

На правах рукописи

Амер Ахмед Элсайед Абделкафи Абделаал



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

*Специальность 05.14.04 – Промышленная
теплоэнергетика*

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет»

Научный руководитель:

кандидат технических наук, профессор

Лебедев Владимир Александрович

Официальные оппоненты:

Кожемякин Вячеслав Вячеславович

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», кафедра судовой ядерной и водородной энергетики, заведующий кафедрой;

Рябова Татьяна Владимировна

кандидат технических наук, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», доцент факультета энергетики и экотехнологий, руководитель образовательной программы.

Ведущая организация – Открытое Акционерное Общество «Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И. Ползунова», г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится 28 июня 2021 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета ГУ 2021.2 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия, д.2, ауд. № 1171-а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 28 апреля 2021 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



Юшкова
Екатерина Александровна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Актуальность темы исследования: 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. Среди проблем египетского энергетического сектора основными являются:

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

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 энергетике 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.

Весьма эффективной теплоэнергетической технологией использования нетрадиционных и возобновляемых источников энергии, как признано в стратегии, является солнечная энергетика. Несмотря на очевидные преимущества солнечной энергетике, ей присущи и существенные недостатки, заключающиеся в неравномерности поступления солнечной энергии в течении суток. Проблемы неравномерности поступления солнечной энергии решаются путем использования систем аккумулирования тепла.

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.

Таким образом, разработка новых научных и технических решений в области теплового аккумулярования 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: Основой для исследования в области теплового аккумулярования энергии с использованием материалов с фазовым переходом стали работы следующих авторов: Осташенкова А. П., Онучина Е. М., Медякова А. А., Бабаева Б. Д., Макфи Д., Шарма А., Тяги В. Чэнь Си-и Буддхи-Д., Барнс Ф. С., Левиной Ю. Г. и др. В этих работах приведена классификация ФТАМ и установлено, что использование теплоты фазового перехода является эффективным способом хранения тепловой энергии и обладает преимуществами высокой плотности аккумулярования энергии. Различные исследователи использовали ФТАМ во многих инженерных приложениях, таких как солнечные системы водяного и воздушного отопления, системы рекуперации отработанного тепла, аккумулярование тепла в транспортных системах, энергетических технологиях и других.

Вопросам экспериментального и численного моделирования процессов, происходящих в ФТАМ при плавлении и застывании рабочих тел посвящены работы Меттави и Ассасса, Zhong Y и др., Regin A. F. и соавт., М. Акгун и соавт., Ахмет Сари и Камил Кайгусуз, Омар Сануси и соавт., Де Грасиа и соавт., М. Акгун и соавт. и другие. Вопросы конструктивного исполнения теплоаккумуляторов с ФТАМ рассмотрены в трудах Хоссейни М. Дж. и соавт., Саид Седдег и соавт., Алу К. и соавт., Хоссейни М.

Дж. и соавт. , Guellil Хосин и соавт. , Исмаэль и соавт., Гурунараяна Рави и соавт., М. Рахими и соавт., Tay N. H. S. et al.

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.

Основные задачи исследования:

1. Провести анализ материалов для систем аккумулирования тепловой энергии и разработать методику выбора материала с фазовым переходом.

2. Разработать численную модель процессов изменения свойств материала с фазовым переходом.

3. Провести исследование поведения теплоаккумулирующего материала в вертикальном кожухотрубном теплоаккумуляторе с поперечными ребрами в зависимости от конструктивных и эксплуатационных параметров.

4. Провести исследование поведения теплоаккумулирующего материала в горизонтальном кожухотрубном теплоаккумуляторе с продольным размещением ребер.

5. Разработать инженерную методику создания систем аккумулирования теплоты с материалами с фазовым переходом 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 оребрения 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.

Методология и методы исследования:

Для выбора рабочего тела – теплоаккумулирующего материала с фазовым переходом (ФТАМ) использованы методы системного анализа 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 ребрения 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» (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» (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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во *введении* обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимости исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проводится обзор эффективности использования солнечной энергии на промышленных предприятиях Египта. Приведены составляющие энергетического сектора Египта. Произведен обзор экспериментальных и численных

исследований в области использования теплоаккумулирующих систем с материалами, имеющими фазовые переходы. По результатам исследований, проведенных в 1 главе, сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Во *второй* главе разработана методика выбора термоаккумулирующего материала для систем аккумулирования тепловой энергии. Рассмотрены основные критерии выбора ФТАМ. Произведен анализ основных материалов для систем аккумулирования тепловой энергии с фазовым переходом. На базе проведенных исследований были разработаны критерии выбора ФТАМ и выбраны материалы, в наибольшей степени подходящие для использования в системах аккумулирования тепла солнечных систем теплоснабжения. Предложена методология выбора материала с фазовым переходом для систем аккумулирования тепла, которая позволяет выбирать ФТАМ, используя комплекс научно-обоснованных критериев и разработанную иерархическую факторно-критериальную модель на базе метода анализа иерархий.

Третья глава посвящена разработке численной модели процессов изменения свойств материала с фазовым переходом.

Численная модель базируется на основных математических зависимостях тепломассобмена в материалах с фазовым переходом. Математические уравнения, используемые для решения моделей застывания и плавления, основаны на методе энтальпии-пористости. Моделирование выполнено в программной среде ANSYS FLUENT (программа вычислительной гидродинамики (CFD)). Результаты численного моделирования были проверены на адекватность модели экспериментальным данным.

В работе представлены результаты численного моделирования при исследовании темпов плавления и застывания ФТАМ внутри вертикального кожухотрубного теплоаккумулятора с кольцевым оребрением. Получены оптимальные параметры оребрения для предложенной конструкции теплоаккумулятора: число ребер, толщина ребер, шаг оребрения и соотношение размеров ребер.

Исследованы 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 ФТАМ внутри аккумулятора. Разработана численная модель процессов плавления и застывания ФТАМ в запатентованной конструкции аккумулятора, а также произведен сравнительный анализ эффективности двух вариантов конструкций продольных ребер.

В *четвертой главе* разработана инженерная методика создания систем аккумулирования теплоты с ФТАМ для солнечного теплоснабжения. Определены основные параметры системы аккумулирования теплоты. Приведена методика расчета системы солнечного теплоснабжения с теплоаккумулятором с фазовым переходом. Произведен экономический анализ использования системы аккумулирования тепла с ФТАМ и оценка воздействия системы аккумулирования теплоты с ФТАМ на окружающую среду. Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

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.

В результате проведенного анализа существующих ФТАМ на предмет их использования в качестве рабочего тела для теплоаккумуляторов систем солнечного теплоснабжения была определена группа материалов: парафин, лауриновая кислота, миристиновая кислота, пальмитиновая кислота и стеариновая кислота. В соответствии с принципами системного анализа разработана иерархическая структура (дерево целей), имеющая три уровня: цель, множество критериев и множество альтернатив (рисунок 1). При выборе ФТАМ учитывалось влияние таких факторов, как термоциклирование, коррозионная стойкость, а также фазовая сегрегация и переохлаждение, на работоспособность ФТАМ в качестве рабочего тела.

В результате решения первой задачи исследования методом анализа иерархий были определены глобальные веса альтернативных ФТАМ, позволяющие определить их приоритеты при выборе ФТАМ для систем аккумулирования тепла в солнечных системах теплоснабжения (рисунок 2):

Таким образом было выявлено, что наилучшим материалом с фазовым переходом, который можно использовать для солнечных водонагревательных систем с учетом всех проанализированных критериев, является парафин (Р) с общим весом 41,52%. Поэтому именно парафин рассматривается в качестве рабочего тела в дальнейших исследованиях.

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.

Математическая постановка задачи исследования переходного процесса, происходящего при фазовом изменении состояния рабочего тела описывается дифференциальным уравнением в частных производных, которое может быть решено аналитически или численно. Модель процесса плавления с использованием энтальпийно-пористой формулировки для ламинарного течения с уравнениями Навье-Стокса основывается на известных уравнениях непрерывности, энергии и импульса:

Уравнение неразрывности(1):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho) + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad (1)$$

Уравнение энергии(2) :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \nabla \cdot (\rho v H) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S \quad (2)$$

где H - энтальпия, ρ - плотность, v -скорость жидкости, k -теплопроводность, S -источник внутреннего тепла, t - время. Энтальпия материала, H (3) рассчитывается как сумма энтальпии тепловой емкости материала h , и скрытой теплоты фазового перехода ΔH :

$$H = h + \Delta H \quad (3)$$

Энтальпия h , рассчитывается как (4):

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T C_p dT \quad (4)$$

где h_{ref} -эталонная энтальпия, T_{ref} -эталонная температура, а C_p - удельная теплоемкость при постоянной температуре.

Скрытая теплота фазового перехода (5):

$$\Delta H = \beta L \quad (5)$$

Доля расплавленного материала в единице объема β (иногда ее называют жидкой фракцией) (6):

$$\beta = \begin{cases} 0 & T < T_S \\ \frac{T-T_S}{T_L-T_S} & T_S \leq T \leq T_L \\ 1 & T > T_L \end{cases} \quad (6)$$

рассчитывается на каждой итерации на основе баланса энтальпии.

Приведенные зависимости используются для модификации уравнений импульса в мягкой зоне (7):

$$S = v A_{mush} \frac{(1-\beta)^2}{\beta^3 + \varepsilon} \quad (7)$$

где β -жидкая фракция, ε -небольшое число (0,001), предотвращающее деление на ноль, а A_{mush} -постоянная мягкой зоны, равная 10^5 .

Для упрощения модели использовано приближение Буссинеска, где плотность жидкости считается постоянной во всех членах уравнения импульса, кроме сил веса, поскольку обеспечивает более быструю сходимость, чем другие модели, зависящие от температуры. Модель строится на основе эталонной плотности (ρ_0) и температуры (T_0), а также коэффициента объемного расширения (β_{tec}) (8).

$$(\rho - \rho_0)g = -\rho \beta_{tec}(T - T_0) \quad (8)$$

Тогда уравнение импульса записывается как (9):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_0 v) + \nabla \cdot (\rho_0 v v) = -\nabla P + \nabla \cdot (\mu \nabla v) + (\rho - \rho_0) g v A_{mush} \frac{(1-\beta)^2}{\beta^3 + \varepsilon} \quad (9)$$

где ρ_0 -эталонная плотность, P -давление, μ -динамическая вязкость, β -жидкая фракция, β_{tec} -коэффициент теплового расширения, T_0 -рабочая температура.

Вычислительное исследование выполняется с использованием приложения Fluent программного обеспечения ANSYS. Модели затвердевания 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, для уравнения коррекции давления использовалась имитация переходного процесса с использованием схемы с изменением давления (PRESTO), а для соединения скорости со скоростью изменения давления использовался алгоритм Coupled.

Физическая модель теплоаккумулятора представлена на рисунке 3. Теплопередача в цилиндре основана на двух механизмах:

1) в жидком ФТАМ, при взаимодействии ФТАМ с поверхностью внутренней трубы и взаимодействии между жидким ФТАМ и ФТАМ в твердой форме, передача теплоты осуществляется главным образом конвекцией;

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 4 (Механизм плавления ФТАМ по высоте цилиндра). Следовательно, фронт плавления не имеет цилиндрической формы и визуализируется как коническая форма. Верхняя часть ФТАМ в цилиндре плавится намного быстрее, чем

нижня. Этот вывод согласуется с тем, что наблюдалось во время экспериментов.

На рисунке 5 показано изменение температуры ФТАМ по высоте цилиндра с использованием комбинированной модели теплопередачи (теплопроводность и конвекция) во время процесса зарядки.

Численные результаты подтверждаются сравнением с экспериментальными результатами М. К.Ратод и Дж.Банерджи, как показано на рисунке 6 (валидация численной модели).

Третья задача посвящена исследованию поведения ФТАМ в вертикальном кожухотрубном ТА с поперечными ребрами, позволяющими значительно увеличить эффективность процессов теплопередачи в ТА. Физическая модель кожухотрубного ТА с поперечными ребрами приведена на рисунке 7:

Результаты численного моделирования для физической модели ТА с ребрением из 6 кольцевых ребер представлены на рисунках 8 и 9. и показывают, что время плавления уменьшается на 53,125% по отношению к конструкции без ребер.

Возможности численной модели позволили производить оптимизацию конструктивных особенностей теплоаккумуляторов и определять оптимальные эксплуатационные характеристики систем аккумулирования тепла. За критерий оптимальности выбрано время полного плавления($t_{пл}$) ФТАМ: $t_{пл} \rightarrow \min$

При оптимизации конструктивных элементов ТА исследовалось влияние на общее время плавления таких параметров как число ребер N , длина ребер h , толщина ребер t , шаг ребер d и их соотношение. На рисунке 10 показана зависимость полного времени плавления ФТАМ от числа ребер. Анализ показал, что при достижении числа ребер до $N=30$ дальнейшего снижения времени плавления не происходит. В таблице 1 представлены результаты расчетов оптимальных конструктивных параметров ТА с ФТАМ.

Полученные результаты использовались для определения зависимостей времени плавления ФТАМ от основных эксплуатационных параметров:

На рисунке 11 показано влияние температуры на входе в ТА на время плавления. При увеличении температуры на входе время

плавления уменьшается. На рисунках 12 и 13 показано влияние расхода теплоносителя на время плавления и время застывания. При увеличении расхода время плавления и время застывания уменьшается. На рисунке 14 показано влияние скорости потока на разницу температур теплоносителя. Было замечено, что перепады температур между входом и выходом теплоносителя велики для случая низкого расхода. На рисунке 15 показано влияние направления потока теплоносителя на скорость и время плавления. Замечено, что время плавления парафина практически не зависит от направления потока. На рисунке 16 показано влияние внутреннего диаметра трубы теплоносителя на время плавления. При увеличении внутреннего диаметра трубы время плавления уменьшается.

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.

Для анализа теплофизических процессов использована оригинальная запатентованная конструкция горизонтального теплоаккумулятора с ФТАМ, имеющего разветвленную систему продольных ребер (рисунок 17). Для оценки эффективности разветвленности ребер в работе произведен сравнительный анализ двух систем продольных ребер – без разветвлений и с разветвлениями, причем исследования и анализ производились для поперечных сечений ТА.

Результаты численного моделирования позволяют провести анализ процессов плавления и застывания ФТАМ для различных конфигураций продольных ребер:

а) Процесс плавления

Анализ показывает, что доля жидкой фракции составила около 24,3% и 29,6% через 10 минут для продольных ребер и разветвленных продольных ребер соответственно. Это указывает на то, что эффект разветвленности ребер незначительно увеличивает жидкую фракцию. Для полного расплавления парафина в разветвленных продольных ребрах требуется около 55 минут, а в

обычных продольных ребрах - около 110 минут. Полученные результаты показали, что использование разветвленных продольных ребер повышает теплопередачу и, следовательно, сокращает время плавления примерно на 50% по сравнению с традиционными продольными ребрами.

б) Процесс застывания

Анализ показывает, что ФТАМ необходимо около 80 минут, чтобы полностью застыть в ТА с разветвленными продольными ребрами, в то время как в ТА с продольными ребрами он занимает около 250 минут. Полученные результаты показали, что использование разветвленных продольных ребер повышает теплопередачу и, следовательно, сокращает время застывания ФТАМ примерно на 68% по сравнению с системой продольных ребер.

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 ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. 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.

2. 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. (МБДиСЦ GeoRef)

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

3. 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. – №. 1. – P. 012044.

4. Amer, A.E. Numerical Investigations on Latent Heat Storage Unit using Phase Change Material/ A.E. Amer, V. A. Lebedev // Journal Physics Conference Series. – 2020. – Vol. 1565. – № 1. – P. 012099.

5. 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 // Journal Physics Conference Series. – 2020. – Vol. 1614. – № 1. – P. 012022

Патент:

6. 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». – 7с.

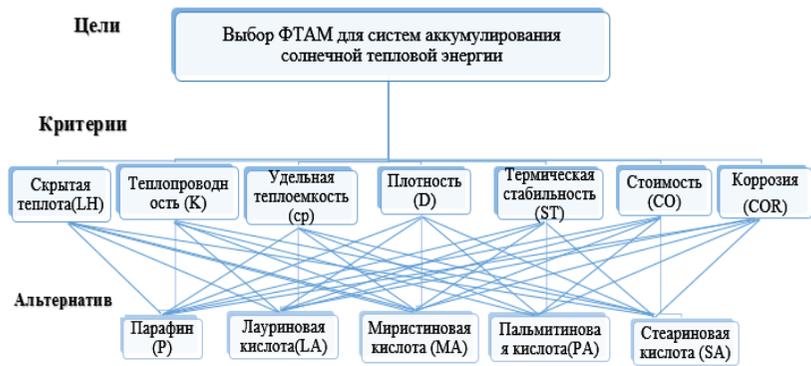


Рисунок 1 – Дерево целей задачи выбора

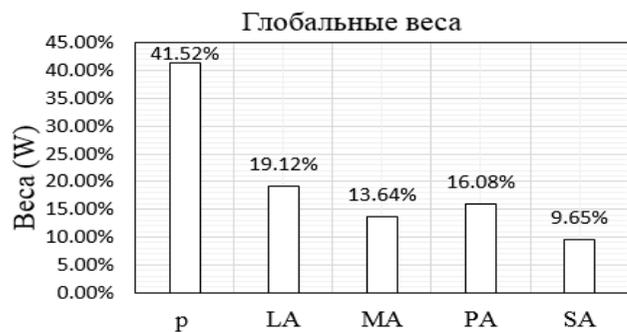


Рисунок 2 – Глобальные веса для альтернатив (Парафин (P), Лауриновая кислота (LA), Миристиновая кислота (MA), Пальмитиновая кислота (PA), и Стеариновая кислота (SA)), полученных методом анализа иерархий

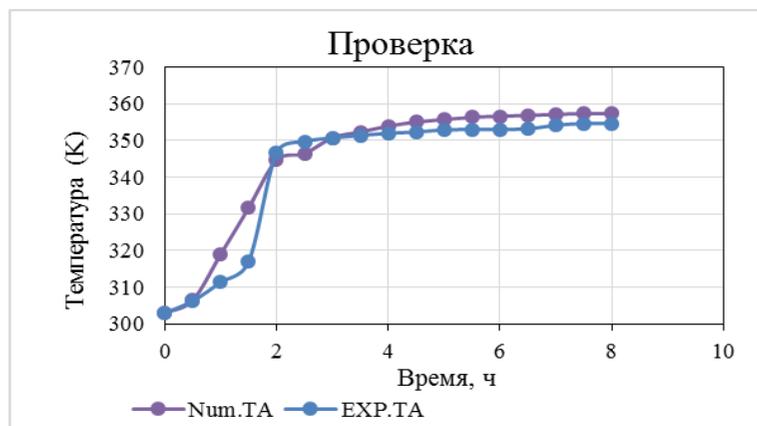


Рисунок 6 - Валидация численной модели.

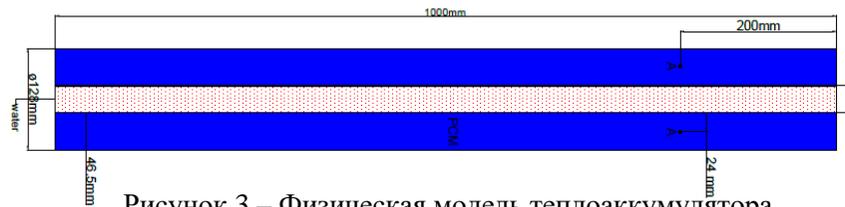


Рисунок 3 – Физическая модель теплоаккумулятора

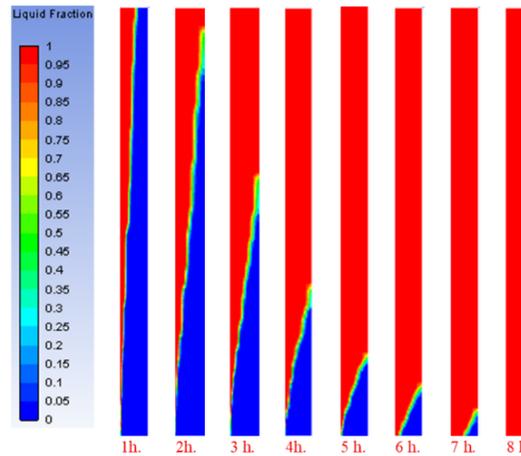


Рисунок 4 – Механизм плавления ФТАМ по высоте цилиндра

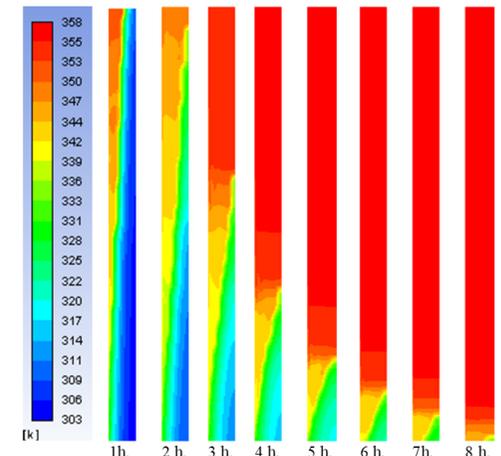


Рисунок 5 – Изменение температуры ФТАМ по высоте цилиндра

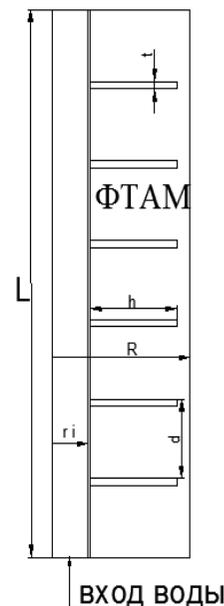


Рисунок 7 – Физическая модель кожухотрубного ТА с поперечными ребрами

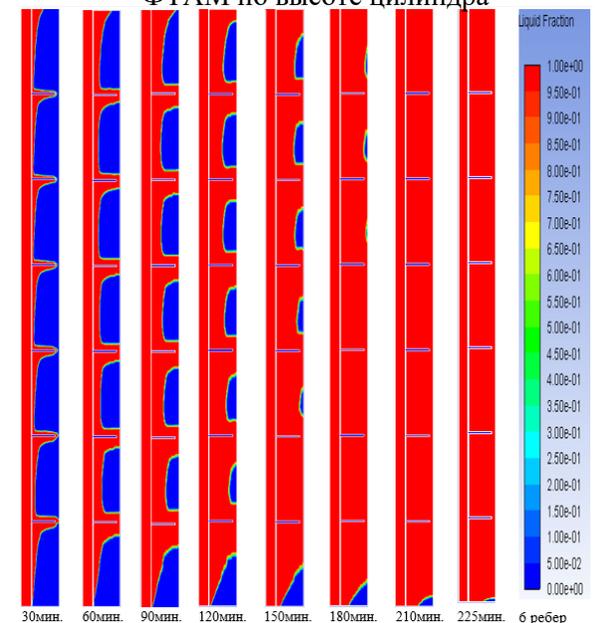


Рисунок 8 – Распределение жидкой фазы по высоте ТА от времени

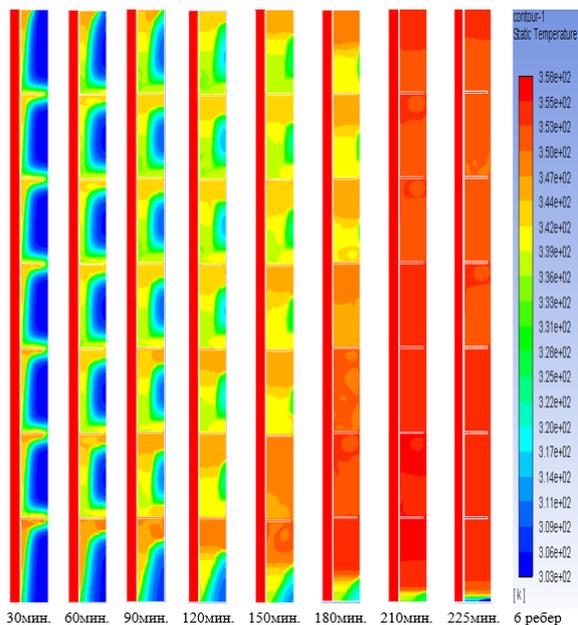


Рисунок 9 – Изменение температуры ФТАМ по высоте ТА от времени

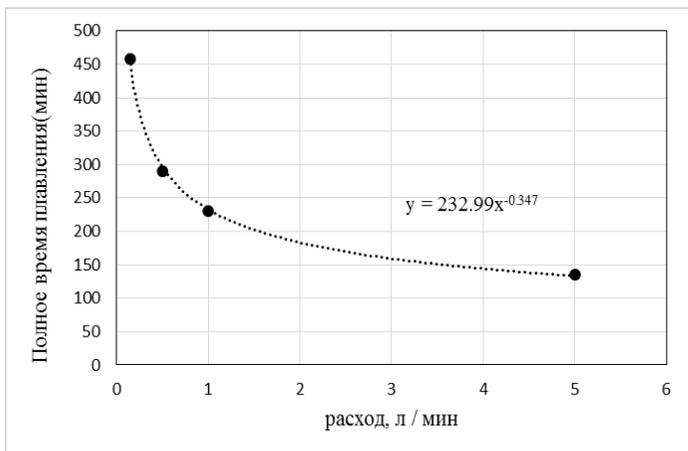


Рисунок 12 – Влияние расхода теплоносителя на время плавления

Таблица 1- Результаты расчетов и определения оптимальных размеров

Число ребер (N)	H (mm)	T (mm)	t/h	t/d	d(mm)	d/L	Объем ребра / общий объем кольцевого пространства Об _{ребр} / Об _к	Время (мин)
6	40	3	0.075	0.0209	143.2	0.1433	1.42%	225
9	40	2	0.05	0.0199	100.2	0.1002	1.42%	180
18	40	1	0.025	0.0189	52.68	0.0526	1.42%	165
24	40	0.75	0.018	0.0187	40.03	0.0400	1.42%	150
30	40	0.6	0.015	0.0185	32.27	0.0322	1.42%	135
36	40	0.5	0.012	0.0184	27.04	0.0270	1.42%	135
45	40	0.4	0.01	0.0183	21.74	0.0217	1.42%	135

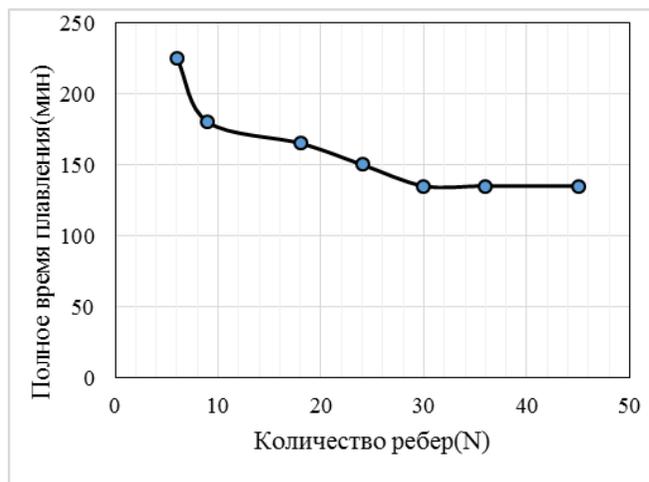


Рисунок 10 – Влияние числа ребер на полное время плавления

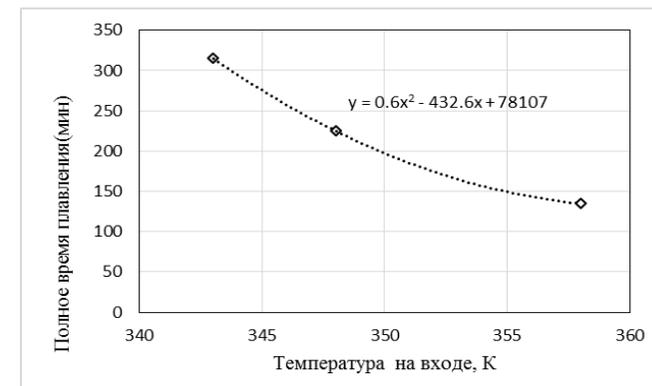


Рисунок 11 – Влияние температуры на входе в ТА на время плавления

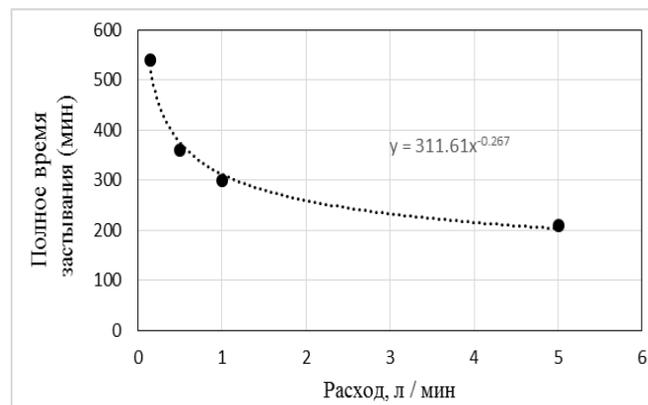


Рисунок 13 – Влияние расхода теплоносителя на время застывания

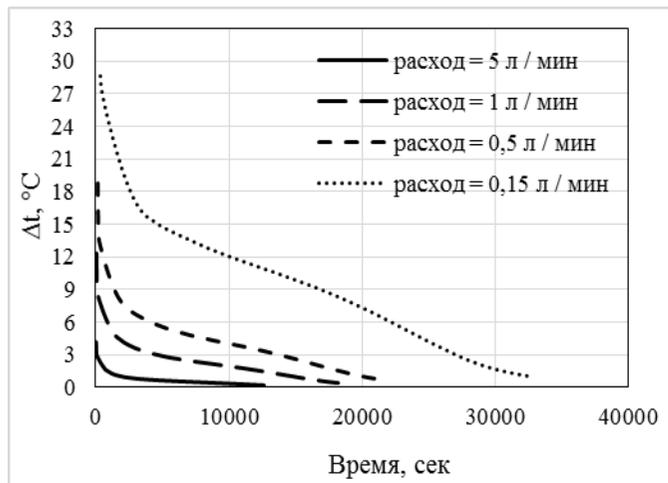


Рисунок 14 – Влияние расхода на разницу температур теплоносителя

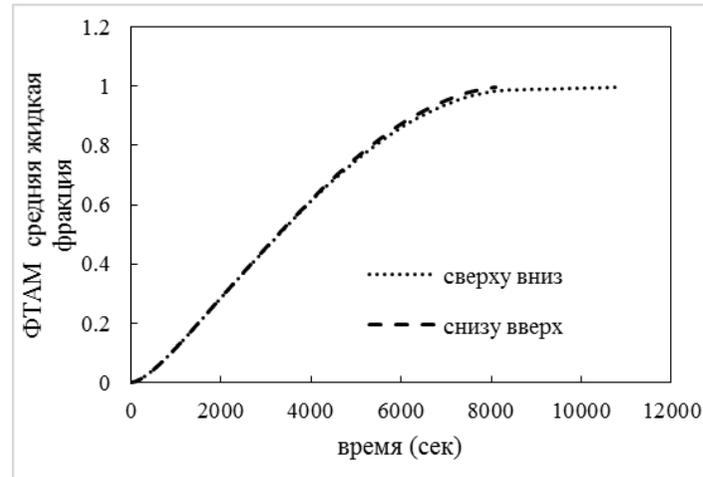


Рисунок 15 – Влияние направления потока теплоносителя на скорость и время плавания

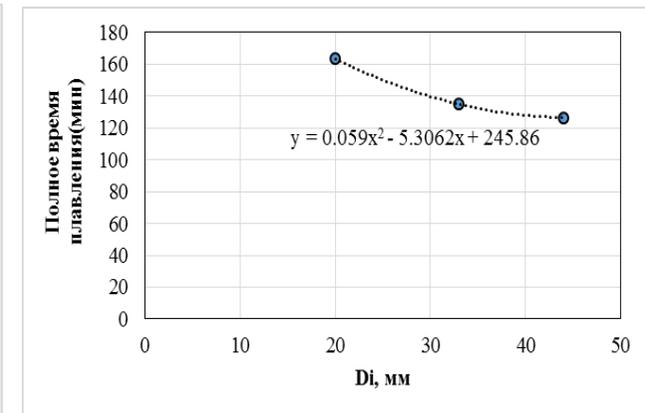


Рисунок 16 – Влияние внутреннего диаметра трубы теплоносителя на время плавания

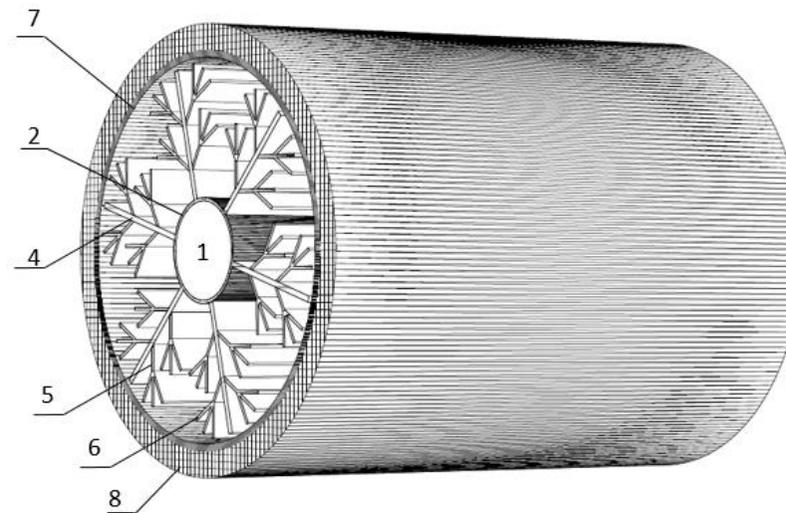


Рисунок 17 – Конструкция горизонтального ТА с разветвленными ребрами
 На рисунке обозначены: 1. Теплоноситель; 2. Внутренняя труба; 3. Теплоаккумулирующий материал; 4. Ребра; 5. Ответвления 1-ого порядка; 6. Ответвления 2-ого порядка; 7. Корпус; 8. Теплоизоляция

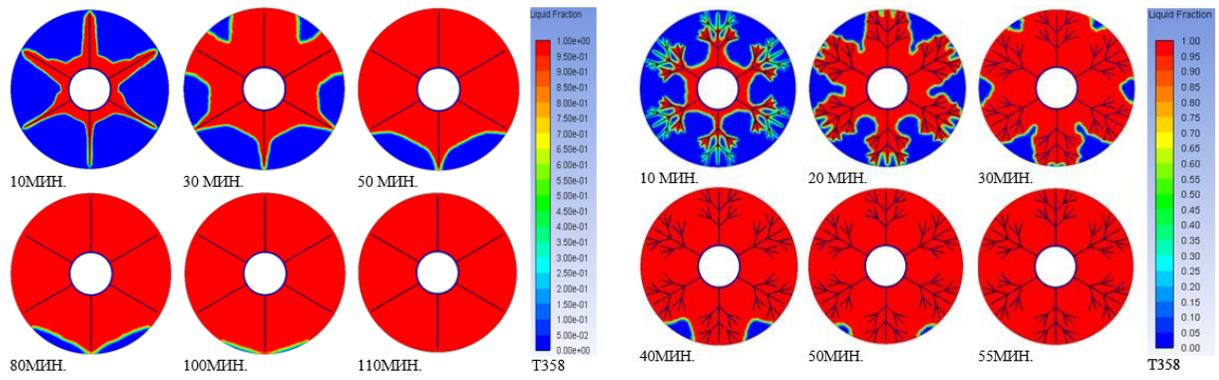


Рисунок 18 – Изменение состояния ФТАМ во времени для двух конфигураций продольных ребер во времени при плавлении

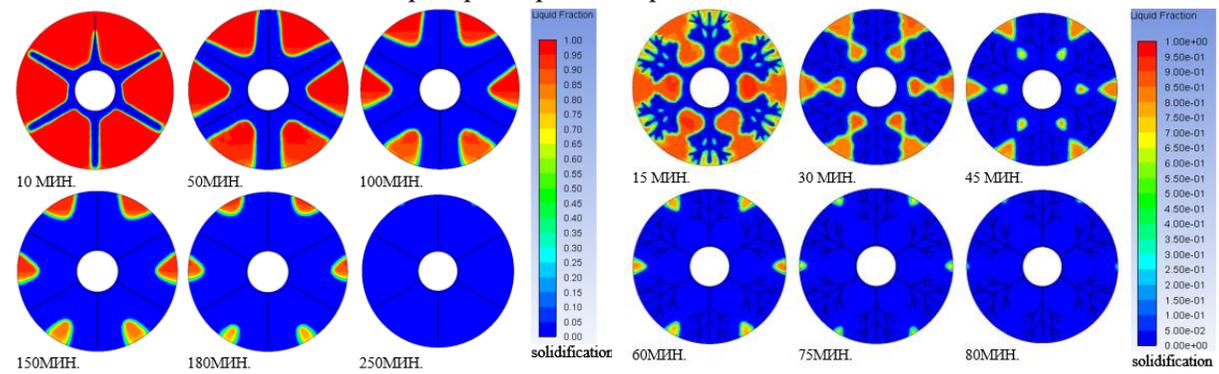
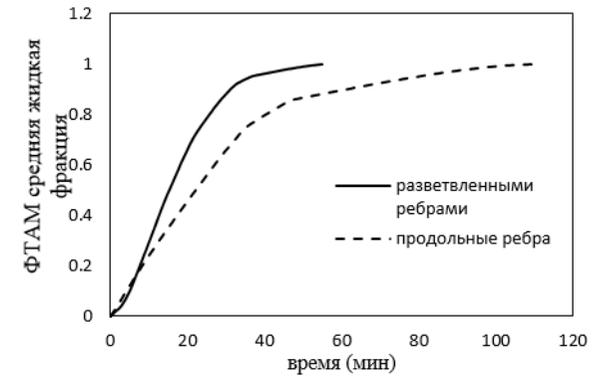
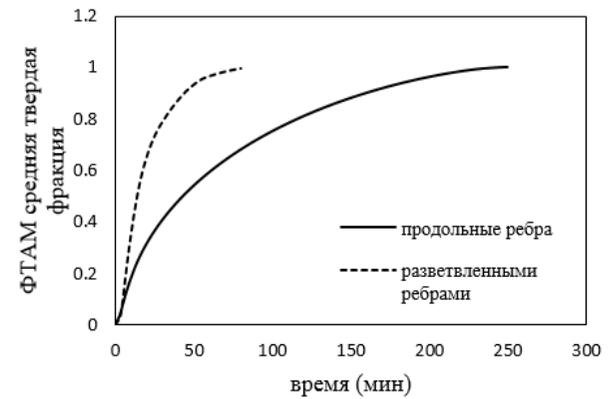


Рисунок 19 – Изменение состояния ФТАМ во времени для двух конфигураций продольных ребер во времени при застывании



А.



Б.

Рисунок 20 – Сравнительный анализ зависимости времени плавления (А) и застывания (Б) ФТАМ от конструкции продольных ребер