,019748	5,316357			
Миристиновая кислота (MA)	0,5818107	0,0896	0,524177	5,851154			
Пальмитиновая кислота (PA)	0,4670436	0,0719	0,380349	5,288963			
Стеариновая кислота (SA)	2,9541769	0,4549	2,413249	5,305313			

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Результаты моделирования процессов плавления и застывания ФТАМ

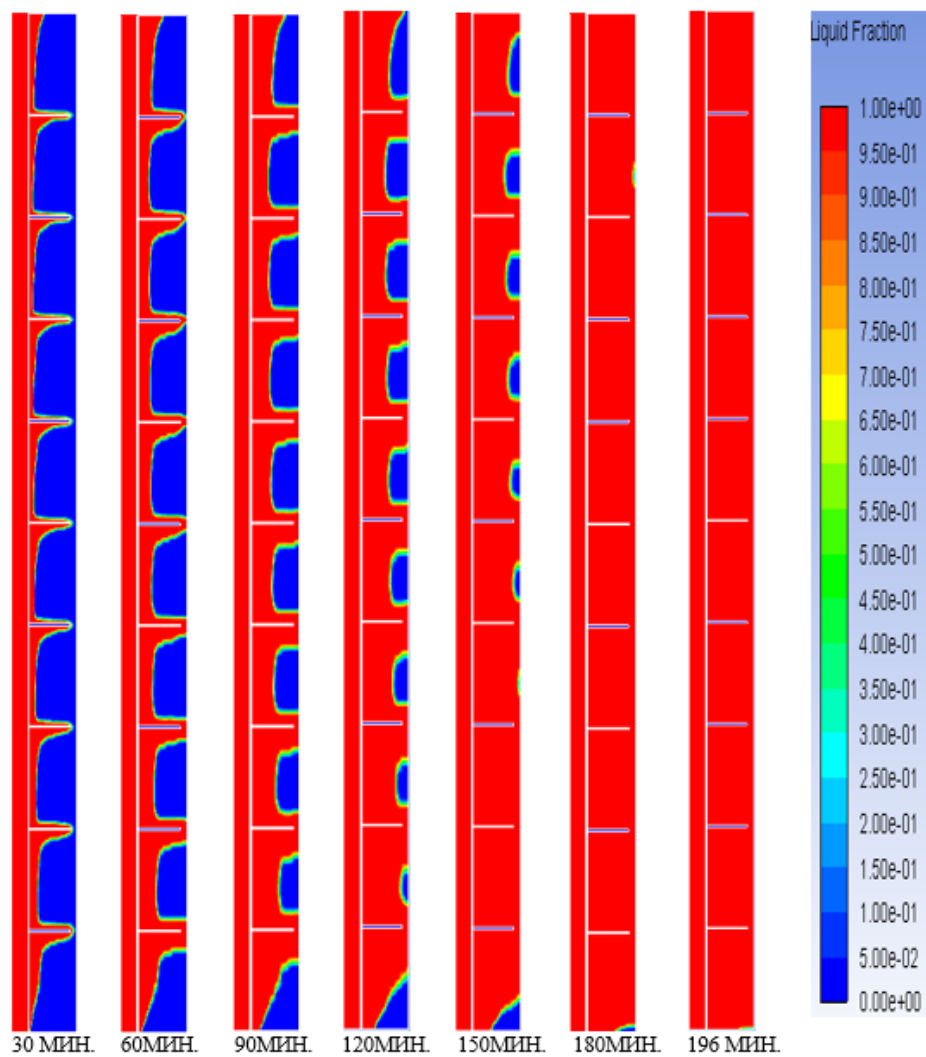


Рисунок В.1– Контур фракции плавки (N=9)

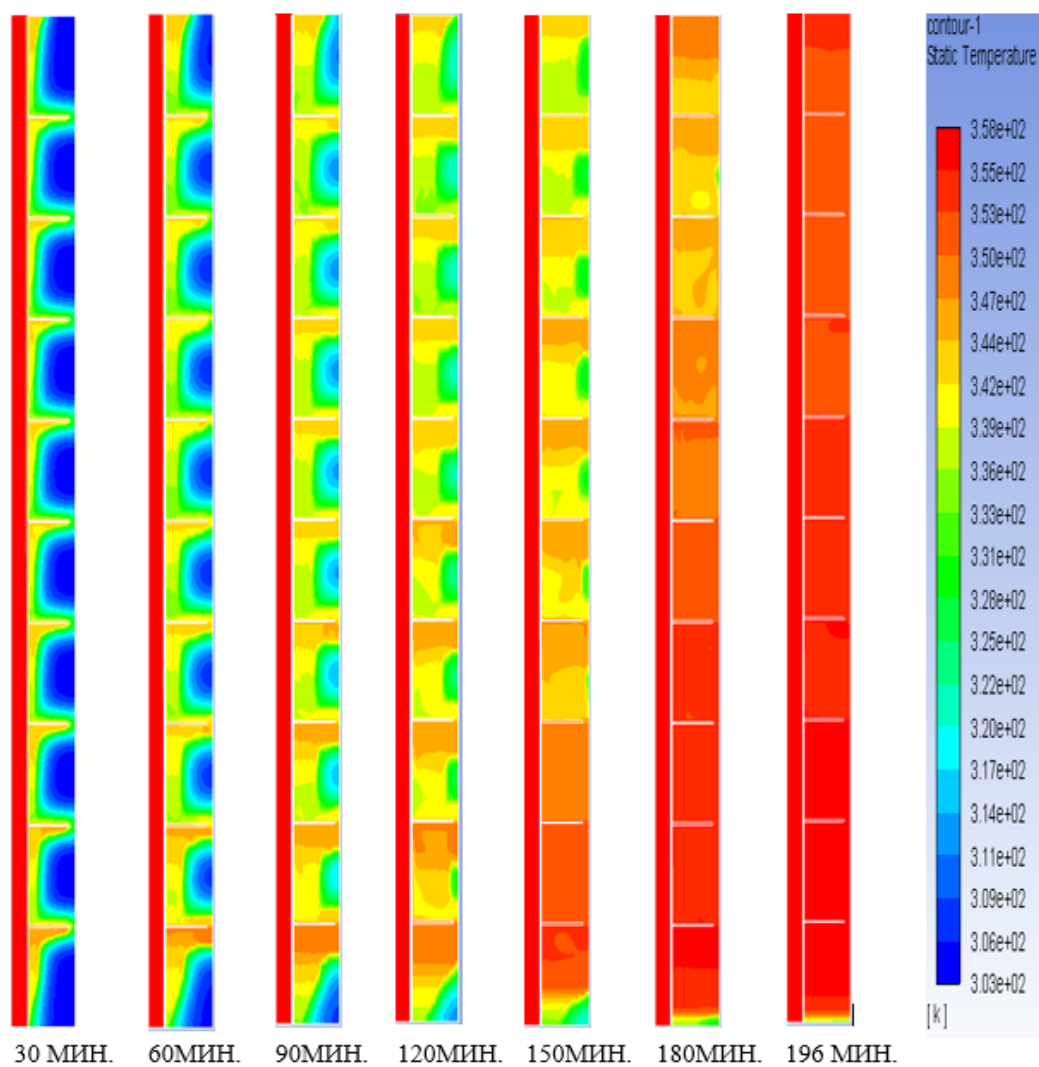


Рисунок В.2– Контур температуры (N=9)

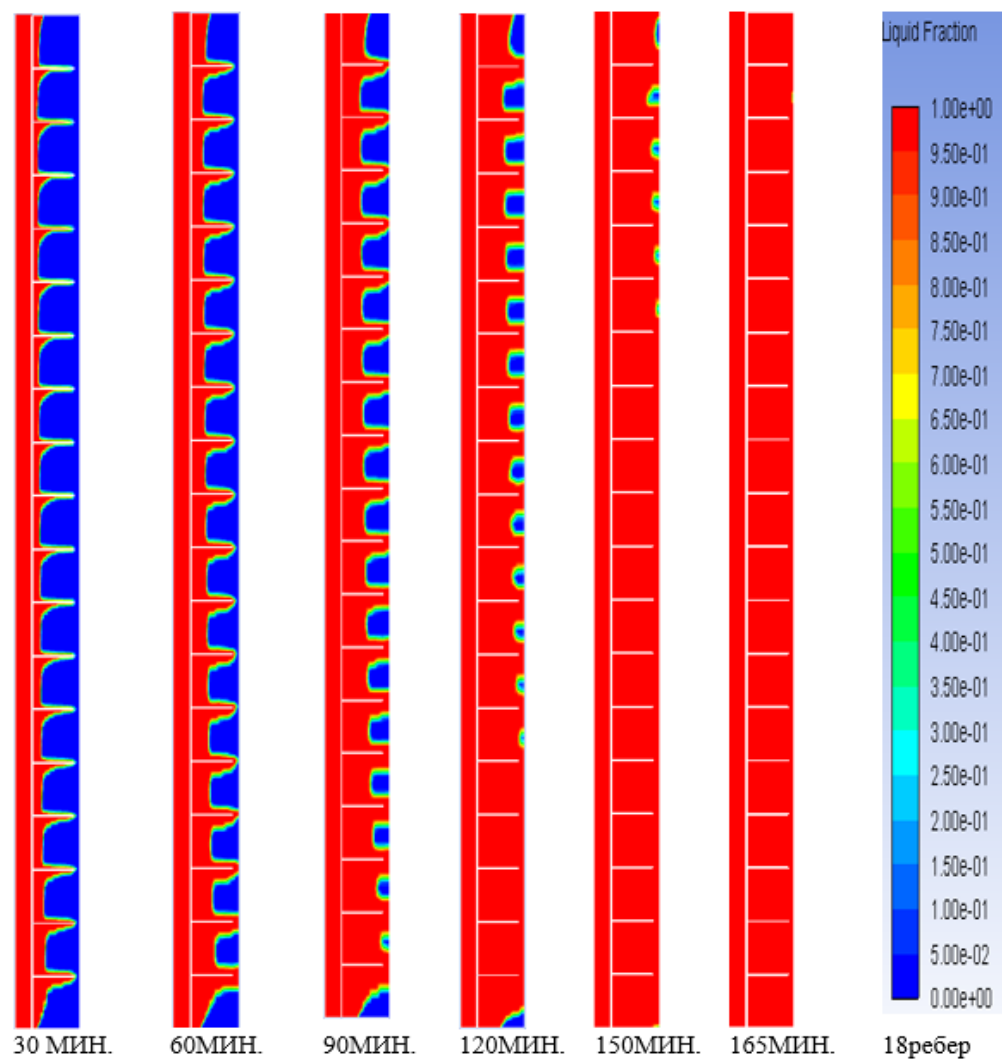


Рисунок В.3 – Контур фракции плавки (N=18)

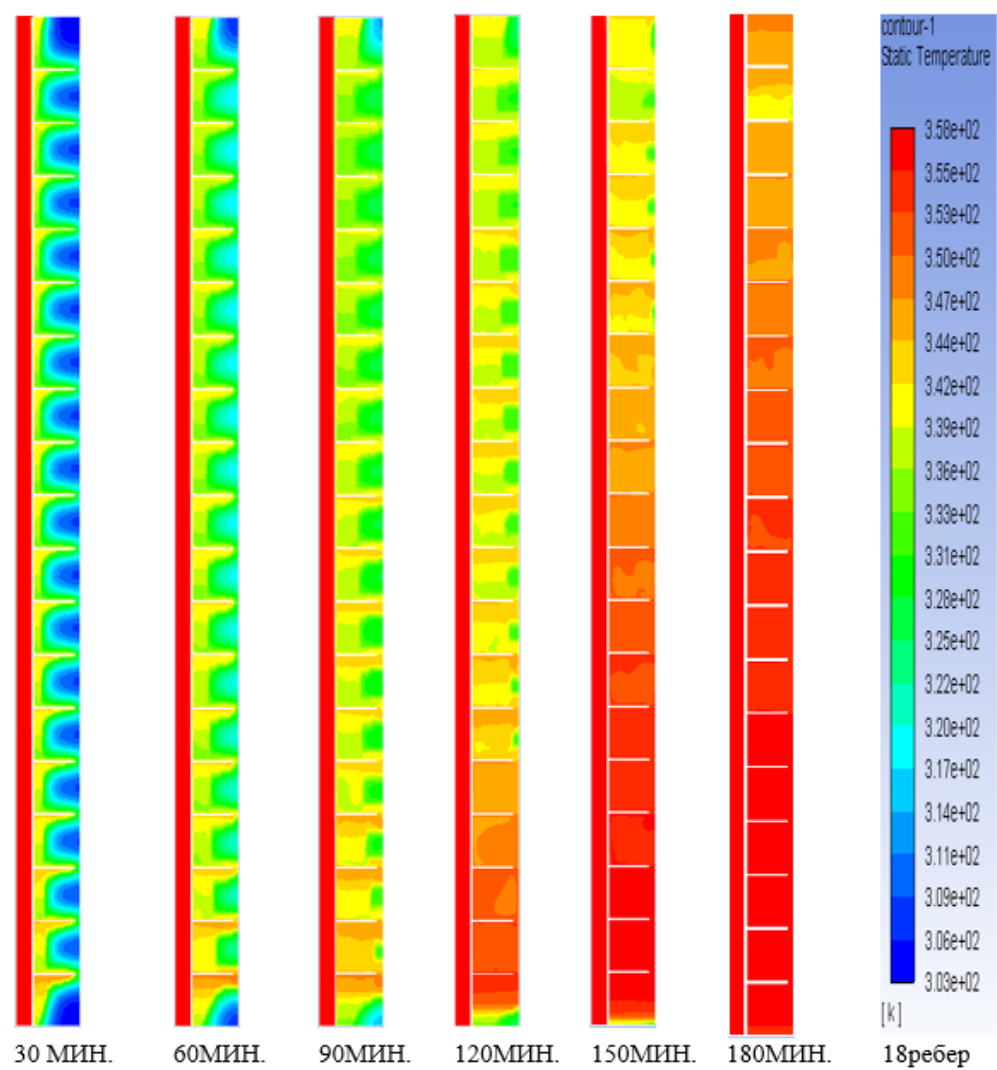


Рисунок В.4 – Контур температуры (N=18)

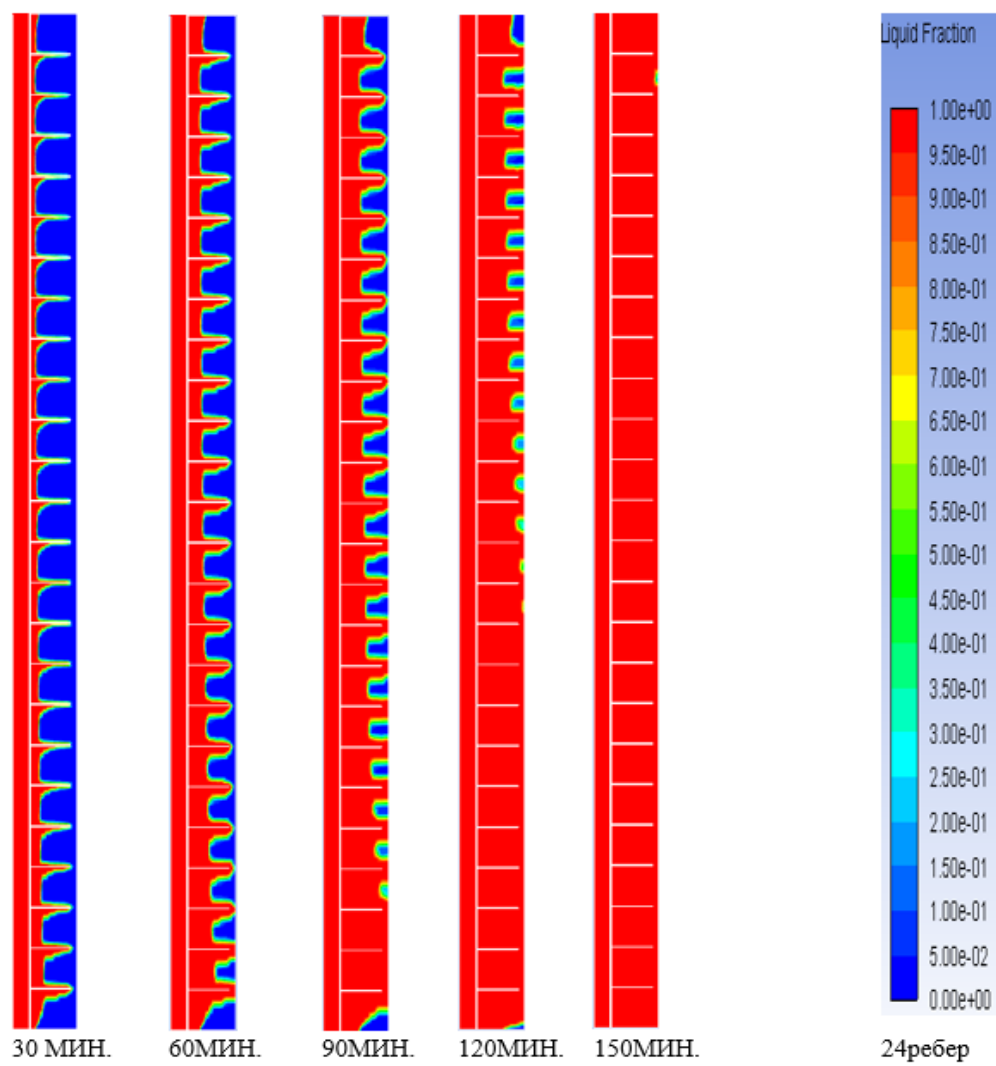


Рисунок В.5 – Контур фракции плавки (N=24)

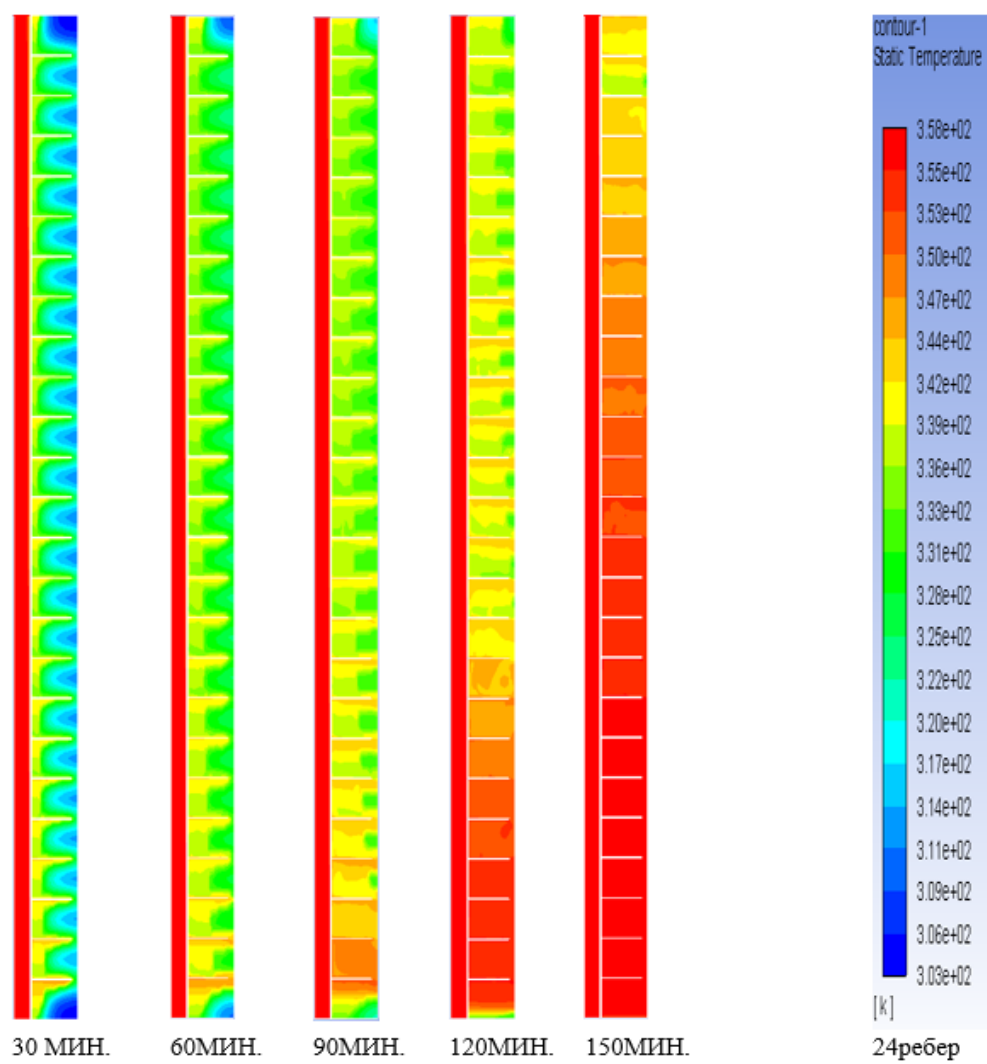


Рисунок В.6 – Контур температуры (N=24)

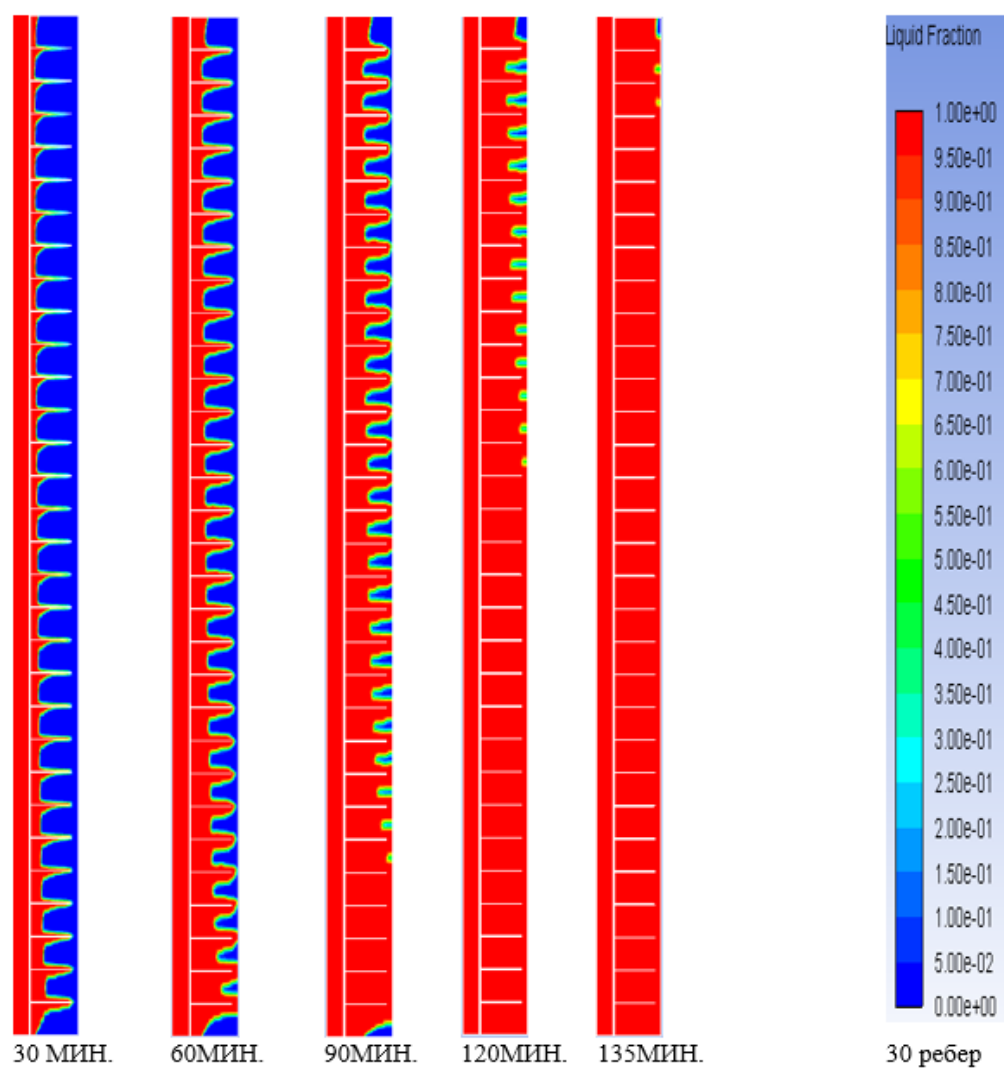


Рисунок В.7 – Контур фракции плавки (N=30)

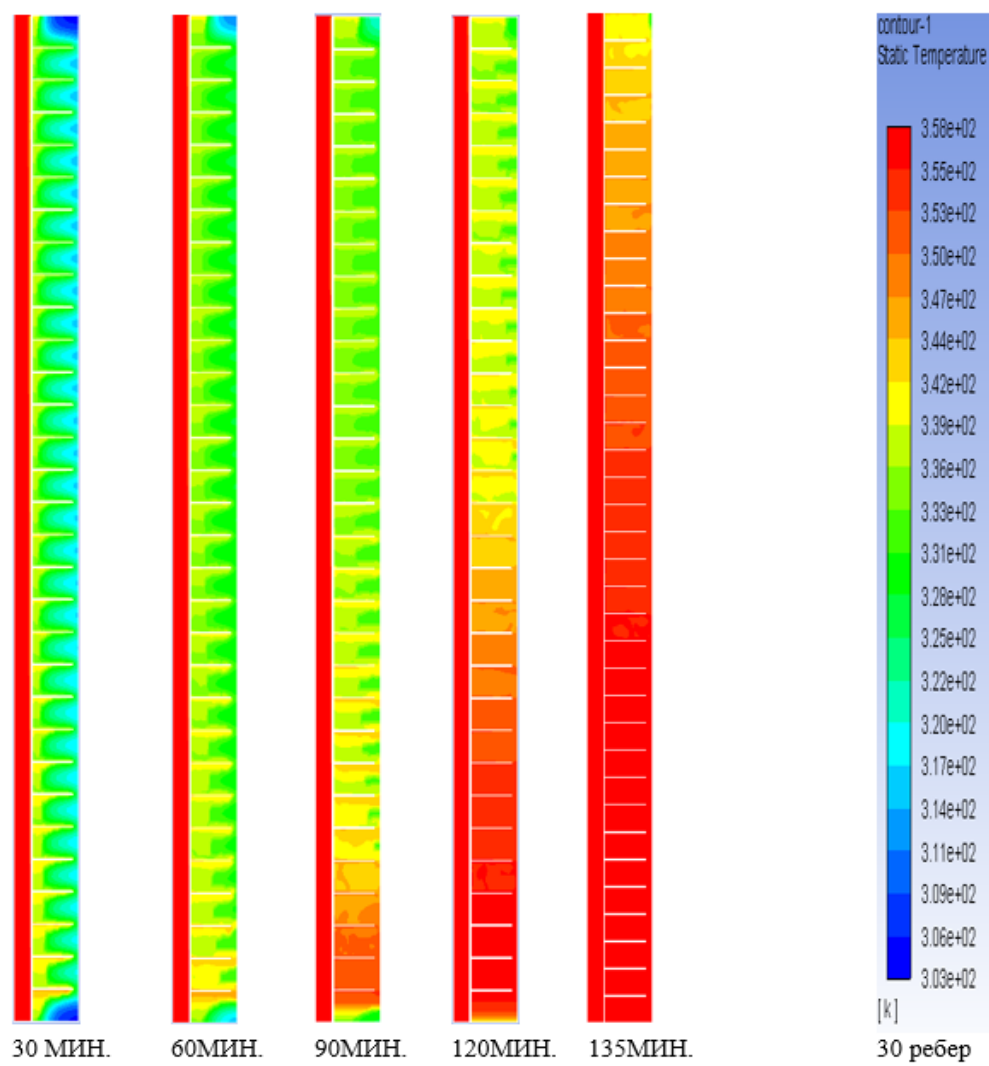


Рисунок В.8 – Контур температуры (N=30)

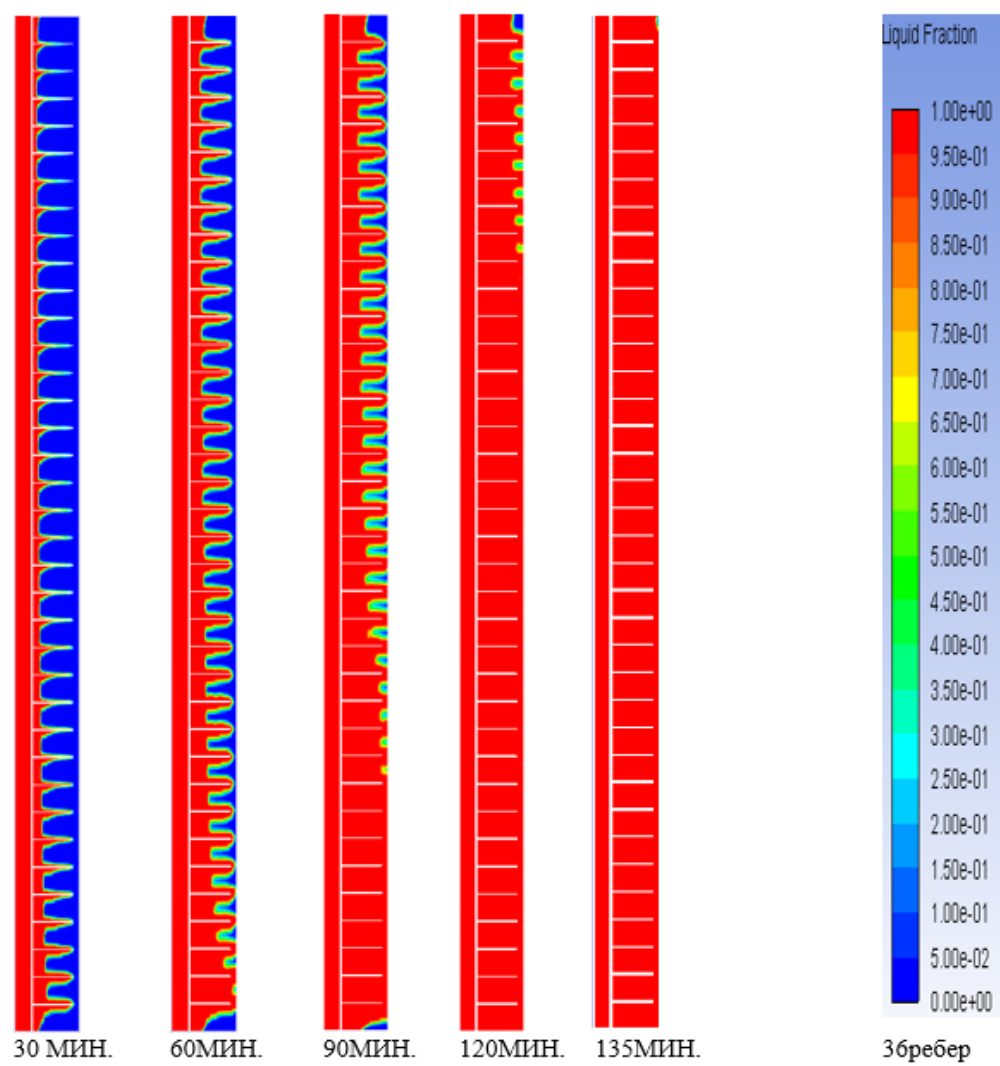


Рисунок В.9 – Контур фракции плавки (N=36)

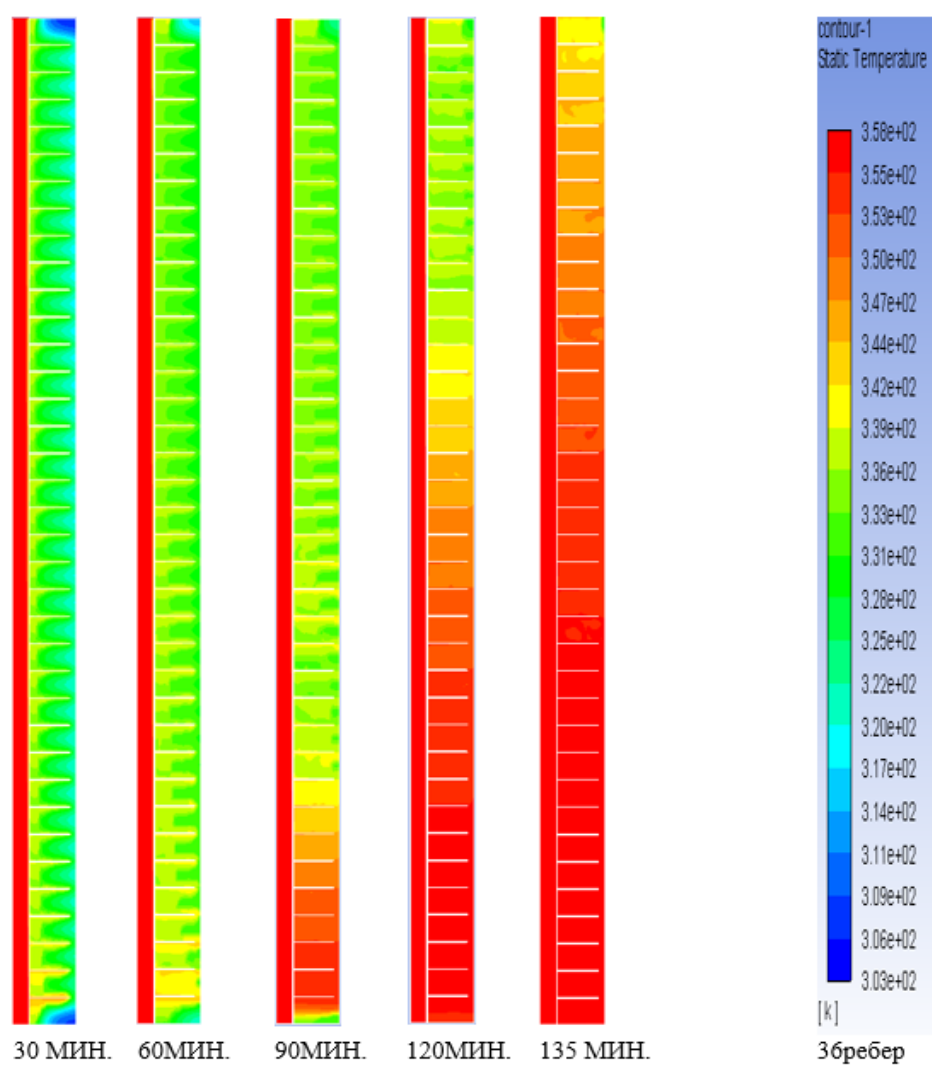


Рисунок В.10 – Контур температуры (N=36)

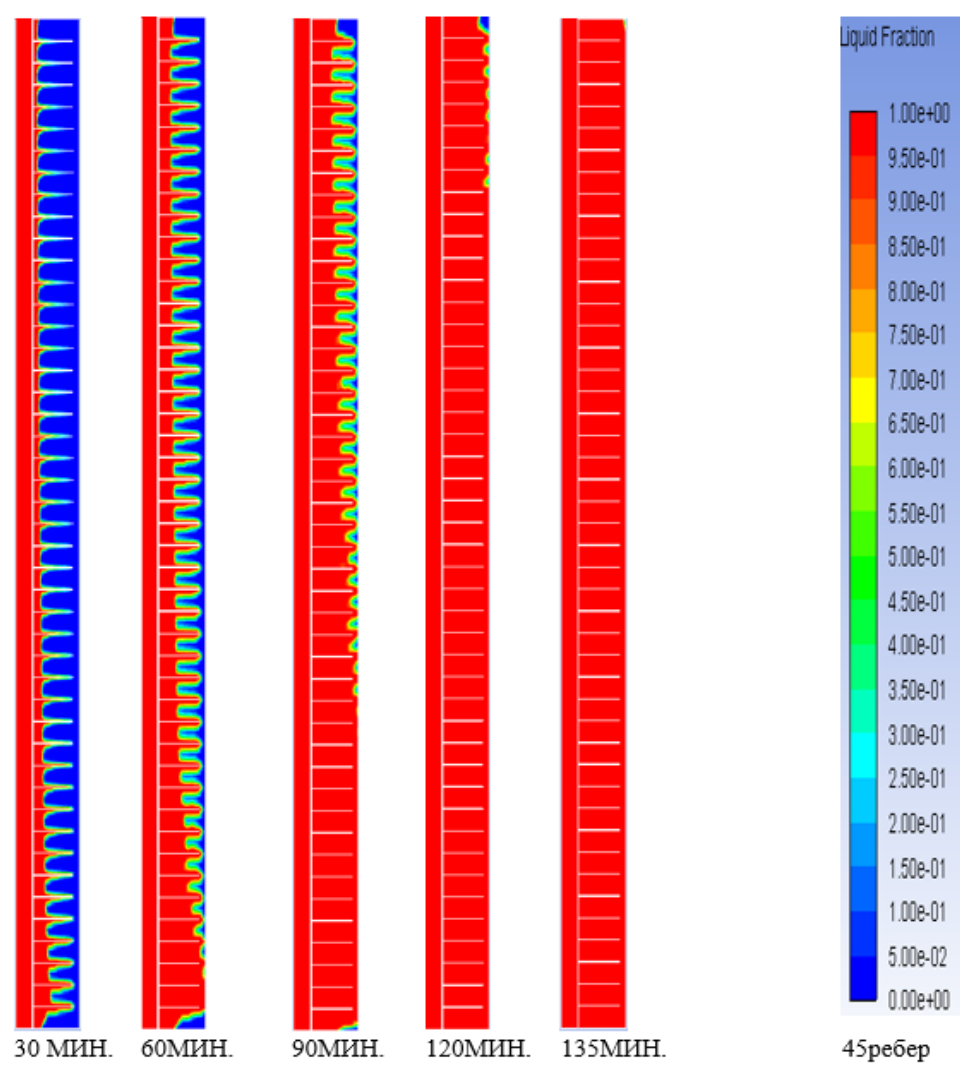


Рисунок В.11 – Контур фракции плавки (N=45)

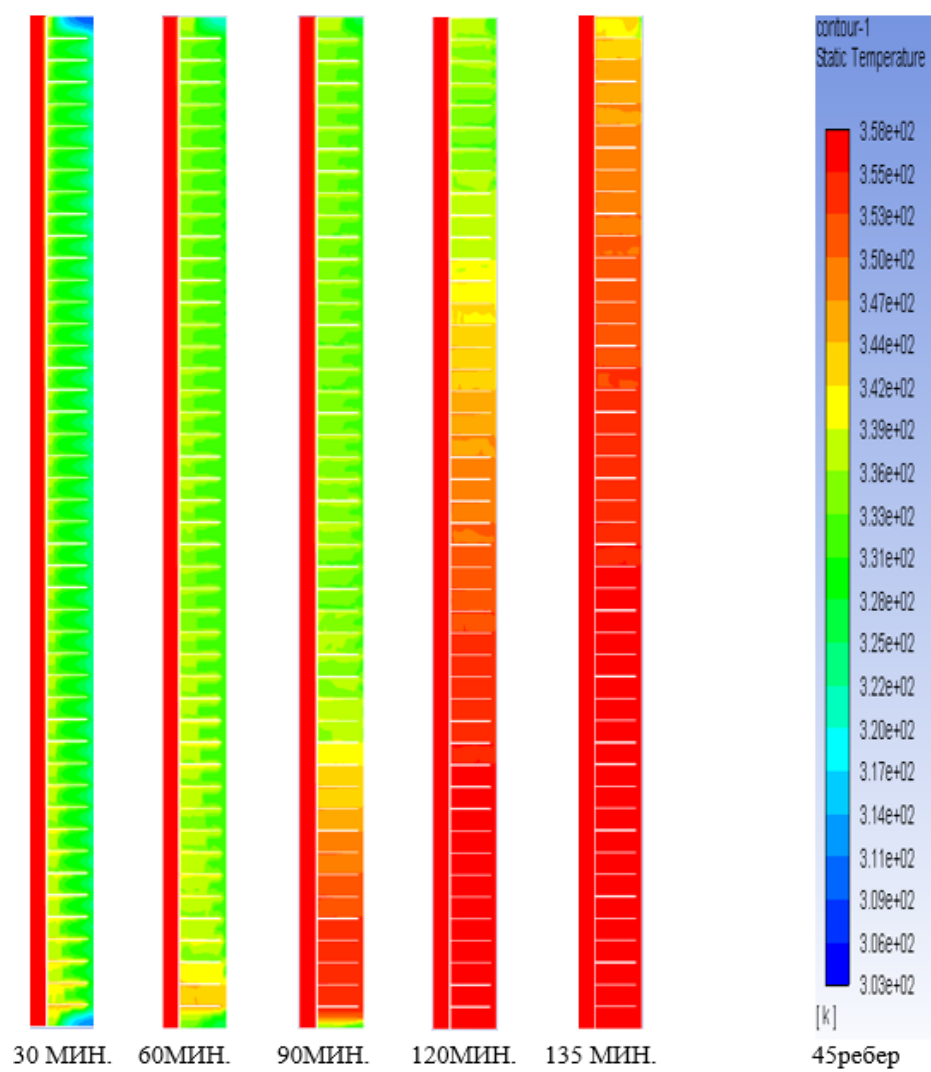


Рисунок В.12 – Контур температуры (N=45)

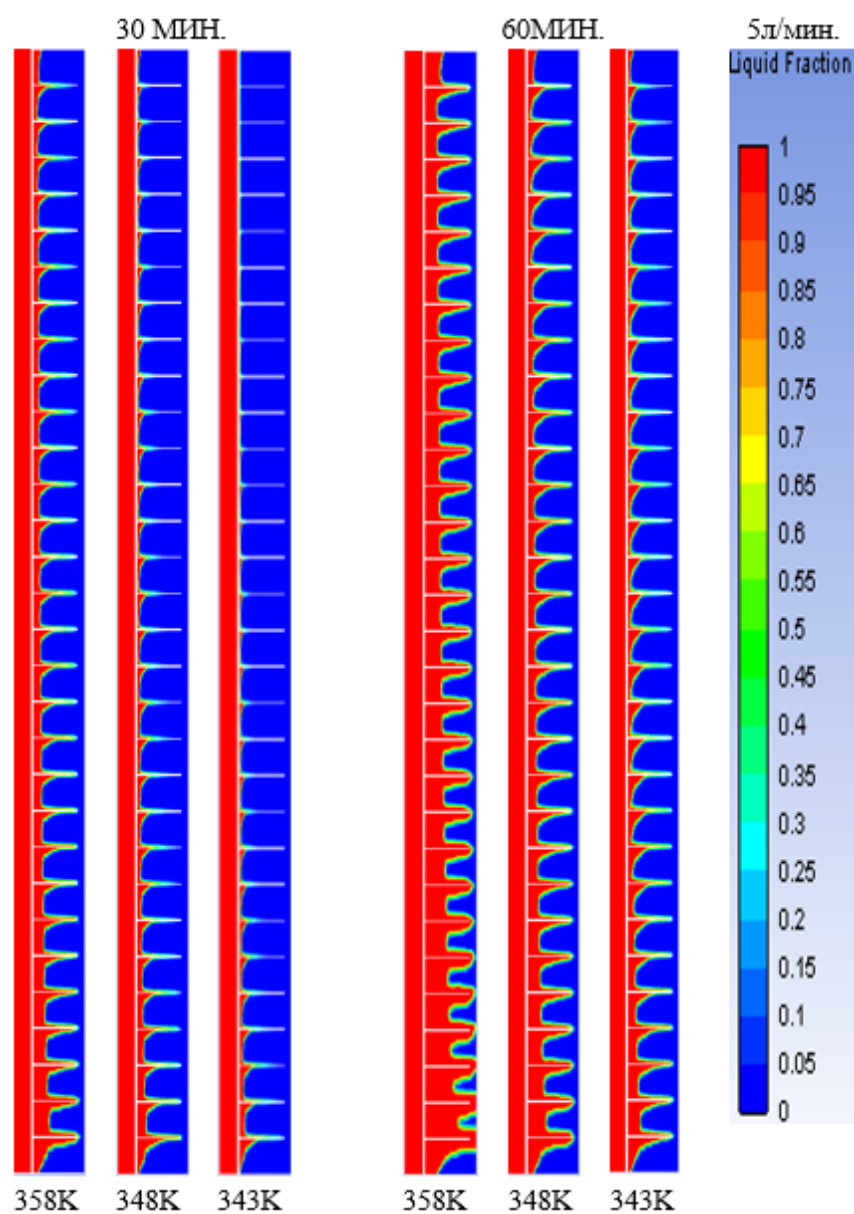


Рисунок В.13 – Влияние изменения температуры на входе теплоносителя на жидкую фракцию парафина в моменты времени 30 и 60 мин.

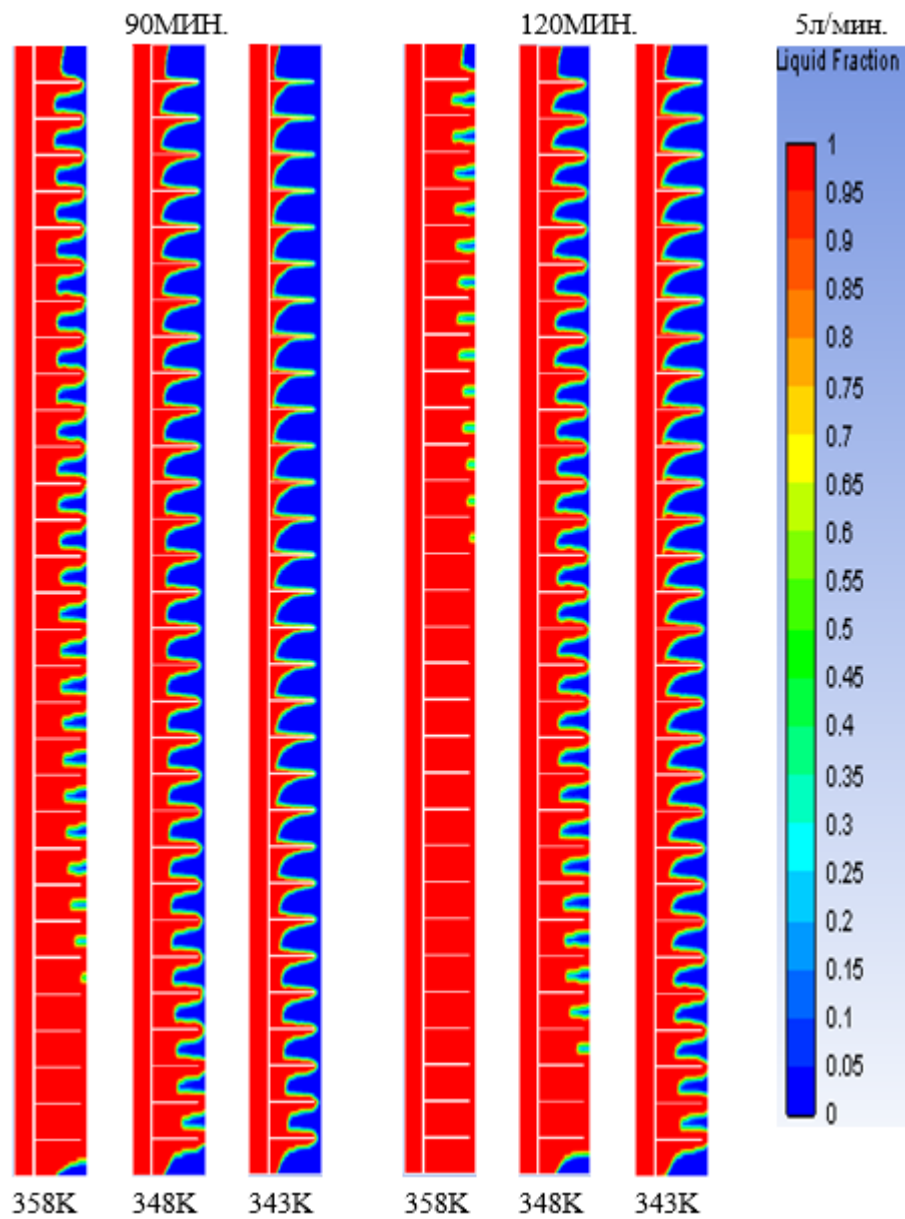


Рисунок В.14 – Влияние изменения температуры на входе теплоносителя на жидкую фракцию парафина в моменты времени 90 и 120 мин.

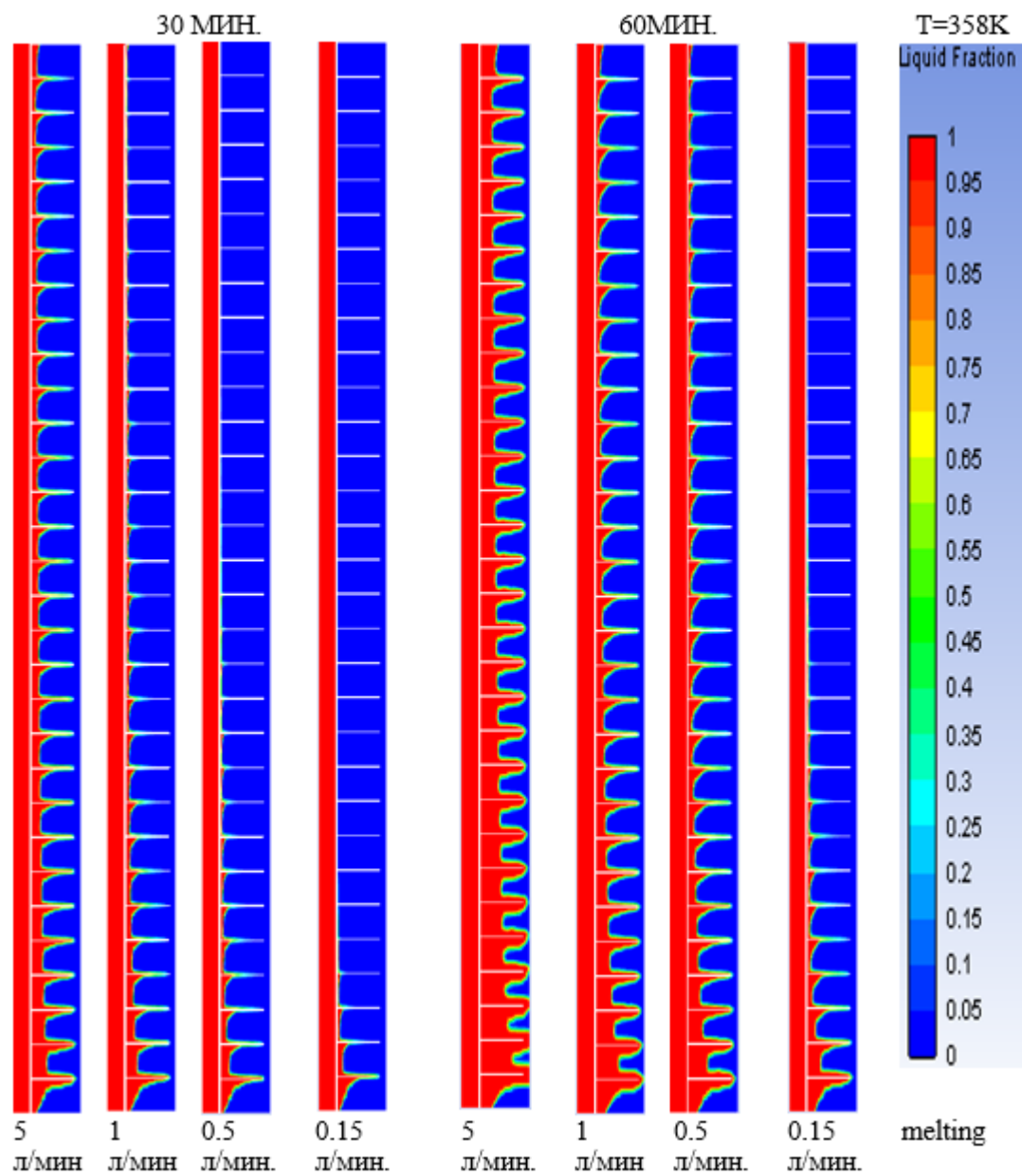


Рисунок В.15 – Контуры фракции расплава в момент времени 30 и 60 мин

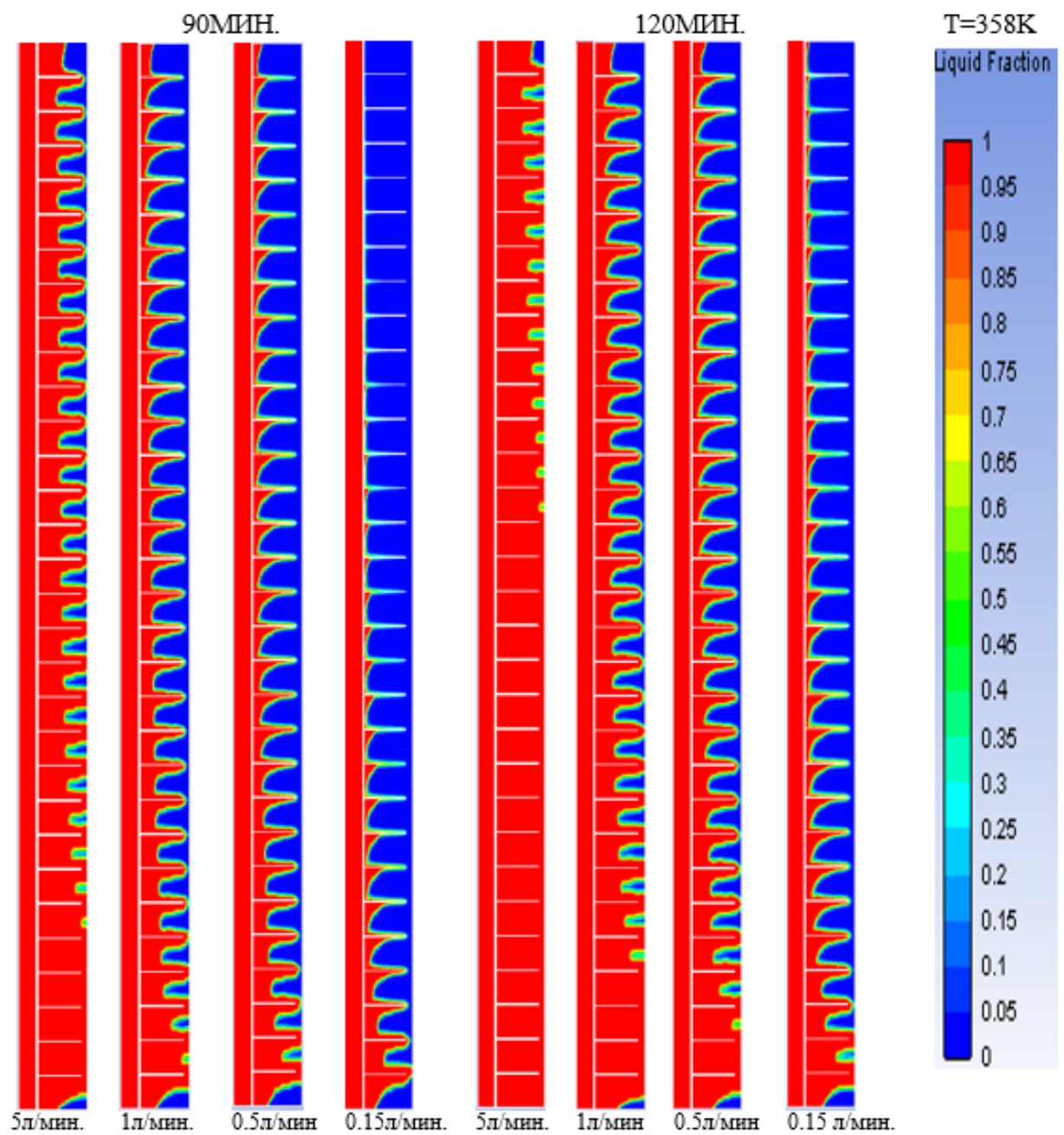


Рисунок В.16 – Контуры фракции расплава в моменты времени 90 и 120 мин

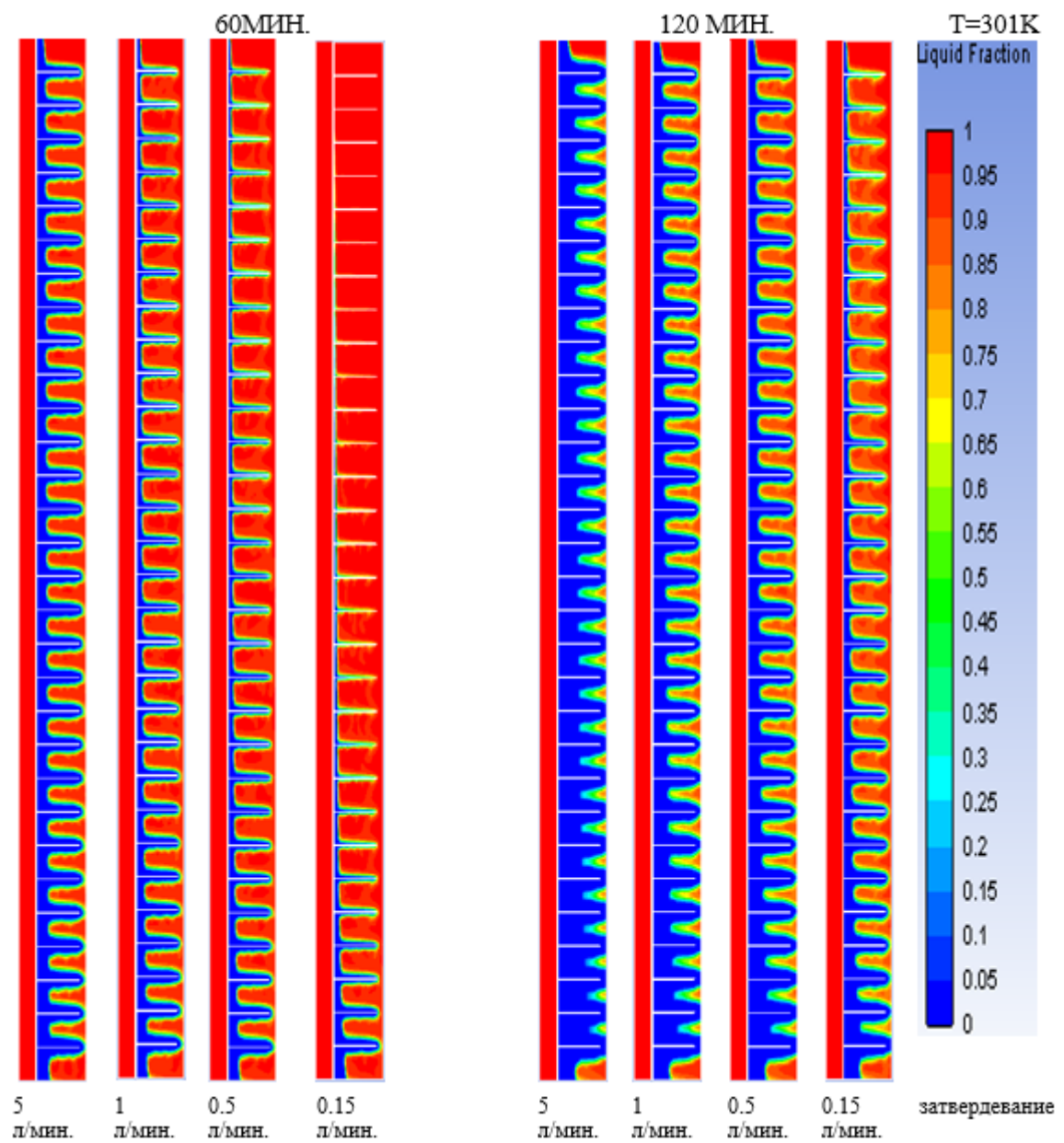


Рисунок В.17 – Контуры затвердевшей фракции при разном расходе теплоносителя при 60 и 120 мин

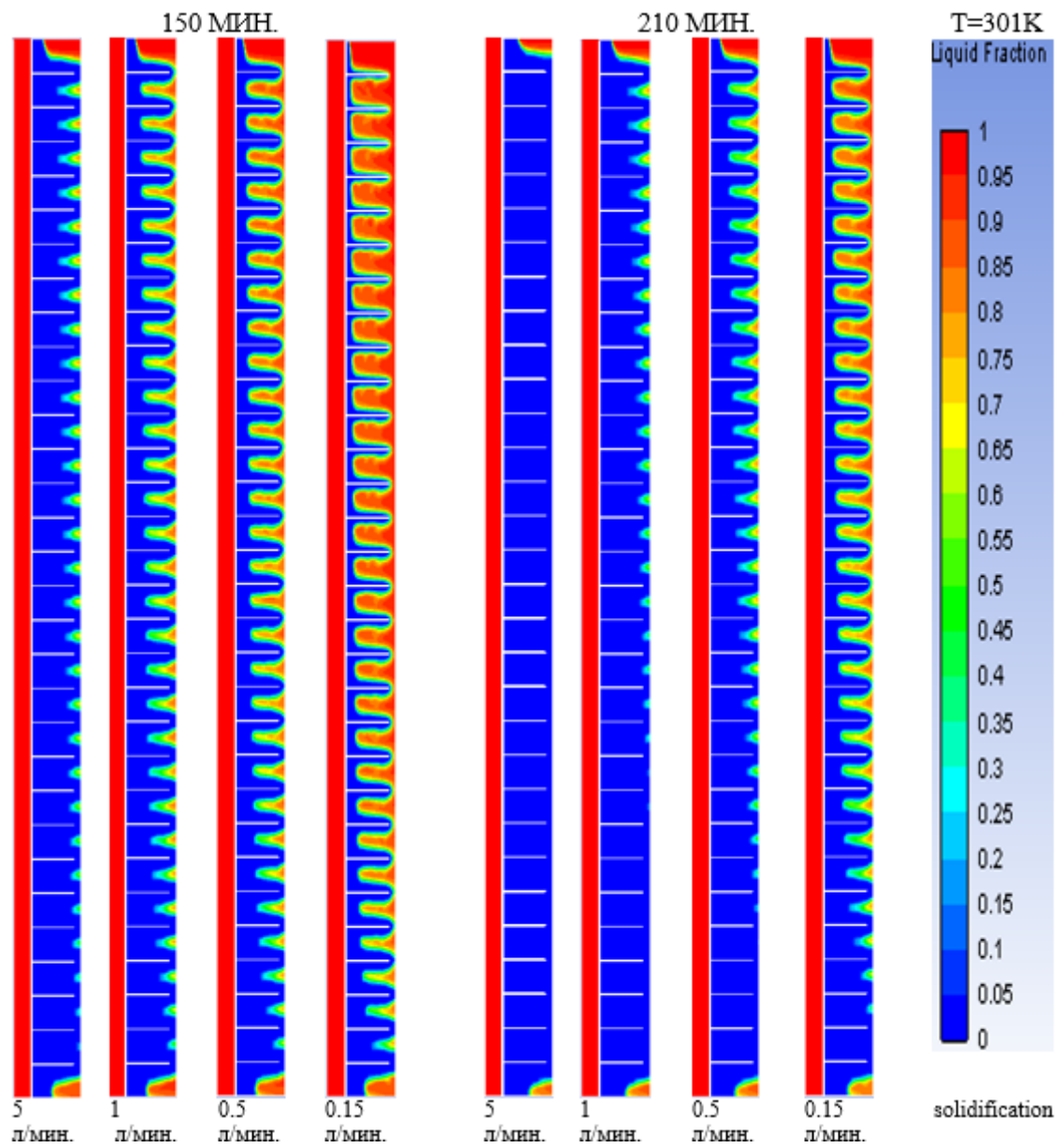


Рисунок В.18 – Контурь затвердевшей фракции при разном расходе теплоносителя при 150 и 210 мин

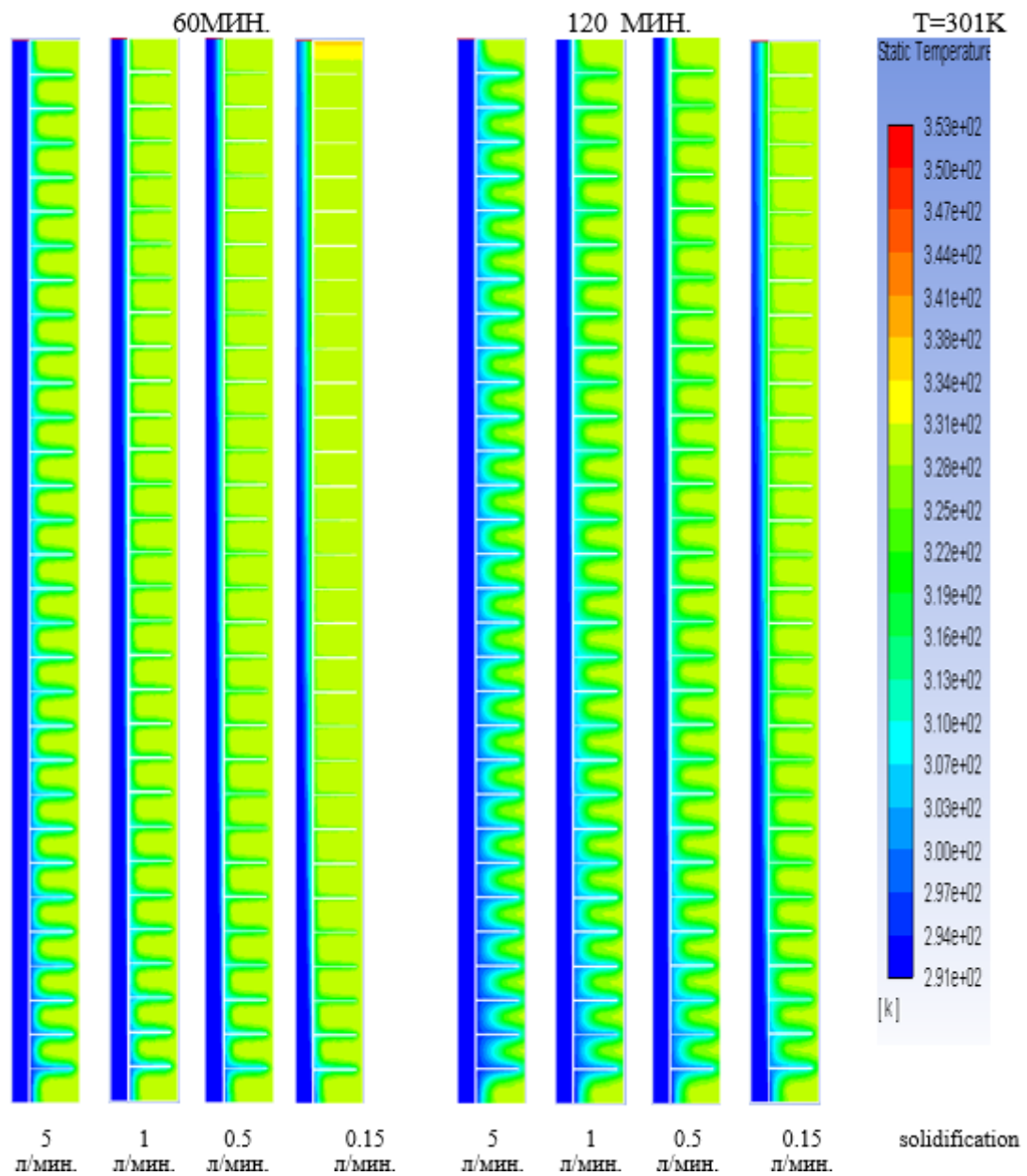


Рисунок В.19 – Температурные контуры в процессе застывания при различном расходе теплоносителя при 60 и 120 мин

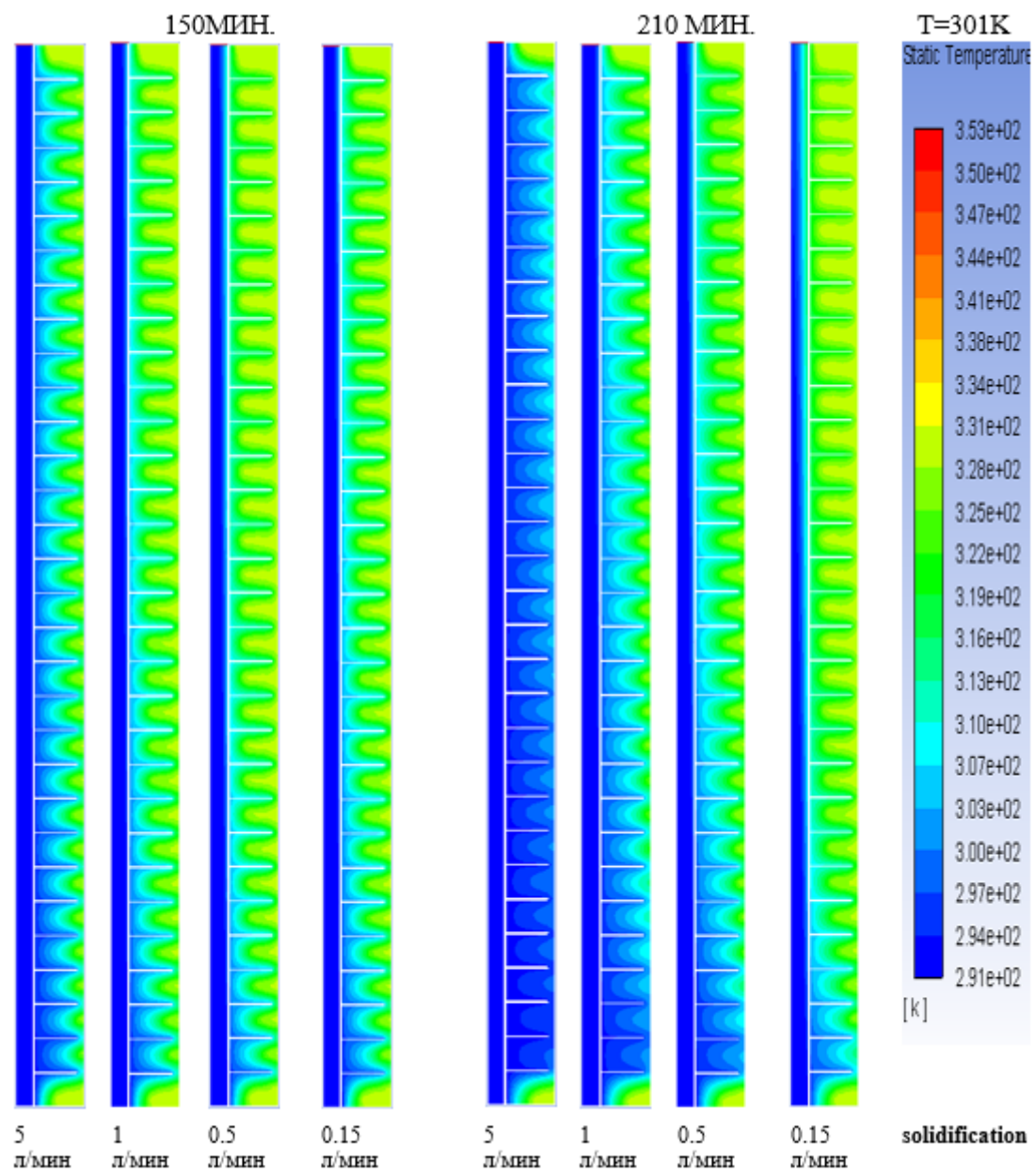


Рисунок В.20 – Контурные распределения температуры в процессе застывания при различном расходе теплоносителя при 150 и 210 мин

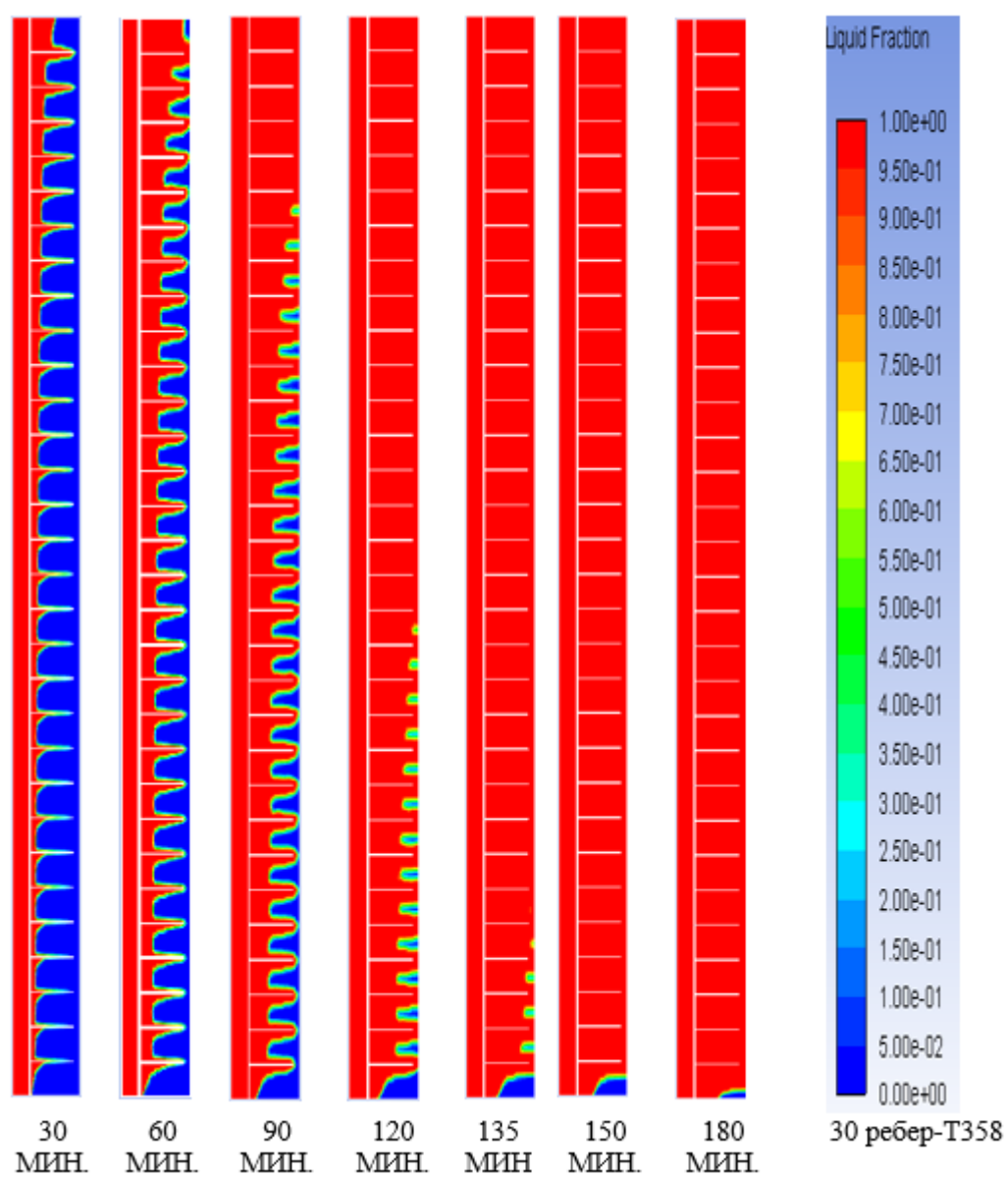


Рисунок В.21 – Контуры фракции плавления при нисходящем направлении теплоносителя при $T=358$ и расходе $=5$ л/мин

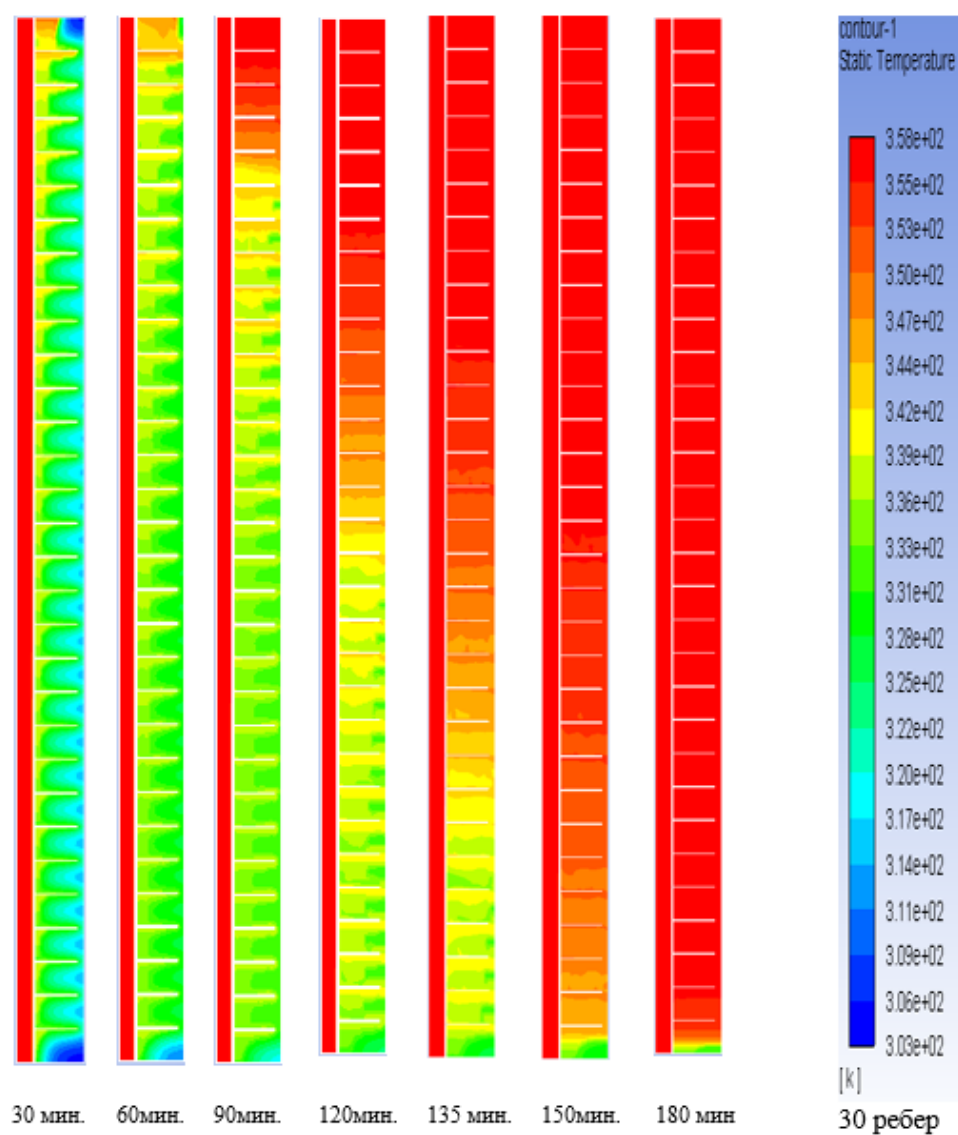


Рисунок В.22 – Температурные контуры в процессе плавки при нисходящем направлении теплоносителя при $T=358$ и расходе $=5\text{ л/мин}$

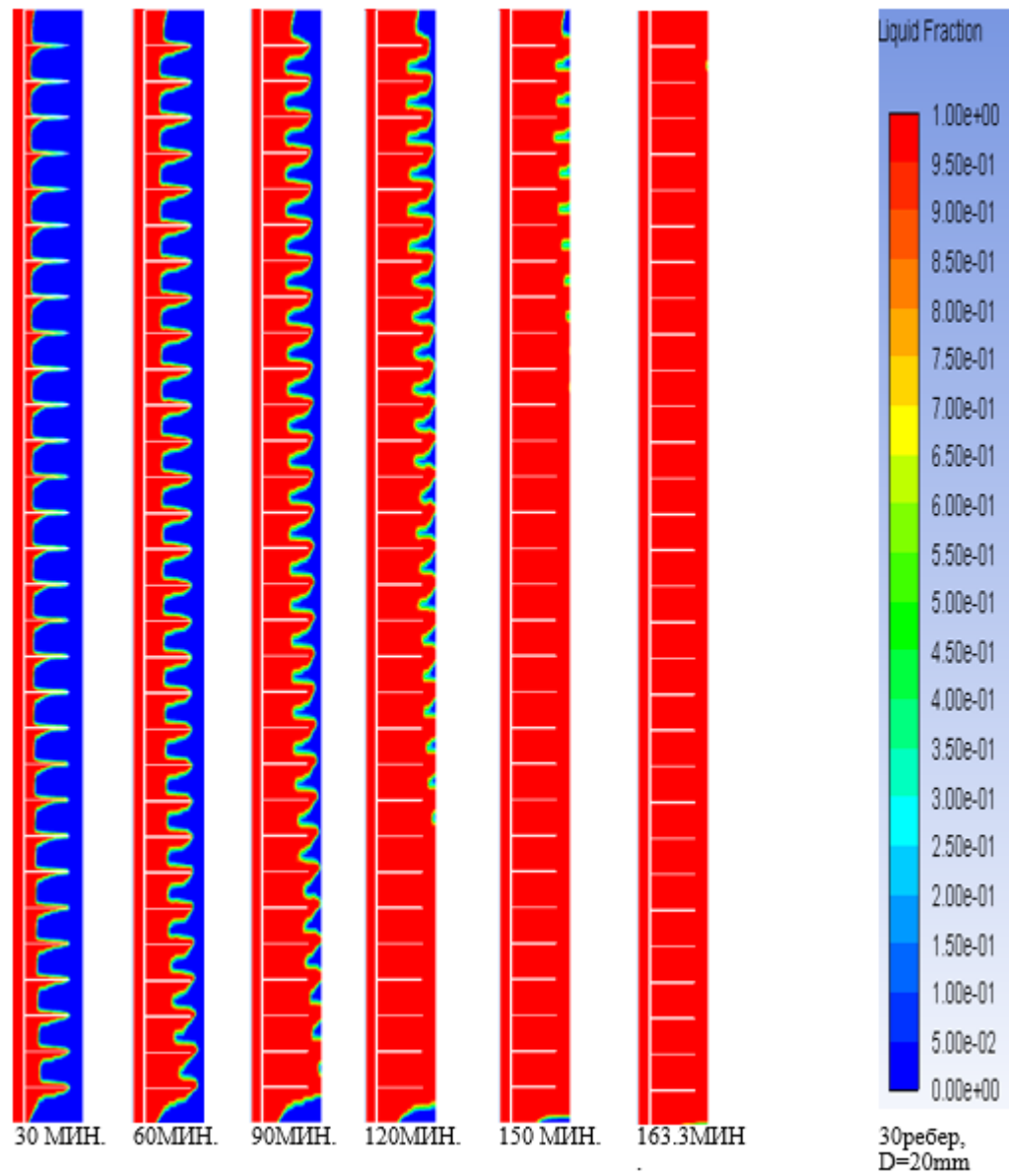


Рисунок В.23 – Контуры плавящейся фракции при восходящем направлении теплоноситель при $T=358$ и расходе $=5$ л/мин и внутреннем диаметре трубы 20 мм

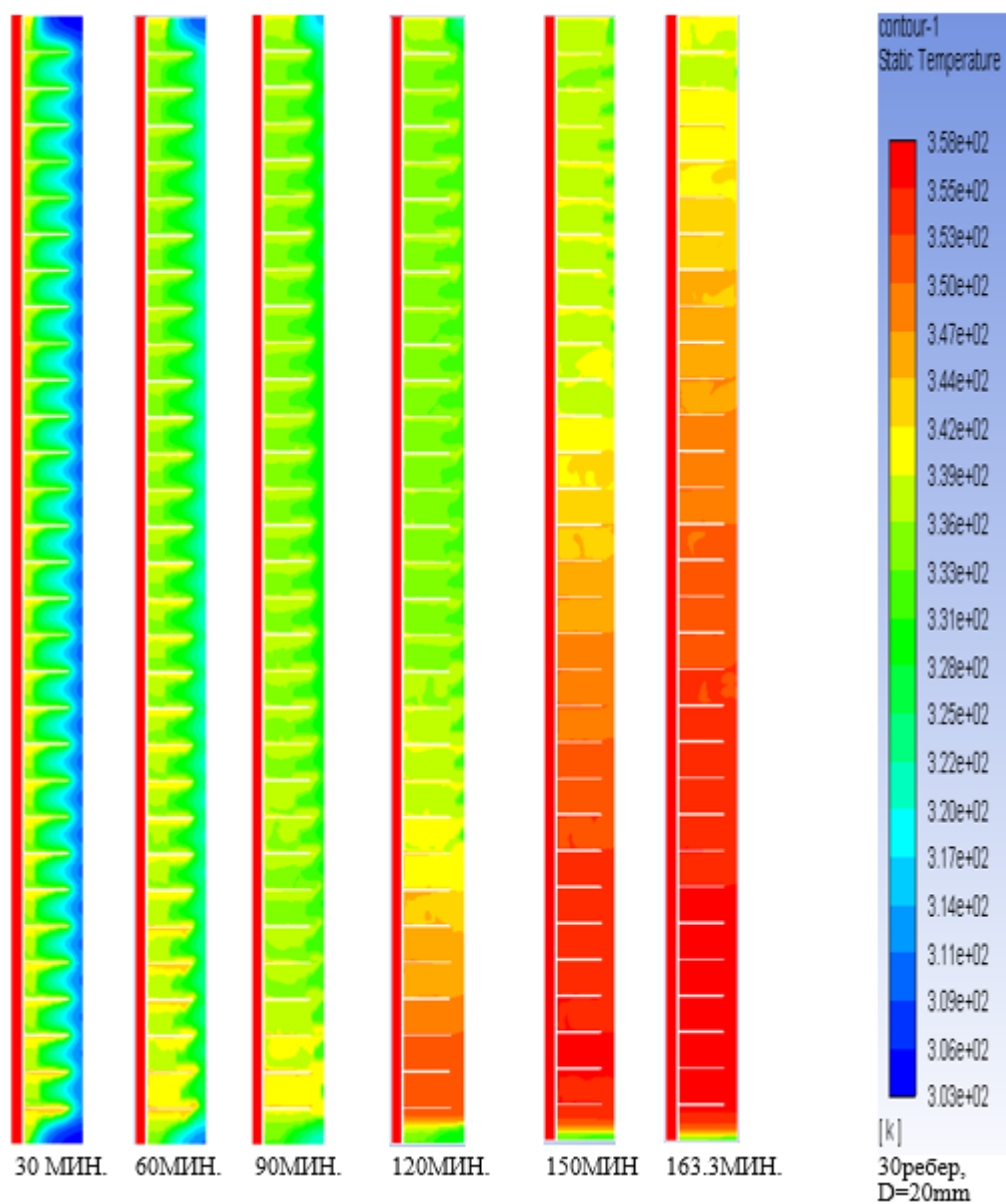


Рисунок В.24 – Температурные контуры в процессе плавки при восходящем направлении теплоноситель при $T=358$, расходе $=5$ л/мин и внутреннем диаметре трубы 20 мм

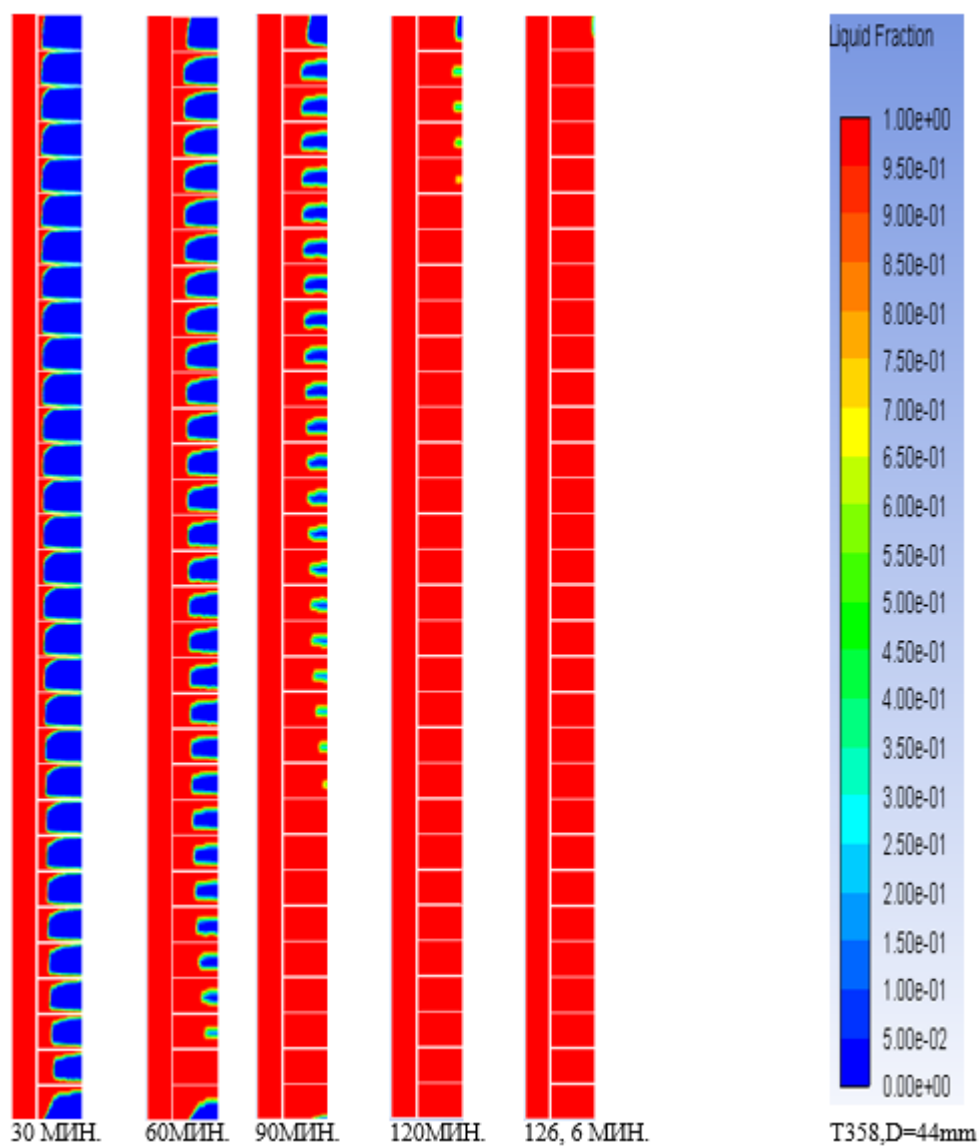


Рисунок В.25 – Температурные контуры в процессе плавки при восходящем направлении теплоноситель при $T=358$, расходе $=5\text{л/мин}$ и внутреннем диаметре трубы 20 мм

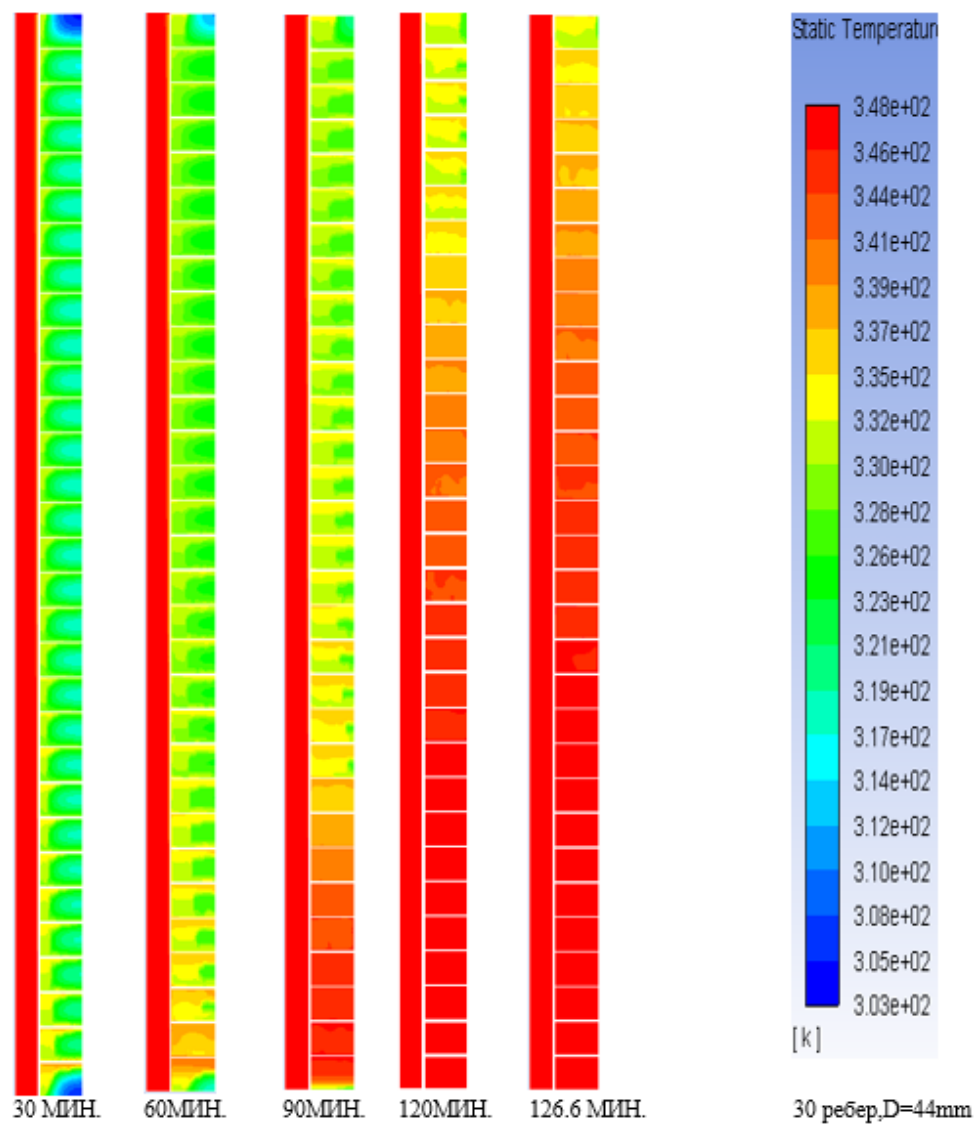


Рисунок В.26 –Температурные контуры в процессе плавки при восходящем направлении теплоноситель при $T=358$ расходе $=5\text{л/мин}$ и внутреннем диаметре трубы 44 мм

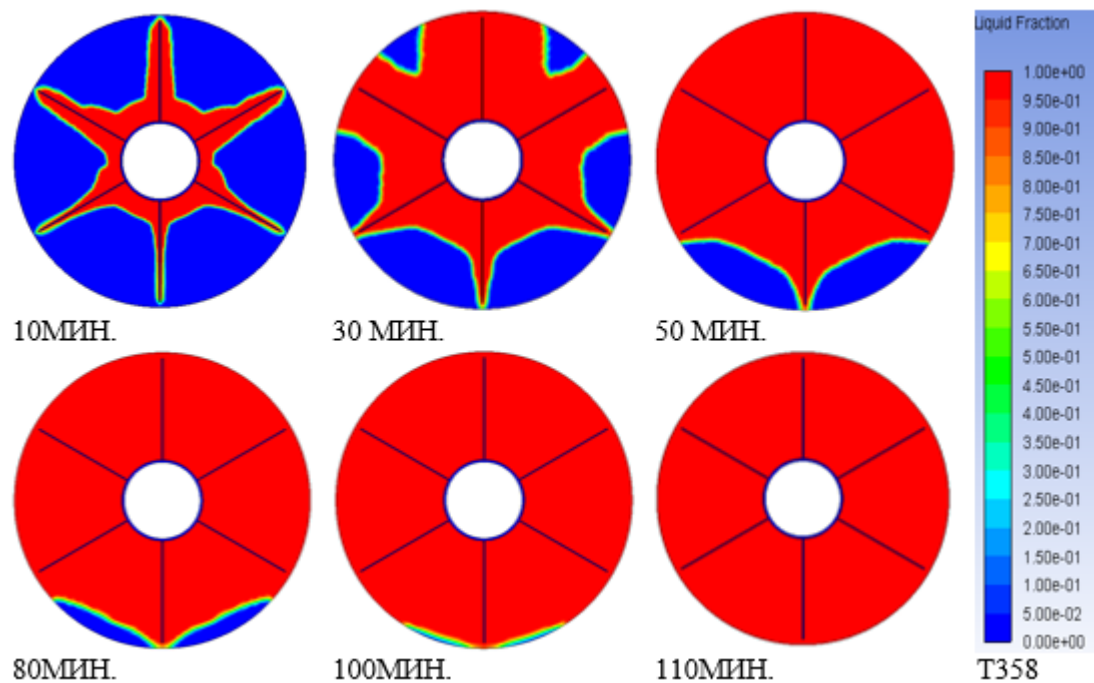


Рисунок В.27 – Контур фракции расплава продольных ребер

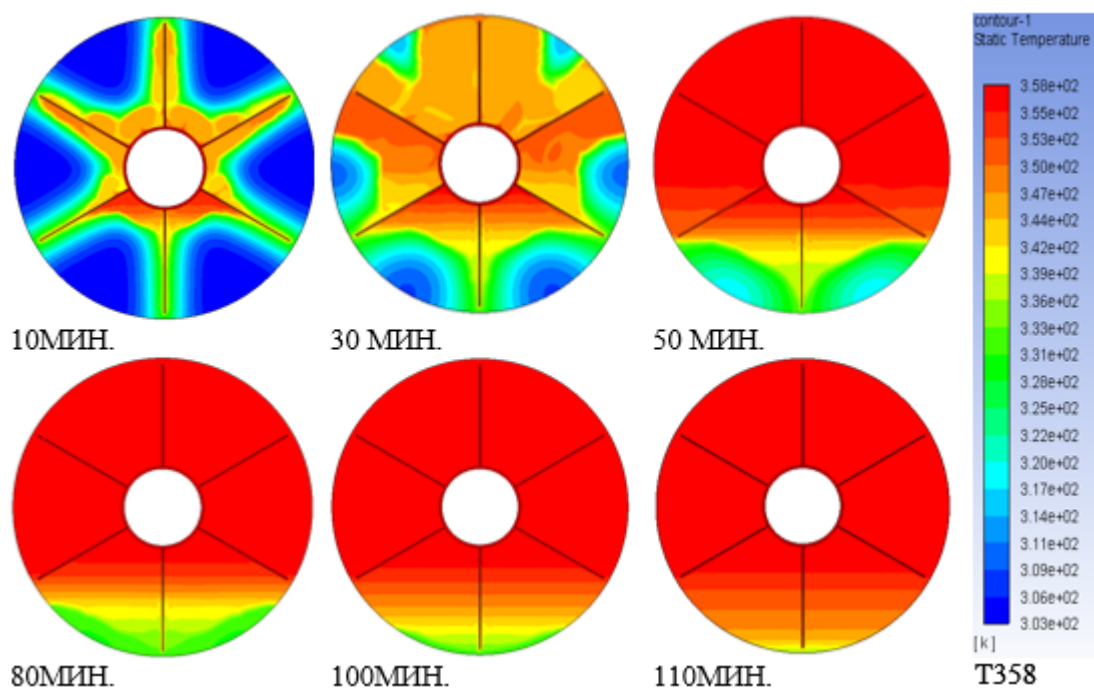


Рисунок В.28 – Температурный контур продольных ребер при плавке в процессе плавки

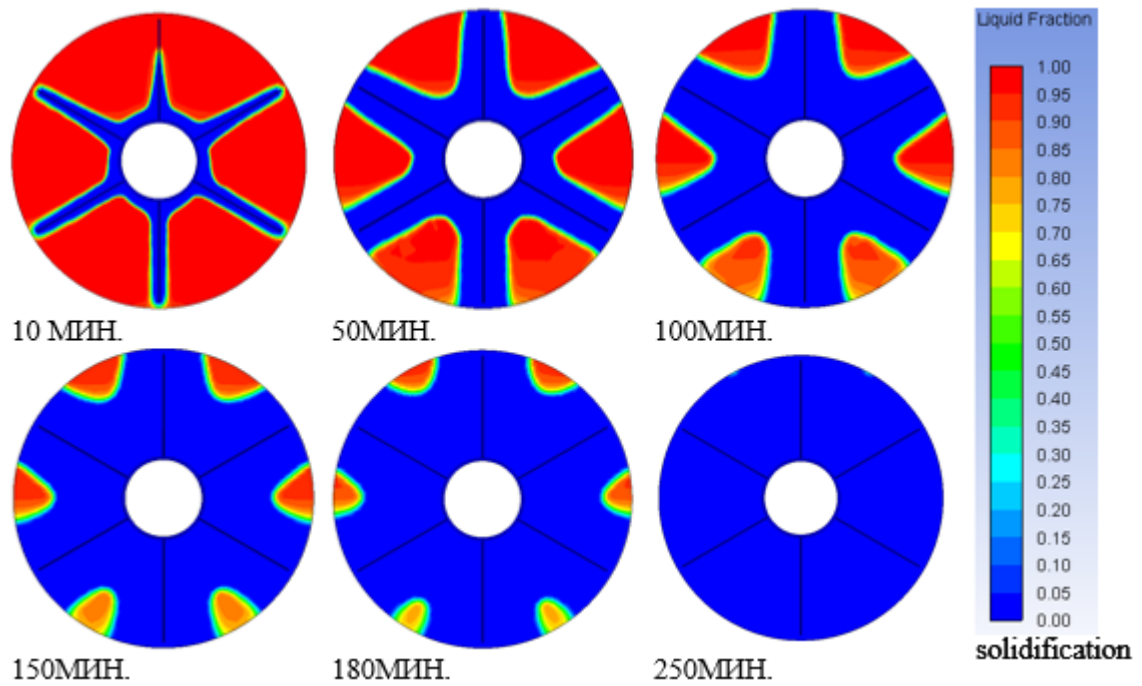


Рисунок В.29 –Контур фракции расплава продольных ребер в процессе застывания

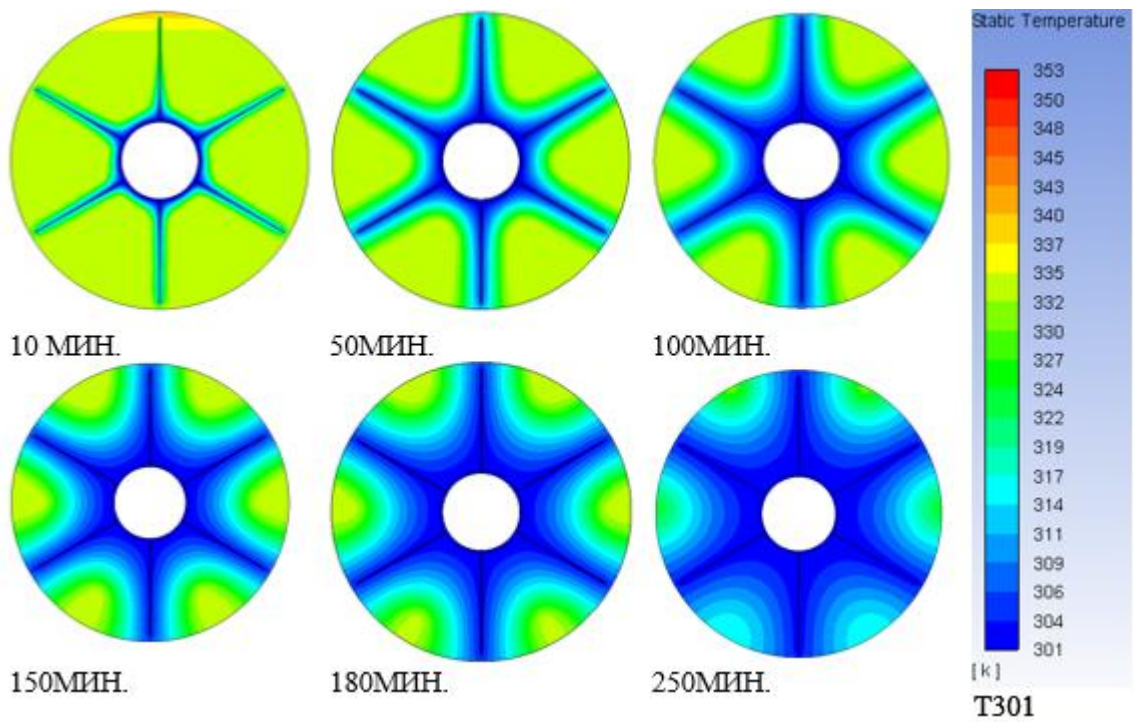


Рисунок В.30 – Температурный контур продольных ребер в процессе застывания

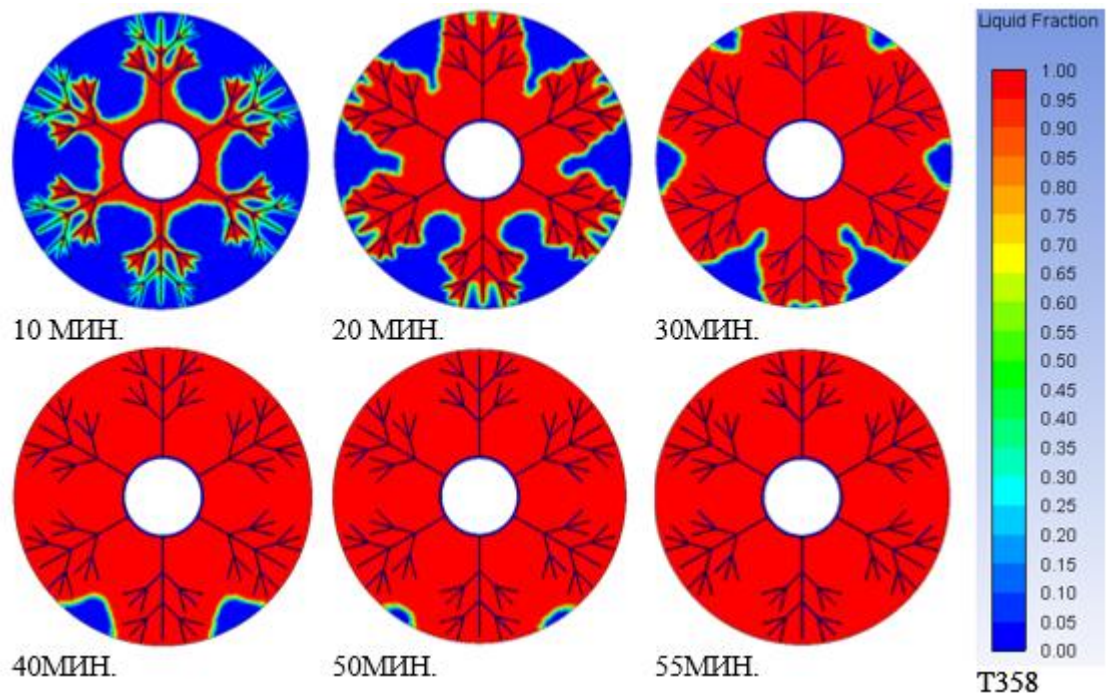


Рисунок В.31 – Контур фракции расплава продольных ребер с ветвями ребер в процессе плавки

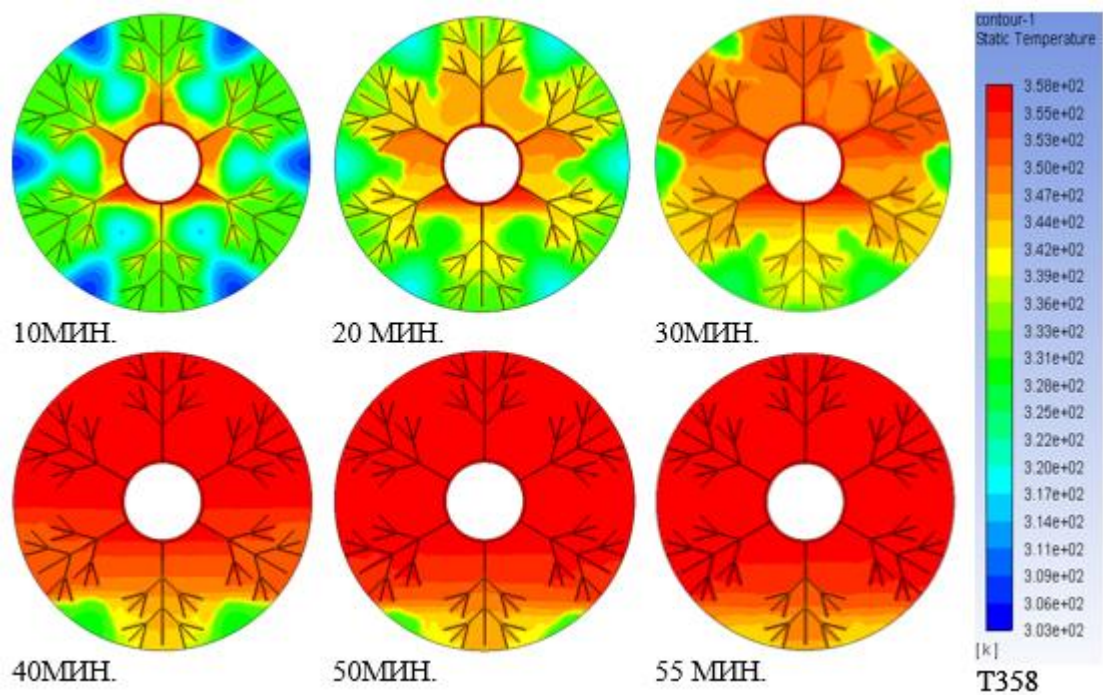


Рисунок В.32 – Температурный контур продольных ребер с ветвями ребер в процессе плавления

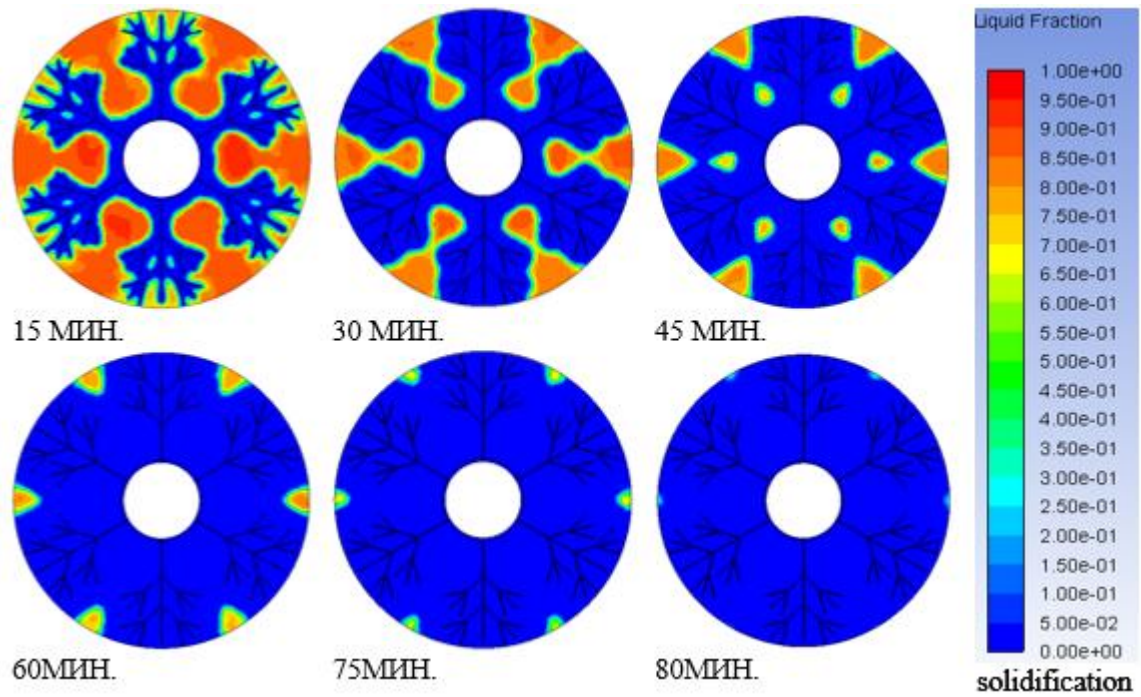


Рисунок В.33 – Контур фракции расплава продольных ребер с ветвями ребер в процессе застывания

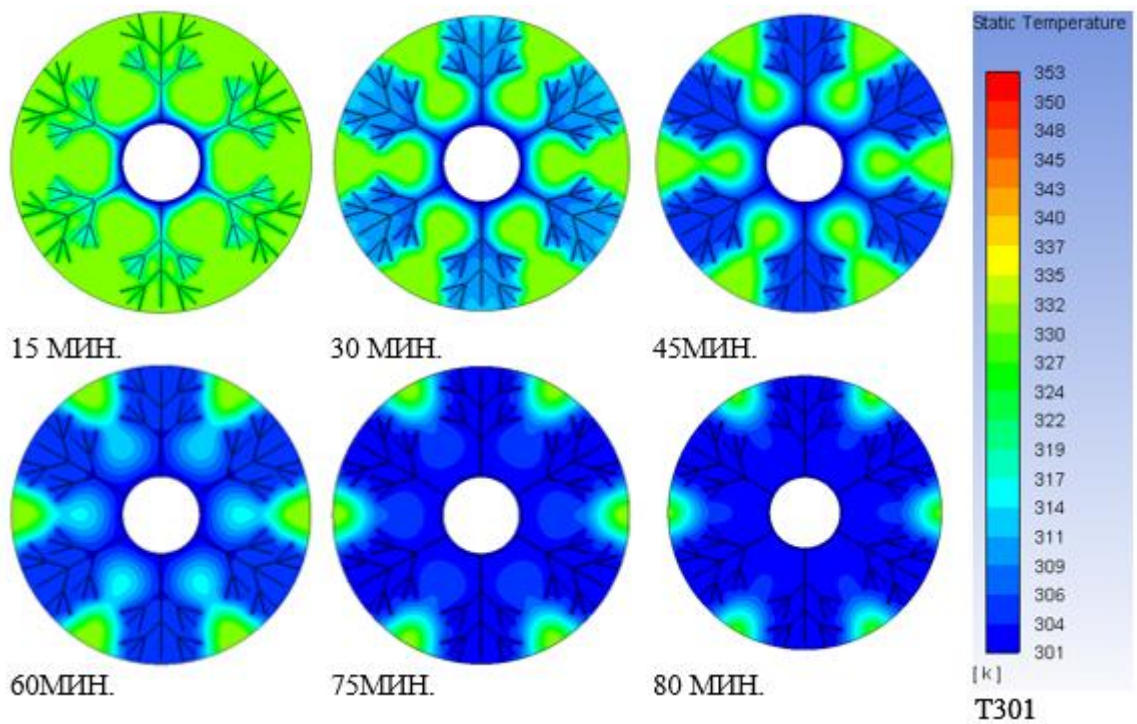


Рисунок В.34 – Температурный контур продольных ребер с ветвями ребер в процессе застывания

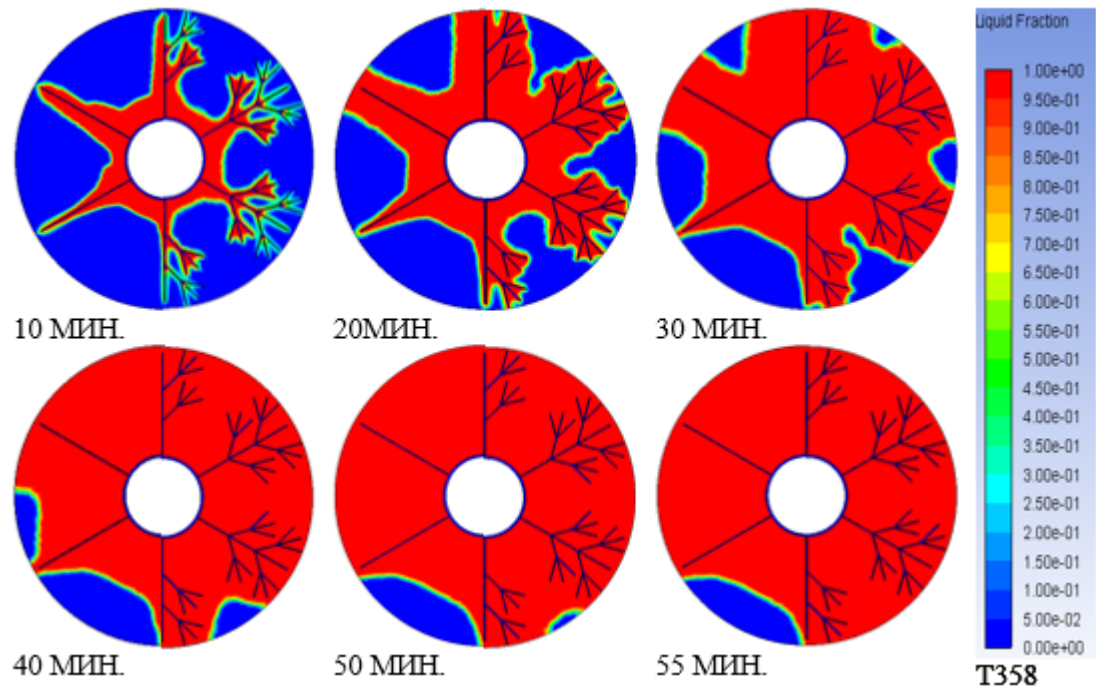


Рисунок В.35 – Контур фракции расплава продольных ребер и продольных ребер с ветвями ребер в процессе плавки

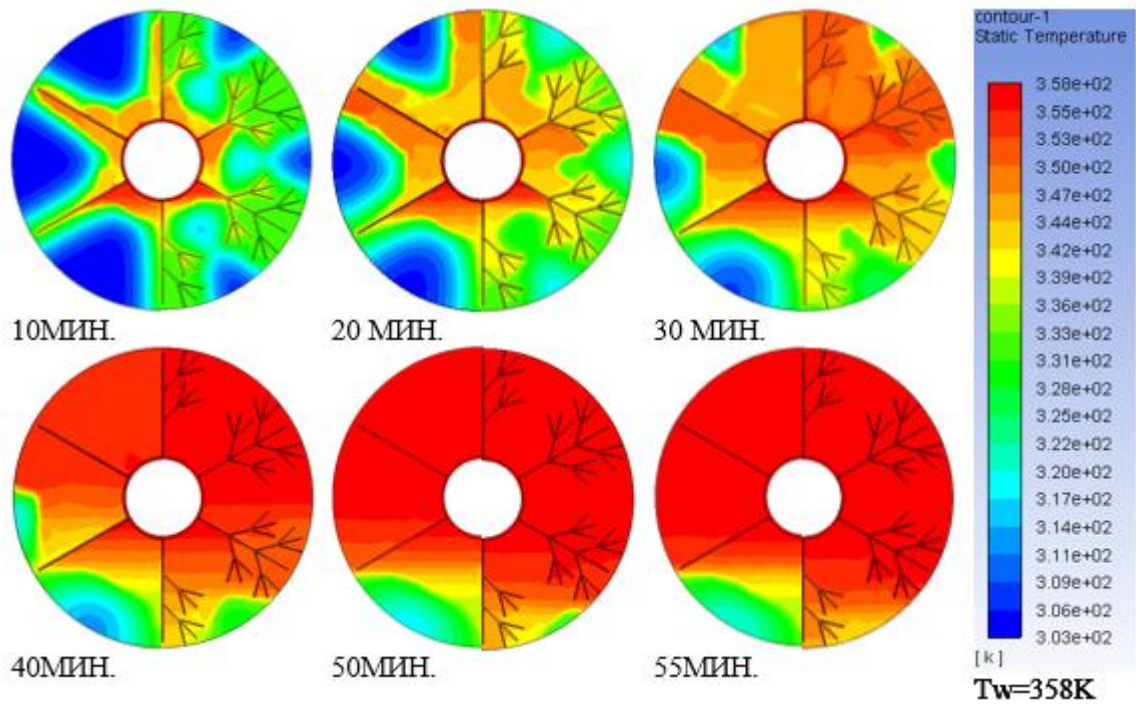


Рисунок В.36 – Температурный контур продольных ребер и продольных ребер с ветвями ребер в процессе плавления

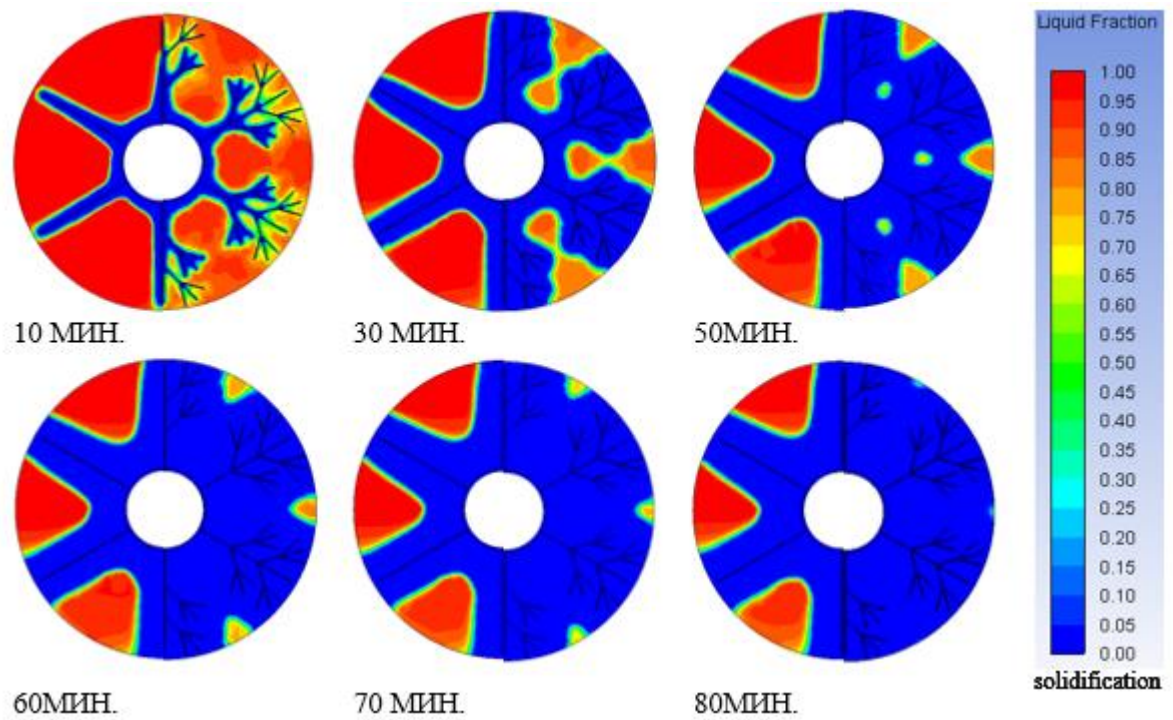


Рисунок В.37 – Контур фракции расплава продольных ребер и продольных ребер с ветвями ребер в процессе застывания

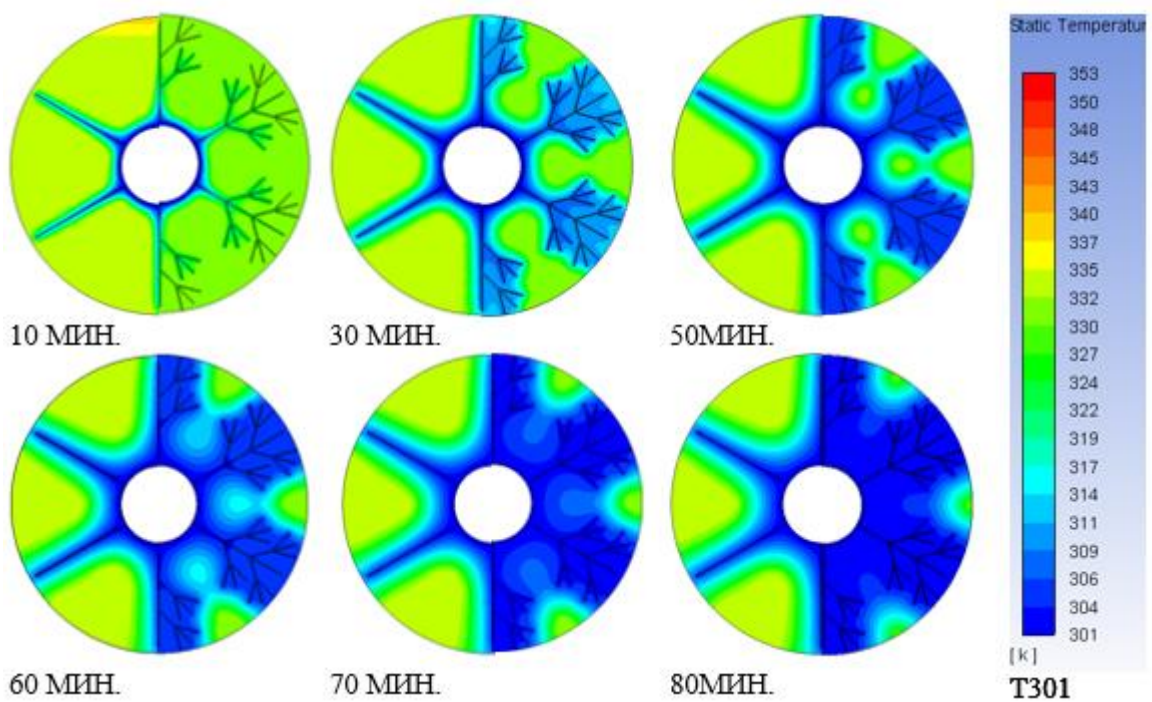


Рисунок В.38 – Температурный контур продольных ребер и продольных ребер с ветвями ребер в процессе застывания

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Патент на полезную модель

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 202391

АККУМУЛЯТОР ТЕПЛОТЫ С ФАЗОВЫМ ПЕРЕХОДОМ

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет» (RU)*

Авторы: *Амер Ахмед Элсайед Абделкафи Абделаал (RU),
Лебедев Владимир Александрович (RU)*

Заявка № 2020139947

Приоритет полезной модели 04 декабря 2020 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных

моделей Российской Федерации 16 февраля 2021 г.

Срок действия исключительного права

на полезную модель истекает 04 декабря 2030 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Изrael

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Акт внедрения

our experience engineer between your hand
Elarby Group

SPANISH
for Engineering Works



الإسبانية
للأعمال الهندسية

АКТ

о внедрении результатов кандидатской диссертационной работы
Амер Ахмед Элсайед Абделкафи Абделаал

Мы, нижеподписавшиеся, представители

«Spanish for Engineering works»

составили настоящий акт о внедрении и использовании результатов диссертационной работы А.Э.А.А.Амер, посвященной теоретическим основам анализа эффективности солнечных систем аккумулирования тепла с использованием материала фазового перехода в проектно-конструкторской деятельности предприятия при проработке вариантов проектирования установок по следующим направлениям:

1. Математическая модель оптимизации параметров систем аккумулирования тепла с использованием материалов с фазовым переходом.
2. Инженерная методика проектирования систем накопления тепловой энергии (теплоаккумуляторов) с фазовым переходом.

Внедрение и использование результатов диссертационной работы А.Э.А.А.Амер позволяет снизить потребление энергоресурсов за счет использования солнечной энергии путем аккумулирования тепла для предварительного нагрева теплоносителя (воды), а также снизить расходы на проектирование и разработку систем аккумулирования тепла для технологических нужд.



ABB Autronics
SENSORS & CONTROLLERS



Telemecanique

invt SIEMENS



العنوان الاسماعيلية المنطقة الصناعية بلوك ٨ تليفون 01069923114
بورسعيد مساكن الحرية عمارة ٧٢ الدور الثالث ش ٩ تليفون 01229593660 - 0663737602
مكتب القاهرة : ص.ب : ٤٠٠٦ الحي السابع مدينة نصر ت 01205553190
Email : sbees2012@yahoo.com <http://sbees.forumegypt.net>