

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Дагестанский государственный технический университет»**

*На правах рукописи*



**Евдулов Олег Викторович**

**РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВ И СИСТЕМ ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ НА  
ОСНОВЕ СИЛЬНОТОЧНЫХ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ**

Специальность:

05.04.03 – машины и аппараты, процессы холодильной и криогенной  
техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Научный консультант:

Исмаилов Тагир Абдурашидович  
д.т.н., профессор

Махачкала 2019

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	6
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ В ОБЛАСТИ РАЗРАБОТКИ И ИССЛЕДОВАНИЯ ОХЛАЖДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ НА БАЗЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ .....	17
1.1 Оценка состояния и перспективы развития термоэлектрического приборостроения.....	17
1.2 Термоэлектрические преобразователи энергии и их применение в приборах и устройствах различного назначения .....	26
1.3 Методы исследования термоэлектрических преобразователей энергии и устройств на их основе.....	35
1.4 Перспективы использования сильноточных термоэлектрических батарей в системах охлаждения .....	43
1.5 Постановка задач исследования.....	50
ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ И ТЕРМОУПРУГОСТИ ДЛЯ ЕДИНИЧНОГО СЛОИСТОГО ТЕРМОЭЛЕМЕНТА .....	53
2.1 Расчет температурного поля слоистого термоэлемента.....	53
2.2 Расчет поля термомеханических напряжений слоистого термоэлемента.....	67
ГЛАВА 3. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В СИСТЕМАХ ОХЛАЖДЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ НА БАЗЕ ПЛАВЯЩИХСЯ РАБОЧИХ ВЕЩЕСТВ .....	76
3.1 Математическая модель системы охлаждения элементов радиоэлектронной аппаратуры, работающих в режиме повторно- кратковременных тепловыделений.....	76
3.1.1 Моделирование работы охлаждающей системы и исследование процессов теплообмена при плавлении рабочих веществ .....	78

3.1.2 Моделирование работы охлаждающей системы и исследование процессов теплообмена при затвердевании рабочих веществ .....	89
3.2 Математическая модель системы неравномерного охлаждения электронных плат при использовании плавящихся рабочих веществ .....	96
3.2.1 Температурное поле электронной платы.....	96
3.2.2. Методика расчета и результаты исследований системы неравномерного охлаждения электронных плат.....	106
<b>ГЛАВА 4. ПРОЦЕССЫ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В СИСТЕМАХ ОХЛАЖДЕНИЯ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ.....</b>	<b>113</b>
4.1 Математическая модель и исследование теплового воздействия на биологически активные точки.....	113
4.2 Математическая модель и теоретические исследования термоэлектрической системы для местного теплового воздействия на отдельные зоны организма человека .....	121
4.3 Математическая модель и теоретические исследования термоэлектрической системы для внутрисполостного теплового воздействия.....	138
<b>ГЛАВА 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ НА ОСНОВЕ СИЛЬНОТОЧНЫХ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ.....</b>	<b>148</b>
5.1 Экспериментальные исследования системы охлаждения элементов радиоэлектронной аппаратуры в режиме повторно-кратковременных тепловыделений .....	148
5.2 Экспериментальные исследования системы неравномерного охлаждения электронных плат при использовании плавящихся рабочих веществ.....	157
5.3 Экспериментальные исследования теплового воздействия на биологически активные точки.....	169

5.4 Экспериментальные исследования термоэлектрической системы для местного теплового воздействия на отдельные зоны организма человека .....	173
5.5 Экспериментальные исследования термоэлектрической системы для внутриполостного теплового воздействия.....	185
5.6 Оценка погрешности измерений.....	193
<b>ГЛАВА 6. РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ ОХЛАЖДАЮЩИХ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ НА БАЗЕ СИЛЬНОТОЧНЫХ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ .....</b>	
6.1 Конструкции высокоточных слоистых термоэлектрических батарей .	195
6.1.1 Конструкции высокоточных слоистых термоэлектрических батарей с непосредственным контактом к объекту охлаждения.....	195
6.1.2 Конструкции высокоточных слоистых термоэлектрических батарей с дополнительными теплопроводами.....	201
6.1.3 Конструкции высокоточных слоистых термоэлектрических батарей с вторичным жидкостным контуром.....	208
6.2 Устройства для охлаждения элементов и узлов радиоэлектронной аппаратуры .....	212
6.2.1 Устройства для охлаждения элементов радиоэлектронной аппаратуры в режиме повторно-кратковременных тепловыделений.....	212
6.2.2. Устройства для охлаждения элементов радиоэлектронной аппаратуры в режиме повторно-кратковременных тепловыделений с несколькими рабочими веществами.....	220
6.2.3 Устройства для неравномерного охлаждения электронных плат ..	225
6.3. Термоэлектрические устройства медицинского назначения .....	230
6.3.1. Термоэлектрические устройства для теплового воздействия на стопу .....	230
6.3.2. Термоэлектрические устройства для теплового воздействия на руку .....	240
6.3.3. Термоэлектрические устройства для косметологии.....	248

6.3.4 Термоэлектрическое устройство для остановки кровотечения.....	253
6.3.5 Термоэлектрические устройства для внутрисполостного теплового воздействия .....	258
6.3.6 Термоэлектрическое устройство для термопунктуры.....	266
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	269
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	272
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 .....	296
ПРИЛОЖЕНИЕ 2 .....	320

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** На сегодняшний день задачи разработки и исследования принципиально новых эффективных охлаждающих систем, соответствующих специфическим требованиям эксплуатации, создание аппаратуры на их основе, обладающей улучшенными характеристиками, являются все более насущными и актуальными. Это связано с насыщением мирового рынка техническими средствами, характеризующимися большими функциональными возможностями и высоким быстродействием, но обладающими повышенным уровнем собственных тепловыделений, что непосредственно влияет на надежность их работы.

Одним из перспективных направлений при проектировании охлаждающих приборов и систем является применение термоэлектрических преобразователей энергии, используемых для получения малогабаритных и экономичных холодильников и термостабилизаторов с высокими функциональными возможностями. Перспективы развития и внедрения термоэлектрических охладителей определяются целым рядом преимуществ, которыми они обладают по сравнению с традиционными компрессионными и абсорбционными установками и системами. Это возможность получения искусственного холода при отсутствии движущихся элементов и теплоносителей; сочетание в единой конструкции таких традиционно отдельных частей, как источник холода и теплообменный аппарат; возможность функционирования при любой ориентации в пространстве и при отсутствии гравитационных сил; универсальность; простота, компактность и взаимозаменяемость компонентов устройства; высокая надежность, практически неограниченный срок службы; бесшумность, экологичность.

Однако следует отметить, что при сравнении с существующими классическими холодильными установками термоэлектрические системы (ТЭС) довольно существенно проигрывают им с точки зрения энергетической эффективности. В первую очередь это связано с отсутствием

высокоэффективных термоэлектрических материалов, что пока не позволяет существенно повысить КПД термоэлектрических приборов, а во вторую - с нецелесообразностью разработки мощных ТЭС ввиду их низкой энергетической эффективности и невысокой надежности, обусловленной либо наличием большого числа термоэлементов (ТЭ) и их паяных соединений в слаботочных термоэлектрических батареях (ТЭБ), либо низкими термомеханическими характеристиками сильноточных ТЭБ. Последнее обстоятельство также ограничивает области применения охлаждающих ТЭС в тех случаях, когда требуется обеспечение высоких плотностей тепловых потоков и быстрая смена режимов охлаждения (нагрева), что характерно для объектов радиоэлектроники и медицины. В этих условиях актуальным является разработка и исследование новых высокоэффективных охлаждающих систем и приборов, построенных на основе мощных сильноточных ТЭБ с улучшенными термомеханическими характеристиками, а также практическое использование их для обеспечения температурных режимов работы радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) и в медицине, чему и посвящена настоящая диссертационная работа.

**Степень разработанности темы исследования.** Исследование термоэлектрического преобразования энергии, возможностей его прикладного использования в различных отраслях техники рассмотрено в научных работах ряда российских и зарубежных ученых. Среди них необходимо выделить труды А.Ф. Иоффе, А.И. Бурштейна, Л.С. Стильбанса, А.Е. Коленко, Л.И. Анатычука, Н.В. Коломойца, Н.Х. Абрикосова, Е.К. Иорданишвили, М.А. Каганова, М.Р. Привина, Ю.Н. Цветкова, Т.А. Исмаилова, И.В. Зорина, А.Л. Вайнера, В.А. Семенюка, Л.П. Булата, Д. Голдсмида, Р. Байста, Д. Шарпа, Л. Белла, Ю. Гуревича, Х.Г. Виана, Л. Чена, Т. Кадзикава, А.И. Касияна, М. Дрессельхаус и др. В работах перечисленных авторов изучены вопросы использования термоэлектрических преобразователей энергии и устройств на их основе в приборостроении, теплофизике, радиоэлектронной технике, медицине, системах кондициони-

рования и обеспечения микроклимата. Проводя анализ данных работ и определяя их высокую значимость, необходимо отметить наличие весьма незначительного количества исследований и разработок ТЭС, основанных на применении сильноточных ТЭБ, причем как теоретического, так и практического характера. Здесь также следует отметить недостаточную изученность вопросов повышения термомеханических характеристик мощных ТЭБ, в том числе и за счет уменьшения деформаций при тепловом расширении составляющих их материалов. Данное обстоятельство определяет цель, задачи и направленность диссертации.

**Цель и задачи диссертационной работы.** Целью диссертационной работы является создание охлаждающих приборов и систем, выполненных на базе сильноточных термоэлектрических преобразователей энергии, в том числе реализованных в виде специальной слоистой конструкции, с улучшенными термомеханическими характеристиками, разработка математических моделей и исследование электро- и теплофизических процессов в них, внедрение устройств в радиоэлектронику и медицину.

Основными задачами диссертационной работы являются:

1. Анализ современного состояния в исследовании, проектировании и создании охлаждающих систем на базе ТЭБ и выявление возможностей их дальнейшего усовершенствования.
2. Математическое моделирование и исследование теплофизических и термоупругих процессов в единичном слоистом ТЭ.
3. Разработка системы теплоотвода от элементов РЭА, работающих в режиме повторно-кратковременных тепловых нагрузок, основанной на совместном использовании сильноточных ТЭБ и плавящихся рабочих веществ, а также математическое моделирование процессов теплообмена в ней.
4. Разработка системы неравномерного охлаждения электронных плат, основанной на совместном использовании сильноточных ТЭБ и плавящихся рабочих веществ и ее математическое моделирование.



5. Разработка ТЭС для теплового воздействия на биологически активные точки и отдельные зоны поверхности тела человека, математическое моделирование теплофизических процессов в них.

6. Разработка ТЭС для внутрисполостного теплового воздействия и создание ее математической модели.

7. Экспериментальная проверка полученных теоретических результатов путем проведения натуральных испытаний разработанных охлаждающих систем.

8. Разработка новых типов устройств для охлаждения объектов радиоэлектроники, медицинского назначения.

9. Реализация разработанных систем и приборов на практике.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в новом подходе к построению охлаждающих систем для радиоэлектроники и медицины, состоящем в использовании в качестве исполнительного элемента высокоточных ТЭБ, в том числе слоистого исполнения, с улучшенными термомеханическими характеристиками, учитывающем специфику объектов охлаждения - элементов РЭА и человеческого организма, а также режимов теплового воздействия.

К основным результатам, составляющим новизну, относятся следующие:

1. Математическая модель слоистого ТЭ, построенная на основе решения двумерной нестационарной задачи теплопроводности и термоупругости для многослойной системы сложной конфигурации с граничными условиями второго и третьего рода, отличающаяся возможностью учета теплового расширения и сжатия материалов.

2. Закономерности, отражающие зависимости значений термомеханических напряжений и деформаций в ТЭ как слоистой, так и классической П-образной конструкции от температурного поля, температурных коэффициентов линейного расширения и механических характеристик составляющих

их материалов, позволяющие оптимизировать конструкцию ТЭС с точки зрения ее термомеханической надежности.

3. Метод отвода теплоты от элементов РЭА, работающих в режиме повторно-кратковременных тепловых нагрузок, состоящий в использовании плавящихся рабочих веществ с дополнительным теплоотводом посредством сильноточных ТЭБ во время паузы в работе аппаратуры, позволяющий повысить продолжительность цикла работы радиоэлектронного устройства за счет сокращения продолжительности затвердевания рабочего агента.

4. Метод неравномерного охлаждения электронных плат, основанный на совместном использовании плавящихся рабочих веществ и сильноточных ТЭБ, отличающийся тем, что основной отвод теплоты от элементов РЭА производится в плавящийся агент, а ТЭБ осуществляют дополнительное охлаждение наиболее тепловыделяющих объектов.

5. Математические модели систем охлаждения, построенные на основе решения «задачи Стефана», отличающиеся возможностью учета в их конструкции ТЭБ путем введения в математические соотношения тепловых потоков, соответствующих холодопроизводительности батарей, а также оптимизацией температурных полей элементов РЭА.

6. Метод теплового воздействия на биологически активные точки и отдельные зоны человеческого организма с использованием сильноточных ТЭБ, позволяющий сочетать в себе режимы работы, связанные как с охлаждением, так и нагревом рефлексогенных зон, а также их чередованием с высокой интенсивностью в соответствии с типом процедуры.

7. Математическая модель ТЭС для теплового воздействия на биологически активные точки, основанная на решении одномерной нестационарной задачи теплопроводности, в которой ТЭБ представлена в виде цельной конструкции, обладающей определенным значением эффективного коэффициента теплопроводности и электрического сопротивления, характеризующейся выделением теплоты Джоуля в объеме и теплоты Пельтье на по-

верхностях, также отличающаяся учетом плотности контакта прибора и биологического объекта.

8. Математическая модель системы для местного теплового воздействия на отдельные зоны поверхности тела человека, построенная на решении двумерной нестационарной задачи теплопроводности с дискретными источниками теплоты произвольной конфигурации, учитывающая теплофизические свойства объекта воздействия.

9. Способ внутрисполостного теплового воздействия с использованием сильноточной ТЭБ, учитывающий сложности доступа и ограничения по площади сопряжения исполнительного элемента с объектом воздействия.

10. Квазистационарная математическая модель ТЭС для внутрисполостного теплового воздействия, отличающаяся тем, что она рассматривает последнюю как совокупность взаимосвязанных между собой теплообменных систем, ТЭБ и теплопровода, характеризующихся теплоемкостью, теплопроводностью и тепловым сопротивлением и позволяет оценить продолжительность выхода прибора на рабочий режим с учетом теплофизических свойств биологического объекта.

11. Функциональные закономерности, представленные в виде графиков изменения температуры в пространственных и временных координатах по перечисленным выше моделям, подтвержденные экспериментом, при различных величинах холодопроизводительности ТЭБ, типах плавящихся рабочих веществ, ограничениях в условиях теплообмена, позволяющие осуществлять эффективное проектирование охлаждающих систем и приборов для радиоэлектроники и медицины.

**Теоретическая значимость исследования состоит в:**

- разработке положений, расширяющих границы применимости охлаждающих ТЭС в областях техники в части улучшения их энергетических, термомеханических и динамических характеристик;
- формулировке гипотезы, подтвержденной как результатами расчетов, так и эксперимента, о возможности существенного повышения надеж-

ности работы сильноточных ТЭБ за счет улучшения их термомеханических характеристик при слоистом исполнении составляющих их ТЭ;

- формулировке положений, определяющих возможность сокращения продолжительности «паузы» в работе элементов РЭА при использовании для обеспечения их температурных режимов плавящихся рабочих веществ с дополнительным теплоотводом за счет сильноточной ТЭБ;

- доказанной эффективности обеспечения температурных режимов работы элементов электронных плат за счет применения системы неравномерного охлаждения;

- обосновании целесообразности применения сильноточных ТЭБ в системах для теплового воздействия на биологически активные точки, зоны поверхности тела человека, а также внутренние полости ввиду возможности обеспечения высоких плотностей тепловых потоков, и, соответственно высокого быстродействия при смене режимов охлаждения (нагрева);

- математических моделях, описывающих теплофизические и термомеханические процессы в разработанных ТЭС;

- результатах численного эксперимента, дающих новые знания о теплофизических и термомеханических процессах, происходящих в разработанных охлаждающих ТЭС;

- модернизации методики проектирования охлаждающих ТЭС для радиоэлектроники и медицины.

**Практическая значимость работы определяется:**

- разработанными конструкциями сильноточных слоистых ТЭБ, системами охлаждения элементов РЭА, приборами, используемыми для теплового воздействия на биологически активные точки и отдельные зоны поверхности тела человека, внутренние полости;

- внедрением результатов исследований в производство и учебный процесс, а также лечебную практику;

– рекомендациями по эксплуатации разработанных приборов на предприятиях радиоэлектронного комплекса, а также в медицинских учреждениях.

**Методология и методы исследования.** При решении задач, поставленных в диссертационной работе, использовались принципы системного подхода, методы математического моделирования с использованием теории теплообмена, термоупругости, фазовых переходов веществ, элементы математической статистики, численные методы расчета систем дифференциальных уравнений, методология проведения экспериментальных исследований и обработки результатов измерений на ЭВМ.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Для повышения термомеханических характеристик высокоточных ТЭБ установлено, что эффективным является исполнение составляющих их ТЭ в виде слоистой структуры, в которой направление электрического тока и теплового потока совпадают.

2. Определено, что при обеспечении температурных режимов элементов РЭА с повторно-кратковременными тепловыми нагрузками целесообразным является использование системы охлаждения с плавящимися рабочими веществами, предусматривающей дополнительный теплоотвод в паузу работы радиоэлементов за счет высокоточных ТЭБ.

3. Установлено, что обеспечение температурных режимов работы электронных плат целесообразно осуществлять за счет применения неравномерной системы охлаждения, в которой основной отвод теплоты от элементов РЭА производится в плавящийся агент, а дополнительный теплоотвод от наиболее тепловыделяющих элементов осуществляется ТЭБ.

4. При проведении теплового воздействия на биологически активные точки и отдельные зоны поверхности тела, внутренние полости человека выявлено, что с точки зрения интенсивности и быстроты действия смены режимов целесообразным является применение ТЭС, построенных на основе высокоточных ТЭБ.

5. Разработка теоретических основ и исследование предложенных ТЭС выполнена на основе математических моделей, подтвержденных экспериментом, реализованных путем решения многомерных нестационарных задач теплопроводности для многослойных структур произвольной конфигурации со сложными условиями теплообмена на границах сопряжения.

**Степень достоверности результатов исследования.** Разработанные методы охлаждения, реализующие их технические решения, физические и математические модели, результаты натурных испытаний приборов являются достоверными вследствие корректного применения математического аппарата, методологии экспериментальных исследований, а также сходимости теоретических и экспериментальных данных.

**Апробация результатов работы.** Работа и ее отдельные результаты докладывались и обсуждались на X-XV Межгосударственных семинарах и конференциях «Термоэлектрики и их применение» (Санкт-Петербург, ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, 2006-2016 г.г.), XV-XX Международных НТК «Измерение, контроль, информатизация» (Барнаул, Алтайский ГТУ, 2014-2019 г.г.), IV-VIII Международных НТК «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке» (Санкт-Петербург, СПбГУНиПТ, НИУ ИТМО, 2009-2017 г.г.), VI-VII Международных НТК «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения» (Москва, МИРЭА, 2009, 2010 г.г.), XV Всемирном конгрессе Международного общества криохирургов (Санкт-Петербург, 2009 г.), XVI Международном форуме по термоэлектричеству (Париж, 2015 г.), XVII Международном форуме по термоэлектричеству (Белфаст, 2017 г.) и др. Разработки удостоены медалей и дипломов выставок различного уровня. В частности золотых медалей на Международной выставке интеллектуальной собственности, изобретений, инноваций и технологий «IPITECH» (Таиланд, Бангкок, 2017 г.), 26 Международной выставке «ITECH» (Малайзия, Куала-Лумпура, 2015 г.), 17 Международного салона исследований и технологического трансфера «INVENTICA» (Румыния, Яссы, 2013 г.), 12 Международного салона изобретений и новых технологий «Новое Время» (Россия, Севасто-

поль, 2016 г.), бронзовой медали 12 Международной ярмарки инноваций «SIIF-2014» (Южная Корея, Сеул, 2014 г.), 47 Международной выставки изобретений «INVENTIONS GENEVA» (Швейцария, Женева, 2019 г.), золотых, серебряных и бронзовых медалей Международных выставок «Архимед» (Россия, Москва, 2008-2018 г.г.), серебряных медалей 5 Международной выставки «Измерения, мир, человек» (Россия, Барнаул, 2015 г.), дипломов 6 и 7 Межрегиональных выставок «Дагпродэкспо» (Россия, Махачкала, 2008 и 2009 г.г.).

Исследования в рамках тематики диссертационной работы использовались при выполнении гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых МК-8389.2006.8 «Исследование высокоэффективных термоэлектрических батарей для систем охлаждения радиоэлектронной аппаратуры», Государственных контрактов по ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг. № П1655 от 15.09.2009 г. «Исследование и разработка холодильных установок на базе высокоэффективных термоэлектрических батарей слоистой конструкции», № П2471 от 19.11.2009 г. «Исследование и разработка системы неравномерного отвода теплоты от элементов радиоэлектронной аппаратуры». Результаты исследований внедрены в практику производства ОАО «Концерн КЭМЗ» (г. Кизляр), ООО «Эрфольг» (г. Грозный), ООО «НПФ Промавтоматика» (г. Барнаул), АО «ДНИИ Волна» (г. Дербент), клиническую практику ГБУ «Республиканский кожно-венерологический диспансер» (г. Грозный), АМНО «Центр медицины высоких технологий» (г. Махачкала), учебный процесс ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет» и ФГБОУ ВО «Грозненский государственный нефтяной технический университет».

Указом Главы Республики Дагестан от 22.07.2015 г. № 169 исследования по тематике диссертационной работы удостоены Государственной премии Республики Дагестан за 2013 г. в области естественных, общественных

наук и техники за разработку систем, приборов и технологий, основанных на применении термоэлектрических преобразователей.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 90 работ, в том числе 2 монографии, 8 статей в журналах, входящих в базу данных Scopus, 20 статей в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 34 патента на изобретение РФ.

**Объем и структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы, включающего 228 наименований и приложений. Основная часть работы изложена на 271 страницах машинописного текста, содержит 147 рисунков и 2 таблицы.



# **ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ В ОБЛАСТИ РАЗРАБОТКИ И ИССЛЕДОВАНИЯ ОХЛАЖДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ НА БАЗЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ**

## **1.1 Оценка состояния и перспективы развития термоэлектрического приборостроения**

На сегодняшний день производство термоэлектрической аппаратуры является одной из наиболее быстро развивающихся областей производства как в России, так и за рубежом. Теоретические аспекты применения термоэлектрических эффектов, созданные академиком А.Ф. Иоффе и его сотрудниками, дали возможность широкого применения полупроводниковых термоэлектрических преобразователей энергии в различных областях промышленности. В течение последних лет средний прирост мирового производства термоэлектрических устройств (ТЭУ) различного назначения составляет порядка 14-15% [6]. Столь высокие и устойчивые темпы роста характерны лишь для таких высокотехнологичных продуктов, как вычислительная техника и информационные технологии. За последние годы данная отрасль производства получила существенное развитие, поскольку появилась непосредственная возможность создания малогабаритных устройств для регулирования температурных режимов функционирования различной аппаратуры, получения локальных очагов холода, интенсификации процессов теплопередачи в сложных системах, выработки электрической энергии различными альтернативными методами [10, 27, 41, 162, 172, 177, 224].

Основной причиной, вызвавшей всплеск интереса к термоэлектрическому преобразованию энергии, является экологическая чистота этого метода преобразования, в отличие от традиционных парокompрессионных, абсорбционных, реализуемых на основе фазовых превращений рабочих агентов. Данное обстоятельство связано с осознанием мировым сообществом важности охраны и сохранения окружающей среды за счет использования высокоэкологичной техники и технологии.

Другими преимуществами термоэлектрического метода преобразования энергии, которые определили интерес к его практическому применению, являются [5, 25, 156]:

- возможность плавного и точного регулирования холодопроизводительности и температурного режима;
- практически неограниченный ресурс работы;
- отсутствие движущихся, изнашивающихся частей, рабочих жидкостей и газов;
- бесшумность работы термоэлектрического блока;
- малые габаритные размеры ТЭУ;
- малая инерционность термоэлектрических приборов, что непосредственно связано с их малыми габаритными размерами;
- независимость холодильного коэффициента преобразователя от его размеров вплоть до сотен микрон;
- произвольная ориентация источника холода в пространстве, независимость от наличия гравитационных сил;
- устойчивость к динамическим и статическим перегрузкам;
- конструктивная и технологическая универсальность;
- выработка постоянного напряжения и т.п.

Термоэлектрические преобразователи энергии также имеют и недостатки [26]:

- использование только постоянного электрического тока;
- достаточно низкий коэффициент полезного действия.

Для наиболее эффективного использования возможностей термоэлектрического преобразования энергии, при котором наиболее ярко проявлялись бы достоинства построенной на его основе аппаратуры и нивелировались ее недостатки, необходимо решение следующих вопросов:

- синтез термоэлектрических материалов (термоэлектриков), обладающих высокими эксплуатационными и энергетическими характеристиками;
- качественным исполнением ТЭБ;
- реализацией оптимальной конструкции термоэлектрических охлаждающих устройств и систем.

Важнейшей энергетической характеристикой любого холодильного аппарата является его холодильный коэффициент, определяемый отношением холодопроизводительности к затраченной работе. Для термоэлектрической установки он напрямую связан с добротностью материала, зависящей от коэффициента термо-ЭДС, электропроводности и теплопроводности вещества. Данный показатель стремится к своей наибольшей величине при добротности термоэлектрика, стремящейся к бесконечности. Поэтому основополагающая задача термоэлектрического материаловедения – поиск материалов с максимально высокой добротностью, а также разработка эффективных методов их синтеза [49, 203].

В настоящее время наиболее распространены термоэлектрические материалы, исходными веществами для которых являются висмут, сурьма, селен, теллур и их твердые растворы. Максимальная добротность этих материалов при комнатной температуре составляет порядка  $3 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$  как для полупроводников n-, так и p-типа. Несмотря на активные исследования в направлении повышения их характеристик, на сегодняшний день добиться значительных результатов не удалось.

В связи с этим в термоэлектрическом материаловедении в последнее время наметилось несколько других, достаточно перспективных направлений исследований, по прогнозам позволяющих получить определенный сдвиг в области повышения эффективности параметров используемых материалов.

Исследования по созданию и поиску термоэлектрических веществ с высокой добротностью ведутся в этом аспекте по следующим направлениям [5, 28, 75, 110, 126, 162, 204, 210, 223]:

1. Разработка функционально неоднородных термоэлектрических материалов;
2. Исследование и синтез скуттерудитов – материалов со структурой минерала  $\text{CoAs}_3$ , а также  $\text{CoSb}_3$ ,  $\text{RhSb}_3$ ,  $\text{CoAs}_3$ ,  $\text{RbAs}_3$  и  $\text{IrSb}_3$ ;
3. Исследование кристаллических структур с квантовыми точками и нитями.

Если оценивать новейшие исследования в целом, следует отметить, что они представляют значительный интерес, позволяя значительно повысить эффективность термоэлектриков. Однако практическая реализация результатов данных исследований в ближайшей перспективе затруднительна. Здесь необходимо отметить, что на эффективность термоэлектрических преобразователей энергии и приборов на их основе значительное влияние оказывают помимо параметров термоэлектрика также особенности их конструктивного исполнения, тепловые схемы использования, режимы работы, условия теплообмена на спаях и т.п. В первую очередь это касается термоэлектрических модулей (ТЭМ) - единичных типовых элементов термоэлектрической аппаратуры (рисунок 1.1). Различные фирмы серийно производят ТЭМ приблизительно одинаковых типоразмеров (рисунок 1.2) (так называемый мелкоровесный ряд). Мировой годовой рынок ТЭМ на данный момент составляет порядка 400-500 миллионов долларов. Годовое производство ТЭМ в разных странах можно примерно представить следующим образом (таблица 1.1) [169, 170]:

Таблица 1.1 - Годовое производство ТЭМ

Страна	Годовое производство термоэлектрических модулей, млн. шт.
Китай	4,0-5
США	2,5
Россия	1,0-1,5
Украина	0,3
Европа	1
Япония, Корея	0,5
Остальные страны	0,2

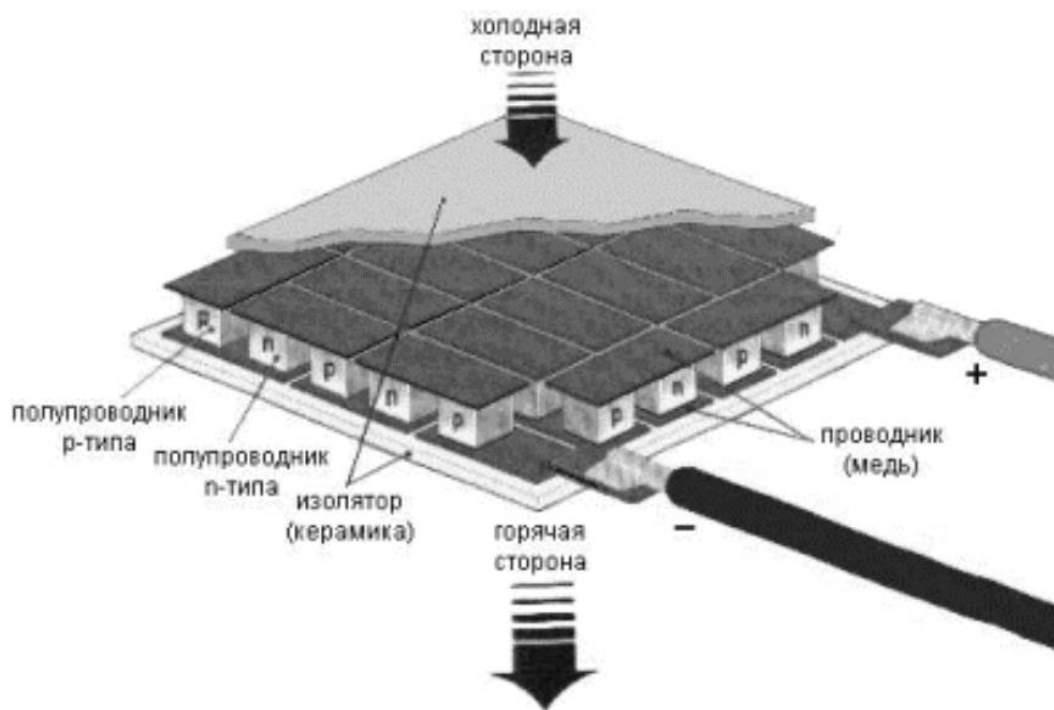


Рисунок 1.1 - Типовая структура ТЭМ

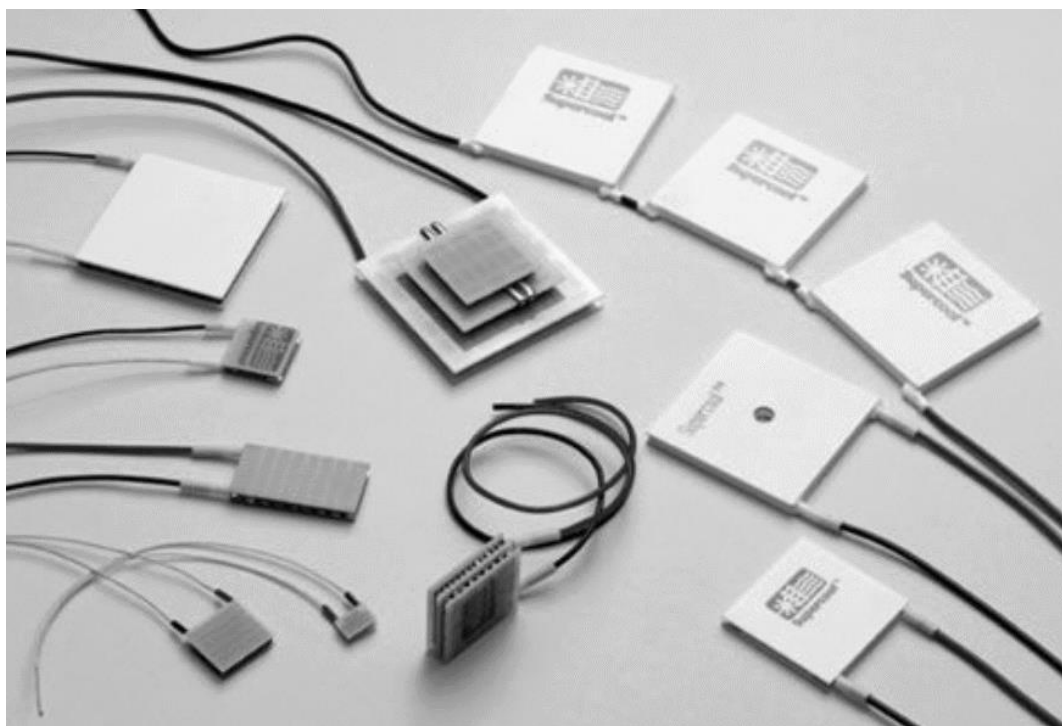


Рисунок 1.2 - Внешний вид типовых ТЭМ

Здесь следует отметить, что Россия также занимает лидирующее место в мире по изготовлению ТЭМ и устройств на их основе. Высококачественные ТЭМ по оценкам специалистов выпускают фирмы «Криотерм», «Остерм» СКТБ «Норд», корпорация НПО «РИФ», НПО «Кристалл», ООО «АДВ-Инжиниринг», ООО «Термиона», ООО «Термоинтех», ООО «РМТ» и др. В таблице 1.2 приведены некоторые сведения о производстве ТЭМ этими предприятиями [185, 187, 189, 190, 192, 194, 197].

Таблица 1.2 - Производство ТЭМ в России

Фирма	Количество серийных типов модулей, шт.	Среднегодовой выпуск модулей, тыс. шт.	Максимально возможное годовое производство модулей, тыс. шт.	Разработка и серийное изготовление термоэлектрических систем
СКТБ «НОРД», Москва	Более 150	600	1000	-
«Криотерм», Санкт-Петербург	Более 150	400	1000	+
НПО «Кристалл», Королев, Московская область	Более 150	350	750	+
«Остерм», Санкт-Петербург	Более 100	150	500	-
ООО «РМТ», Москва, Нижний Новгород	Более 20	50	70	+
ООО «АДВ-Инжиниринг», Москва	Более 20	30	50	+
ООО «Термиона», Зеленоград	Более 20	40		+
ООО «Термоинтех», Зеленоград	Более 20	40		+
Корпорация НПО «РИФ», Воронеж	Более 30	40		+

Анализ и сопоставление существующих методов получения низких температур показывает, что в некоторых случаях, когда размеры охлаждаемых

объектов невелики, они выделяют относительно небольшое количество теплоты (мощность тепловыделений - до 1 кВт) и хорошо теплоизолированы, термоэлектрическое охлаждение, несмотря на низкую холодопроизводительность, существенно более выгодно по сравнению с другими способами. На рисунке 1.3 рассмотрена область рационального применения термоэлектрического охлаждения [87]. Из представленных данных следует, что при температурном уровне до 260 К и тепловых мощностях порядка 80 Вт ТЭУ являются вне конкуренции по всем показателям (масса, объем, мощность). Для более низких температур (190-210 К) ТЭС (на основе каскадных ТЭБ), имея несколько худшие энергетические характеристики по сравнению с другими техническими средствами, продолжают превосходить их по массе и габаритным параметрам. На рисунках 1.4-1.5 для сравнительного анализа представлены зависимости изменения удельной холодопроизводительности и массы прибора, отнесенной к 1 Вт получаемого холода от температуры для термоэлектрических и некоторых других охлаждающих систем [25, 35].

Существенным фактором, определяющим ценность применения ТЭС на практике, является их стоимость. Здесь также необходимо подчеркнуть, что она резко возрастает с уменьшением холодопроизводительности. Именно поэтому на сегодняшний день наиболее распространены маломощные термоэлектрические аппараты, холодопроизводительность которых не превышает уровня 100 Вт. Однако в последние годы следует выделить тенденцию, связанную с совершенствованием технологии изготовления как стандартных ТЭМ, так и приборов на их основе, что существенно уменьшает стоимость термоэлектрического охлаждения (рисунок 1.6) [162]. На данный момент типовой ТЭМ мощностью 70-80 Вт стоит примерно 10 долларов США в розницу.

Несмотря на то, что стоимость получения холода методом термоэлектрического преобразования энергии снижается, ТЭС все еще имеют ограничения по применению в связи с относительно низкой термодинамической эффективностью в области высоких тепловых нагрузок.

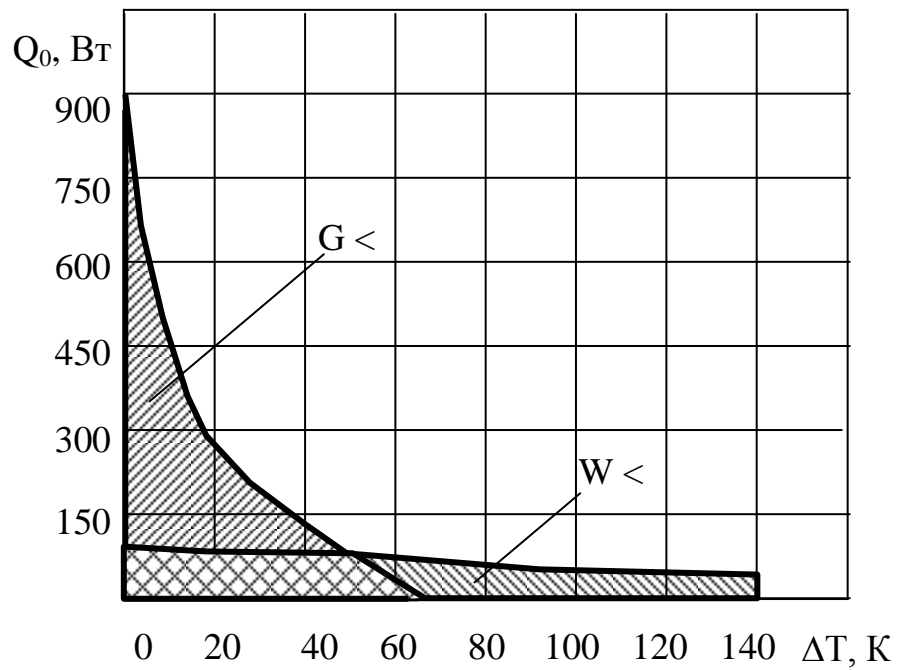


Рисунок 1.3 - Область целесообразного применения охлаждающего ТЭУ  
 $W <$  - по потребляемой мощности;  
 $G <$  - по массогабаритным характеристикам;  
 $\Delta T$  - градиент температуры на сляях охлаждающего ТЭУ

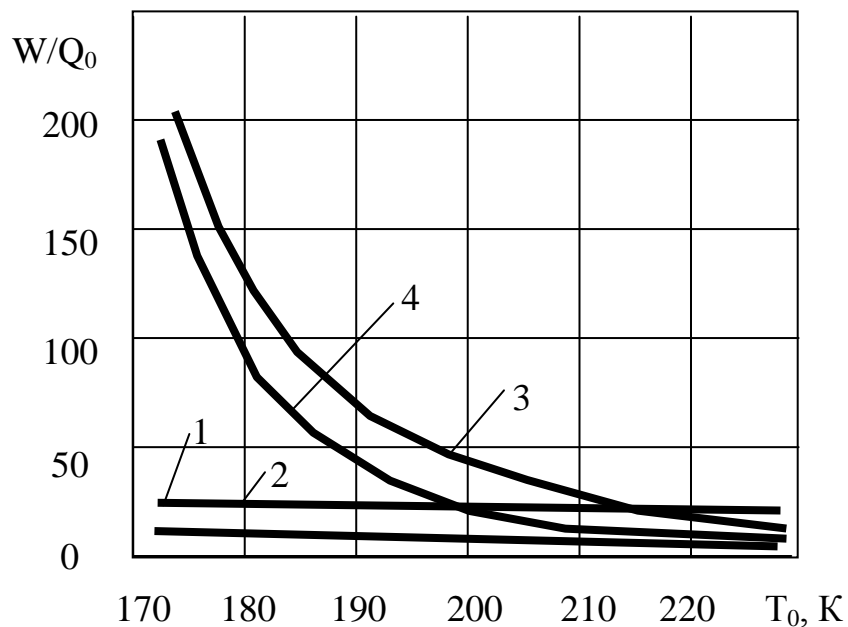


Рисунок 1.4 - Зависимость удельной мощности от уровня охлаждения  $T_0$  для газовой машины (1), гелиевого охладителя (2), ТЭБ (без использования BiSb) (3), ТЭБ (с использованием BiSb) (4).



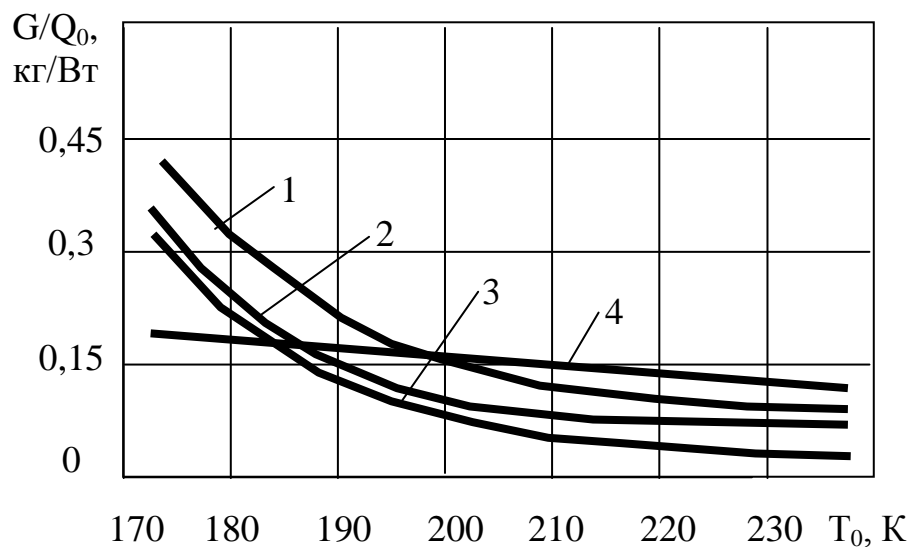


Рисунок 1.5 - Зависимость удельной массы от температуры охлаждения: 1 –ТЭБ в режиме максимальной экономичности, 2 – ТЭБ с использованием BiSb, 3 – ТЭБ в режиме минимальной массы, 4 – газовая машина

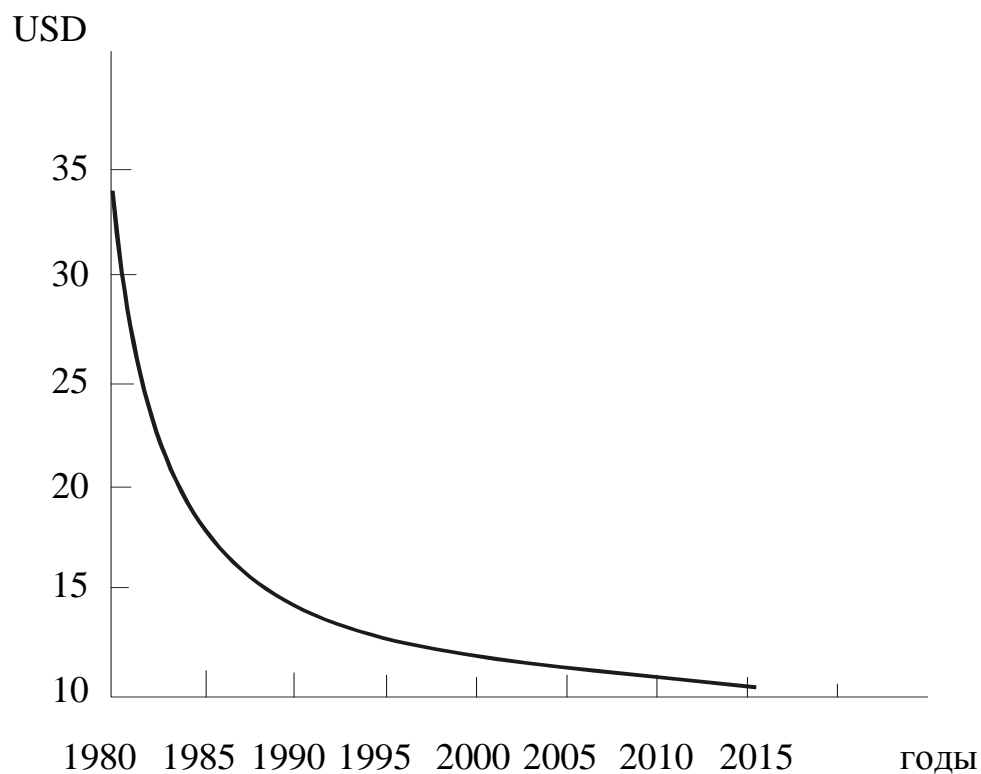


Рисунок 1.6 - Стоимость 1 Вт термоэлектрического холода (данные фирмы Morlow Inc.)

## 1.2 Термоэлектрические преобразователи энергии и их применение в приборах и устройствах различного назначения

В настоящее время разработка ТЭУ ведется, как было отмечено выше, на основе стандартных ТЭМ. Имеется большое число публикаций [5, 6, 25, 84, 183, 202], в которых приведены сведения о характеристиках и параметрах таких модулей.

Данные, приведенные в работах [5, 90], характеризуют ранние тенденции развития термоэлектрического приборостроения - упор на создание относительно мощных охлаждающих ТЭМ. Холодопроизводительность таких ТЭМ достаточно велика и находится в пределах 75-100 Вт. ТЭМ рассчитаны на большие плотности питающего тока, размеры их спаев находятся в пределах 4x4- 9x9 мм<sup>2</sup>, высота ветвей ТЭ 3-5 мм. Главными причинами, определяющими большие размеры ТЭ и высокие значения токов питания, являлись технологические трудности при создании ТЭ малых размеров. В настоящее время ведущими фирмами освоено массовое производство как сильно-, так и слаботочных ТЭМ, которые оформлены как законченные конструктивные элементы, помещенные в защитные оправки и снабженные собственными токовыми выводами.

Основные типы современных, промышленно выпускаемых ТЭМ и их характеристики, приведены на сайтах фирм - производителей [185-197].

Анализ тенденций развития российской и зарубежной техники дает возможность сделать вывод, что область применения ТЭС расширяется, причем имеет место острая необходимость в миниатюрных охлаждающих устройствах, имеющих широкий диапазон технических характеристик. Основными потребителями таких ТЭУ являются электроника, микроэлектроника, медицинская и измерительная техника, в частности аппараты, включающие в свой состав датчики и преобразователи инфракрасного излучения, используемые в теплотрии, системах ночного видения и т.д. [6].

Другим большим классом потребителей ТЭУ в последние годы являются элементы когерентной техники, выполненной на полупроводниках,

особенно инжекционные лазеры. За последнее время в России, Китае, США, Японии, Европейском Союзе опубликовано значительное количество работ, посвященных этой проблематике [14, 15, 21, 162, 199, 222, 226]. Рассмотрены возможности применения эффекта Пельтье непосредственно в самой полупроводниковой структуре лазера с использованием интегральных технологий.

Большое количество научных сообщений посвящено применению термоэлектрических преобразователей энергии для обеспечения температурных режимов работы фотоприемников, фотоумножителей, параметрических усилителей, формирователей видеосигналов, интегральных микросхем, усилителей на полевых и биполярных транзисторах, модуляторов света, фотоэлементов, светодиодов, преобразователей изображения, элементов вычислительной техники, ракетонаводящих электронных систем, радиоаппаратуры для наземных и космических исследований. С учетом специфики практического применения в этих областях параметры и характеристики ТЭС существенно изменились [73, 78, 91, 106-108, 139, 145]. По сравнению с первоначальными образцами приборов сила тока питания ТЭМ снизилась в несколько раз. Существенно снижены затраты (на единицу мощности) на получение полупроводниковых материалов [170]. Например, современный термоэлектрический охладитель для микроэлектронной техники представляет собой изделие, содержащее до 10 ТЭ на 1 мм<sup>2</sup> до 1 мм [28].

Благодаря преимуществам термоэлектрического метода преобразования энергии, изделия на его основе получили практическое применение в различных областях. При этом термоэлектрическая техника в основном ориентируется на относительно малые мощности. Рассмотрим более подробно области конкретного использования ТЭУ.

#### *1. ТЭУ промышленного назначения.*

На рисунке 1.7 изображена структурная схема ТЭУ, описывающая их приложение к промышленности.

## ТЭС промышленного назначения

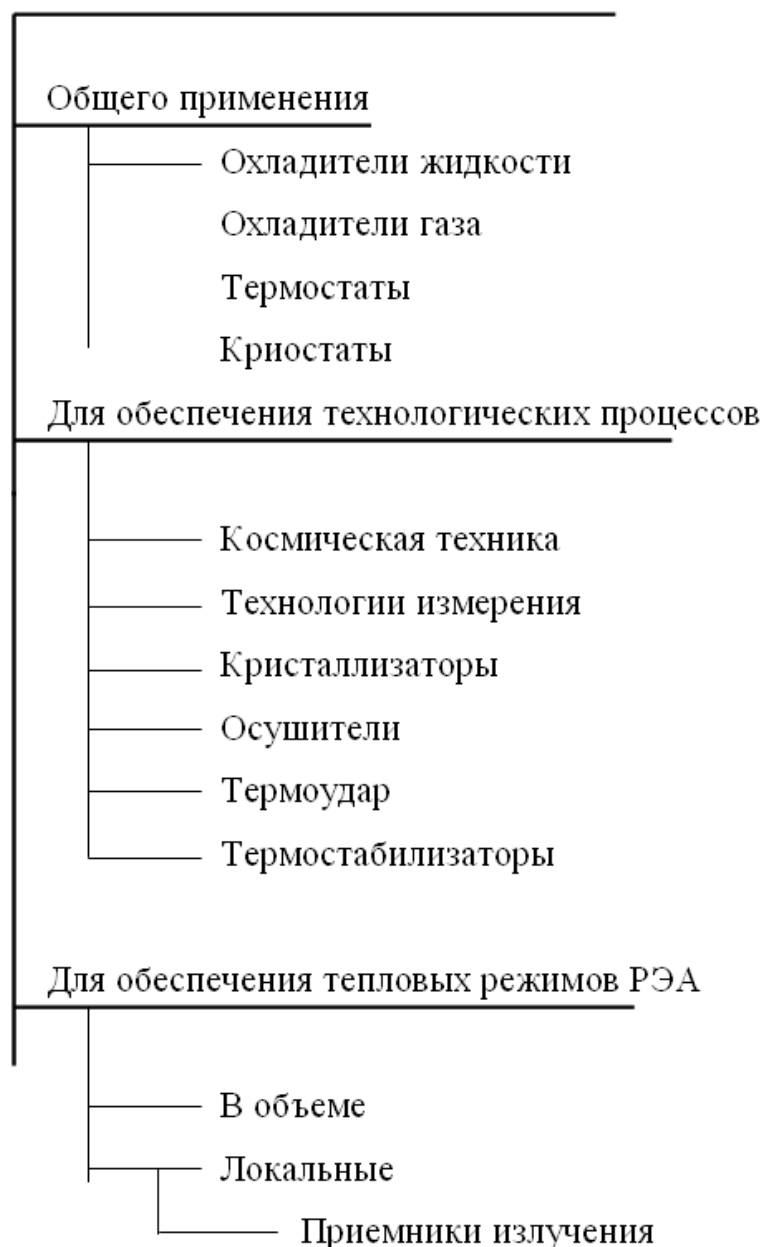


Рисунок 1.7 - Структура ТЭУ промышленного назначения

ТЭС общего применения подразделяются на охладители потоков жидкости, газа, термостаты (диапазон средних температур) и криостаты (диапазон низких температур) [49, 83]. По данным работы [149] термоэлектрические охладители потоков жидкости, применяемые в промышленных системах, могут иметь мощность порядка киловатт. В [163] описаны особенности расчета термостатов с соответствующими системами регулирования, а дина-

мические характеристики термоэлектрических систем термостатирования описаны в [159]. Особый интерес представляют комбинированные (гибридные) системы охлаждения, сочетающие термоэлектрический блок на низкотемпературной ступени с парокомпрессионной холодильной машиной, обеспечивающей теплоотвод от горячих спаев ТЭБ в окружающую среду [160].

Следующей группой ТЭУ являются системы обеспечения температурных режимов технологических процессов. Преимущества термоэлектрических преобразователей эффективно используются в космических технологиях [47]. Практическое применение термоэлектрического преобразования энергии для первичных преобразователей сигнала в измерительных системах описано в [11, 84, 134].

Далее приведены термоэлектрические приборы, выступающие в роли кристаллизаторов, осушителей газов, испытательных термодинамических установок [5]. ТЭУ, выполняющие роль термостабилизаторов при проведении технологических процессов рассмотрены в [3] на примере технологии синтеза интегральных микросхем, в [138] приведено описание ТЭС, применяемой для расширения возможностей жидкостных термостатов, выпускаемых серийно, в [27] описан прибор для стабилизации опорных спаев термопар в составе электронного измерителя температуры.

Одной их традиционных областей применения термоэлектричества является охлаждение и термостабилизация РЭА. В работах [45, 52, 54, 81, 103, 173, 180, 181] рассмотрены конструкции ТЭУ, предназначенных для обеспечения температурных режимов в объемах, содержащих элементы РЭА. Локальные охлаждающие устройства обеспечивают теплоотвод от дискретных элементов РЭА при непосредственном контакте с ними [26, 56, 130]. Особое место в этой классификационной группе занимают приборы для охлаждения приемников излучения [225], которые на несколько порядков снижают фоновые шумы и соответственно повышают качество приема светового сигнала.

## *2. ТЭУ для биологии и медицины*

Биология и медицина являются одними из первых областей активного практического приложения термоэлектрического преобразования энергии. Высокая надежность, экологичность, бесшумность, отсутствие движущихся частей и токсичных хладагентов в термоэлектрических преобразователях энергии обеспечили большое количество конструктивных решений приборов на их основе для различных направлений медицины и биологии.

На рисунке 1.8 перечислены области прикладного использования ТЭС биомедицинского назначения. Классифицируя ТЭУ подобного рода, прежде всего необходимо выделить системы, обеспечивающие локальное охлаждающее и нагревающее воздействие, т.е. крио- и термоаппликацию. Данное направление в наибольшей степени соответствует природе термоэлектрических и широко применяется в физиотерапии, косметологии, невропатологии, офтальмологии, хирургии, профотборе [7-9, 37, 55, 85, 92, 119, 142, 147, 211, 213].

ТЭС для физиотерапии представляют собой приборы с тепловым воздействием на поверхность тела человека в виде различного рода повязок, аппликаторов, шлемов, и т.п., чаще всего выполняемые гибкими. Приборы с выраженным точечным воздействием используются в практике термопунктуры.

Приложение термоэлектрической техники в хирургии, прежде всего, представлено приборами офтальмологического назначения [63, 85], обеспечивающими воздействие на хрусталик и сетчатку глаза при криоэкстракции и криопепсии. Кардиология является другой областью приложения ТЭУ в хирургии. Здесь ТЭС предназначена для обеспечения температурных режимов при операциях на открытом сердце. В литературе также встречается информация о применении термоэлектрического охлаждения в урологии.

В качестве следующих направлений использования ТЭС в медицине можно выделить косметологию и невропатологию [8, 11, 135, 211, 212, 214-216, 221], в которых практически реализуются малая инерционность эффекта

Пельтье и способность к реверсированию теплового потока в термоэлектрических преобразователях энергии.

При проведении профотбора ТЭУ применяются для организации раздражающего воздействия на организм с целью выявления степени реакции на него человека, а также определения уровня переносимости влияния внешних факторов. ТЭС используются также для обеспечения бодрствования и высокого уровня работоспособности операторов ответственных технологических процессов.

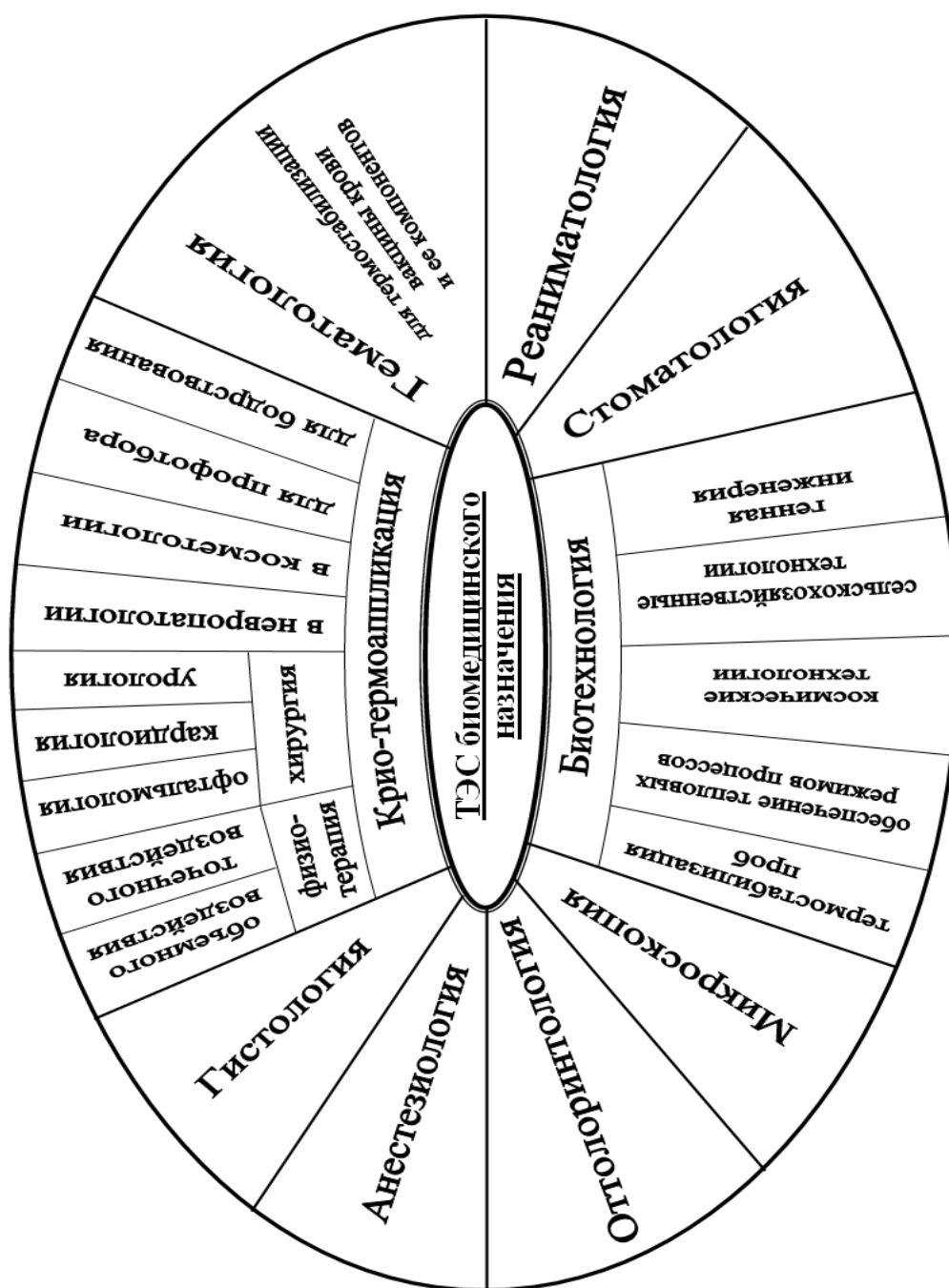


Рисунок 1.8 - Структура реализаций ТЭУ биомедицинского назначения

Обеспечение низкой температуры вакцин, трансплантатов и компонентов крови для поддержания их свойств при транспортировке эффективно реализуется в приборах [27, 171], которые относятся к гематологии.

Термоэлектрические приборы, обеспечивающие термостатирование проб биообъектов, температурные режимы при проведении электрофореза, находят применение в области биотехнологий. Особое значение имеют системы космического назначения, обеспечивающие температурные режимы при исследовании биотехнологических процессов в невесомости [105]. В [25, 218] рассмотрены конструкции ТЭУ сельскохозяйственного назначения, а также их применение для задач генной инженерии и амплификации ДНК.

В научных работах указаны также и другие области медицины, в которых целесообразно применение термоэлектрического метода преобразования энергии. К ним относится стоматология, где ТЭУ обеспечивают термостатирование компаундов и хранение костной ткани, лечение воспалительных заболеваний парадонта, а также анестезиология, реаниматология и отторолинтология [12, 17, 38, 68, 93, 137, 140].

### *3. Бытовые ТЭУ [29, 109, 112, 120, 121, 152]:*

- портативные холодильники для пикников объемом 15-40 л;
- стационарные мини холодильники для охлаждения соков, алкогольных и прохладительных напитков, охлаждения и нагрева детского питания;
- охладители/нагреватели для воды;
- малые термоэлектрические холодильники для гостиничных номеров.

### *4. Транспортные термоэлектрические холодильники [6, 27]:*

- мини холодильники для хранения продуктов в наземном транспорте, в том числе купе пассажирских поездов, маломерных судах, самолетах;
- охладители автомобильных сидений;



- кондиционеры для пассажирских вагонов и кабин машинистов локомотивов;

- кондиционеры для обеспечения микроклимата в салонах автомобилей;

- мотоциклетные шлемы с функцией охлаждения.

5. *Термоэлектрическое лабораторное оборудование* [5, 26, 124, 125, 131, 141]:

- инфракрасные детекторы, лазерные коллиматоры, термопрограмматоры, рефрактометры, фотоумножители, интегральные схемы, ПЗС матрицы, электронные платы, спектрофотометры с термоэлектрическим охлаждением;

- охлаждаемые камеры и системы перемешивания;

- детекторы точки росы и температуры замерзания жидкостей;

- охлаждаемые эталоны абсолютно черного тела;

- охлаждаемые ячейки для электрофореза и осмометры;

- анализаторы степени загрязненности воздуха;

- устройства для фиксирования температуры застывания нефти;

- термопары;

- преобразователи для измерения электрических величин по тепловому действию электрического тока;

- термоэлектрические приемники излучения;

- микрокалориметры;

- тепломеры.

6. *Термостатирующие устройства.*

Свойство термоэлектрических преобразователей энергии поддерживать температуру объектов на заданном уровне имеет обширное практическое применение [5, 6, 14]. Данное свойство используется для построения термостатирующих устройств для электронной, измерительной и холодильной техники, теплофизического приборостроения, медицины и т.д.

Современный термоэлектрический термостат представляет собой автоматически регулируемую систему, в которой роль исполнительного элемента (источника тепла или холода) выполняет ТЭБ, в зависимости от полярности протекающего через нее электрического тока, осуществляющая нагрев или охлаждение термостатируемого объема.

На сегодняшний день существуют две основные тенденции при проектировании термоэлектрических термостатирующих систем. Одна из них заключается в разработке специальных термостабилизирующих модулей для конкретных блоков или отдельных элементов аппаратуры. Для теплоотвода от спаев ТЭМ в данном случае в подавляющем числе случаев применяется сам либо сам корпус прибора, либо специальные радиаторные системы.

Второе направление обеспечения процесса термостатирования объектов основывается на использовании отдельно размещенных термоэлектрических кондиционеров, которые регулируют температуру воздуха и подают его на аппаратуру [155]. В данном случае более эффективно решается проблема обеспечения рабочего режима и теплоотвода. Термоэлектрические термостатирующие системы компактны, управление режимом их работы производится с использованием простейших регуляторов релейного типа.

#### *7. Термоэлектрические генераторы [5, 162, 205, 206, 223]:*

- генераторы для питания электрической энергией необслуживаемых автономных устройств продолжительного действия;
- электростимуляторы медицинского назначения;
- генераторы электрической энергии для условий дальнего космоса.

Анализ российской патентной документации выявил порядка 1100 документов, касающихся прикладного использования термоэлектрического преобразования энергии. На рисунке 1.9 приведено распределение в количественном соотношении реализаций термоэлектрического охлаждения по основным областям техники.

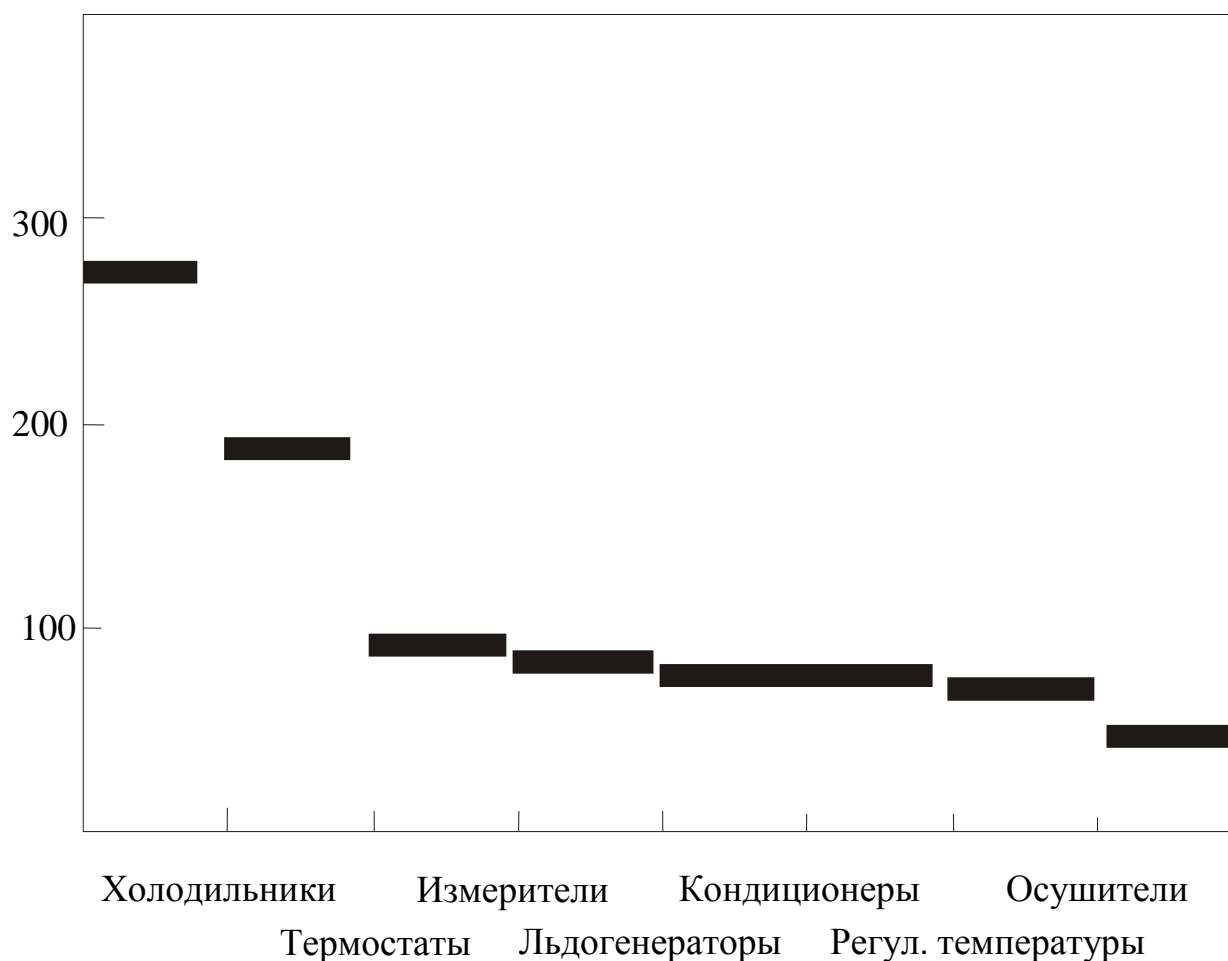


Рис.1.9 - ТЭУ в патентной документации СССР и России

### 1.3 Методы исследования термоэлектрических преобразователей энергии и устройств на их основе

В настоящее время для моделирования, расчета и исследования ТЭУ различных типов применяется большое разнообразие методов, опирающихся на аналитические, номографические, графоаналитические, а также численные способы анализа [36, 42, 153, 158, 201, 224].

Одним из эффективных методов расчета ТЭУ является метод последовательных приближений, рассмотренный в [5]. Он состоит в проведении термоэлектрического расчета ТЭБ с определением геометрических размеров и количества ТЭ, силы питающего ее электрического тока и напряжения при заданной величине холодопроизводительности. Термоэлектрическому расче-

ту предшествует конструктивная проработка ТЭБ. Во-вторых, выполняется теплотехнический расчет, которому также предшествует конструктивная проработка, а именно, - выбор характеристик теплообменных поверхностей и их характеристик. Затем определяются перепады температур между теплоносителями и спаями ТЭ, в результате чего уточняется значение температур последних. При несовпадении полученных значений температуры с принятыми в термоэлектрическом расчете вводится поправка, и вычисления проводятся далее для уточненных температур спаев. Этот метод является весьма трудоемким для инженерного расчета, так как требует многократного повторения приближений.

Исключить последовательные приближения при расчете ТЭБ позволяют зависимости, полученные в [42]. В расчетных выражениях по данной методике, представленных сложными непараболическими функциями тока питания, исключены температуры спаев ТЭ. Однако данное обстоятельство достигается за счет усложнения соотношений, что затрудняет их аналитическое исследование на экстремальные режимы работы ТЭБ.

В работе [158] получены зависимости для нагрузочных характеристик батарей в квадратичной функции тока питания. Однако здесь принят ряд упрощений, которые снижают точность полученных выражений.

При другом подходе к моделированию работы термоэлектрических преобразователей энергии учитывается изменение температур на теплопоглощающих и тепловыделяющих поверхностях. При этом ТЭБ представляется как совокупность ТЭ, работающих в разных температурных условиях. Расчетные зависимости для этого случая получены в работе [40] при пренебрежении термическими сопротивлениями.

В работе [224] получены соотношения для оптимальных по энергетической эффективности параметров ТЭ при различных режимах работы. Разработана методика для расчета на ЭВМ оптимальных параметров ТЭБ. Предложенная программа может быть использована для моделирования ТЭБ при различных заданных геометрических ограничениях.

В [39] описан подход к расчету термоэлектрических охладителей, основанный на возможности повышения эффективности работы ТЭБ за счет оптимизации работы каждого отдельного ее элемента. Оптимизация достигается за счет подбора для каждого ТЭ такой плотности питающего тока, которая соответствовала бы экстремальному режиму. Для достижения этого при сохранении последовательной электрической коммутации, ТЭБ должна быть собрана из ТЭ различной площади токового сечения. Обоснованными режимами работы таких устройств являются только экстремальные режимы, для обеспечения которых при конкретных условиях рассчитывается сила питающего тока и геометрия элементов.

Зависимости для холодопроизводительности, потребляемой мощности и холодильного коэффициента подобных ТЭБ получены при допущении бесконечно больших коэффициентов теплообмена и постоянства температуры системы теплоотвода. В работе [25] при таких же ограничениях получены зависимости для теплопроизводительности ТЭБ.

Основные тенденции в исследовании динамических режимов работы охлаждающих ТЭУ следующие:

1. Расчет изменения температуры в устройстве при включении и ступенчатом скачке значения тока питания.
2. Определение закона изменения тока питания, обеспечивающего заданный или экстремальный ход температуры в устройстве.
3. Расчет изменения температуры в устройстве вследствие воздействия возмущающих факторов.

К настоящему времени наиболее полно исследованы нестационарные режимы в ТЭУ, состоящих из ТЭ, которые работают в одинаковых температурных условиях. Для данных устройств исследование работы ТЭБ можно проводить на примере одного ТЭ [60].

При построении моделей устройства выделяются два подхода. В первом случае математическая модель в виде уравнения теплопроводности учитывает распределение температуры по высоте ТЭ. Уравнение теплопровод-

ности решается совместно с граничными условиями, математическая запись которых соответствует реальным тепловым процессам на спаях с большей или меньшей степенью точности.

В [4] получены соотношения для определения соотношения температуры в присоединенной к холодному спаю теплоемкости с бесконечной теплопроводностью при включении электрического тока для условия стабилизации температуры опорных спаев.

Связь между температурой адиабатно изолированных холодных спаев и формой питающего тока рассмотрена в работе [5] в виде соответствующего интегрального уравнения для математической модели ТЭ с полубесконечными ветвями.

В работе [12] также не учитывалась тепловая нагрузка при решении уравнения теплопроводности для ТЭ, а в работе [41] введена теплоемкость коммутационных пластин и присоединенного к ней теплового аккумулятора.

Решение задачи с краевыми условиями, определяющими наличие тепловой нагрузки и конвективного теплообмена на холодной поверхности получено в [87], как при условии фиксированной температуры горячего спая, так и при условии конвективного теплообмена с ним.

В последнее время все большее внимание при расчете охлаждающих ТЭУ уделяется поискам путей упрощения громоздких аналитических выражений приближенными математическими моделями, в которых наличие коммутационных пластин и теплообменных аппаратов учитывается с помощью введения в граничные условия задачи соответствующих им теплоемкостей. В [226] решена задача расчета зависимости изменения питающего ТЭ тока во времени, обеспечивающего оптимальное распределение температуры в охлаждаемом элементе. При этом показано, что значение температуры холодного спая ТЭ при его квазистационарном регулировании электрическим током при введении в граничные условия соответствующих теплоемкостей, может быть выражено конечной формулой.

Другим методом расчета температурного поля ТЭ является метод, основанный на принципе сложной суперпозиции, в котором происходит «конструирование» определенным образом решения поставленной задачи из решений известных. Разработана методика численного решения на основе данного метода задачи при включении тока в ТЭБ.

Практическая безинерционностью эффекта Пельтье на спаях ТЭ объясняет возможность достижения в случае нестационарного питания более глубокого охлаждения холодного спая, чем максимальное охлаждение в случае стационарного режима. Эта возможность широко исследована экспериментально и теоретически в [87]. Результаты исследований изложены в [208], где дано обоснование, а также рассмотрена методика расчета и описаны области практического применения данного явления. Задача снижения инерционности термоэлектрического охлаждения может быть решена также применением в ТЭ ветвей переменного сечения.

Теория нестационарной работы ТЭ (кроме «сверхглубокого» охлаждения) при включении тока питания подробно изложена в работе [224] с приведением анализа полученных выражений.

Необходимо отметить, что во многих публикациях, посвященных решению уравнения теплопроводности для единичного ТЭ, за физическую модель ветви принята однослойная пластина ввиду того, что теплопроводность остальных присоединенных ТЭ принята бесконечной. Данное обстоятельство позволяет не учитывать изменение температуры по толщине ветвей ТЭ. Другим, упрощенным подходом построению математической модели ТЭ является запись уравнений теплового баланса на спаях и расчет его параметров уже исходя из этих выражений. При этом холодо- и теплопроизводительность ТЭУ определяется по зависимостям для стационарного режима, т.е. распределение температуры по высоте ТЭ принято независимым от времени.

На основании указанной модели получены зависимости для определения времени охлаждения массы, обладающей бесконечной теплопроводностью, после включения тока питания, как в предположении абсолютных теп-

ловых контактов, так и при учете термических сопротивлений теплоотдаче по охлаждающей и нагревающим сторонам. В [4] продолжительность охлаждения и нагрева состоящего из изотермичных элементов ТЭ, а также потребляемая при этом мощность получены в виде функций напряжения питания. Там же рассмотрены упрощенные зависимости для соответствующего инженерного расчета.

В работе [68] представлен метод расчета нестационарных теплофизических процессов в ТЭ, основанный на допущениях о квазиостационарности режима и линейной зависимости его мощности от разности температур объектов.

В работе [160] проведен анализ вариантов достижения более глубокого охлаждения с использованием нестационарных и комбинированных режимов работы ТЭУ. Этому же посвящена и работа [87]. В этих работах выражения для расчета температуры холодного спая ТЭ получены в виде бесконечных рядов, которые затруднительно использовать на практике. Данный недостаток устранен предложенным в работе [158] методом асимптотических оценок, дающим возможность расчета температурного поля ТЭ, работающего в нестационарном режиме с учетом теплоемкости контактных слоев, объекта охлаждения, контактного электрического сопротивления, теплообмена с окружающей средой.

В работе [4] получены выражения для передаточных функций ТЭ при возмущении по питающему напряжению. Рассмотрены соотношения как для ненагруженного холодного спая, так и для условий наличия тепловой нагрузки на нем.

При расчете ТЭУ проточного типа, используемых, например, в качестве интенсификаторов теплопередачи, заданными являются температуры хладо- и теплоносителя на входе в устройство, которые отличаются от температур спаев на величину, определяемую тепловым сопротивлением перегородки. В работе [15] представлены результаты экспериментальных, а в [5] - теоретических исследований влияния интенсивности теплообмена



между теплоносителями и спаями ТЭ на режим работы ТЭС проточного типа, из которых следует вывод, что процесс интенсификации теплопередачи возможен вплоть до достижения значений чисел Био 15-20.

При использовании для моделирования ТЭУ проточного типа выражений, описывающих энергетические показатели ТЭ через температуры их контактов, термоэлектрический и тепловой расчеты необходимо осуществлять, используя метод последовательных приближений, который включает в себя и аэродинамический расчет протекающего теплоносителя.

Метод последовательных приближений предусматривает термоэлектрический расчет ТЭБ, в результате которого определяются количество и размеры ТЭ, площадь батареи, сила питающего тока и потребляемая мощность при известной холодопроизводительности. Термоэлектрическому расчету должна предшествовать конструктивная проработка ТЭУ, в результате которой определяются перепады температур между теплоносителями и спаями, и, соответственно, уточняются значения температур контактов. При несовпадении полученных значений температур с принятыми на этапе термоэлектрического расчета вводится некоторая поправка, при этом расчет повторяется вплоть до совпадения их величин с требуемой степенью точности.

Выражения, полученные в [49], исключают последовательные приближения и могут быть использованы при расчете проточных ТЭУ, определении температуры теплоносителей и коэффициентов теплообмена. В расчетные соотношения не входят температуры спаев ТЭ, что достигается, однако, путем усложнения окончательных формул, представленных непараболическими функциями электрического тока. Это затрудняет их анализ для условий, соответствующих экстремальным режимам работы термобатарей. Данное обстоятельство затрудняет также и их практическое использование.

При следующем подходе к моделированию ТЭУ учитывается изменение температуры вдоль теплых и холодных поверхностей. При этом

ТЭБ представляется как совокупность ТЭ, работающих при разных температурных режимах. Расчетные соотношения для данного случая получены в публикации [207] при условии отсутствия термических сопротивлений между спаями ТЭБ и транспортными зонами с теплоносителями, а также предположении постоянной температуры охлаждающей среды по длине устройства. Здесь одновременно с точными аналитическими выражениями получены приближенные формулы для расчета характеристик ТЭУ при заданной температуре на выхода из транспортной зоны тепло- и хладоносителя.

Влияние значений коэффициентов теплообмена при условии монотонности изменения температур потоков теплоносителей учтено в [179], где получены формулы для определения профиля температур тепло- и хладоносителей при их прямо- и противоточном движении в трактах. Показана вероятность возникновения периодически изменяющегося во времени температурного поля в режиме противотока при совпадении определенной совокупности показателей, что является следствием таких противоположно действующих факторов как эффект Пельтье и кондуктивные перетоки теплоты между спаями ТЭ.

Режим максимального холодильного коэффициента для проточного ТЭУ аналитически исследован в [208] при условии достаточно малого изменения температур потоков. Получены зависимости для определения оптимальных в энергетическом плане характеристик ТЭУ при различных условиях теплообмена между спаями ТЭ и потоками теплоносителей.

Выражения для расчете температур теплоносителей для условий прямо- и противотока с учетом конечных величин коэффициентов теплообмена получены в [4], где также выведены уравнения для определения нагрузочных характеристик ТЭУ. В этой же работе рассмотрены приближенные соотношения для определения необходимого числа ТЭ в ТЭБ при ее интенсивном теплообмене с тепловыми агентами.

Методика повышения эффективности ТЭУ проточного типа за счет секционирования теплообменных поверхностей рассмотрена в работе [49].

На основании литературного обзора методов расчета ТЭУ проточного типа отметим, что ТЭБ, в которых температуры теплоносителей изменяются незначительно, выполняются из ТЭ, имеющих примерно совпадающие характеристики. При этом наиболее простым и эффективным является приближенный метод расчета по средним температурам потоков. Исследования динамических режимов работы ТЭБ проточного типа, выполненные к настоящему времени, сводятся к получению передаточных функций этих устройств.

#### **1.4 Перспективы использования сильноточных термоэлектрических батарей в системах охлаждения**

При критическом подходе к преимуществам термоэлектрического метода преобразования энергии, изложенным выше, обнаруживается, что часть из них относится к разряду возможно реализуемых, а иногда и невозможным для практического использования в полном спектре. Проанализируем данное обстоятельство и обоснуем приведенный тезис.

Как было отмечено выше, ТЭУ должны обладают практически неограниченным сроком службы ввиду отсутствия в них каких-либо движущихся частей, а также циркулирующих теплоносителей. Данное преимущество ТЭУ практически реализовывается лишь в системах с неоправданно большим расходом термоэлектрика, когда ТЭ имеют значительную высоту, уменьшающую степень влияния биметаллического эффекта, сказывающегося на надежности их работы [49]. Для практического использования данного преимущества термобатарей в полной мере разработаны гибкие коммутационные пластины такой конструкции, наличие которых в ТЭ приводят к росту Джоулевой теплоты в их объеме и, следовательно, к снижению термодинамической эффективности. В других случаях для реализации указанного преимущества снижают сечение ветвей ТЭ. В таких конструкциях, выпускае-

мых, в том числе серийно, казалось бы, воплощается на практике практически неограниченный срок службы ТЭУ вместе с ростом внутреннего сопротивления ТЭБ. На самом же деле, как известно, надежность всякого электронного устройства линейно падает с ростом количества коммутаций. Одновременно с этим следует отметить, что количество теплоты, поглощаемое в единицу времени на холодном спае ТЭ, линейно зависит от величины питающего тока и коэффициента Пельтье. Из данного обстоятельства следует, что наиболее часто применяемые на практике и промышленно выпускаемые слаботочные ТЭМ при их массовом применении для конструирования мощной холодильной аппаратуры, являются недостаточно надежными ввиду большого количества числа слаботочных ТЭ, а также их низких термодинамических параметров.

Описанное преимущество термоэлектрических преобразователей энергии не может быть также реализовано в охлаждающих ТЭУ с максимальной холодопроизводительностью, где съем теплоты с горячих спаев ТЭ осуществляется воздушной системой теплосброса, когда используется принудительный обдув радиаторной системы. Определяющими параметрами при этом будут являться характеристики вентиляторного агрегата.

Что касается такого достоинства ТЭБ, как бесшумность, то оно реализуется в существующих ТЭУ только в случае малых мощностей, когда отвод теплоты от горячих спаев ТЭ производится за счет естественной конвекции, либо мощных устройствах с жидкостной системой теплосъема.

Такое преимущество, как малые габаритные размеры ТЭУ, также может быть использовано на практике только в случае маломощных охлаждающих систем. ТЭБ, как известно, является компонентом сосредоточенного тепловыделения, размещаемого на достаточно большой по площади радиаторной системе, работающей вследствие этого с относительно низкой тепловой эффективностью. В данном случае проектировщики термоэлектрического оборудования зачастую для увеличения эффективности радиаторной системы применяют равномерное рассредоточение ТЭБ по всей теплообменной

поверхности, а это в конечном итоге все равно приводит к уменьшению термодинамической эффективности ТЭУ в целом.

Большинство других преимуществ термоэлектрических преобразователей энергии не могут быть реализованы полностью из-за наличия между охлаждаемым объектом и ТЭБ различного рода термических сопротивлений, в частности различного рода радиаторных систем, теплопроводов, электроизоляционных теплопереходов.

Поэтому на сегодняшний день важным и практически значимым в практике создания термоэлектрического охлаждающего оборудования является разработка новых конструкций ТЭУ, в которых нашли бы оптимальное сочетание достоинства и недостатки термоэлектрического метода преобразования энергии. В частности одним из таких направлений работы является проектирование ТЭБ, выполненных на основе сильноточных ТЭ, в которых были бы в значительной мере уменьшены термомеханические напряжения [60].

Создание для различной аппаратуры требуемых температурных условий эксплуатации посредством ТЭС, обеспечивающих ее оптимальную работу в широком диапазоне температур, на сегодняшний день может быть осуществлено с использованием различных конструктивных решений [13, 59, 62, 165]. Среди них эффективными представляются следующие конструктивных модификации охлаждающих средств.

1. ТЭБ как источник холода является самостоятельным автономным узлом, а отвод теплоты от объекта производится посредством транспортировки хладагента (жидкости, газа) к местам расположения аппаратуры.

2. Отвод теплоты от малогабаритной аппаратуры и ее элементов осуществляется посредством компоновки ее элементов группами в отдельных стандартизированных адиабатически изолированных объемах, охлаждаемых сопряженными с ними ТЭБ.

3. Разработка блока в таком конструктивном решении, при котором микромодульный элемент изначально встраивается в ТЭС. При этом может быть предусмотрена как разборная, так и неразборная конструкция прибора.

4. ТЭБ является автономным узлом, а его контакт с объектами охлаждения осуществляется посредством специальных теплопроводов. При этом производится локальный теплоотвод только от отдельно взятого элемента за счет кондукции.

Представляет интерес выявление наиболее целесообразных конструктивных модификаций охлаждающей аппаратуры применительно к типичным условиям эксплуатации того или иного рода технических средств, а также условий, при которых преимущества термоэлектрической техники будут наиболее сильно выражены.

Обеспечение температурных режимов объектов в объеме путем использования обработанного в ТЭУ теплоносителя имеет ряд особенностей, существенно ограничивающих область применения. К этим особенностям относятся следующие:

1. Для транспортировки теплоносителя требуются вентиляторные агрегаты, либо компрессионные нагнетатели.

2. Габаритные размеры охлаждающей системы увеличиваются, что обусловлено необходимостью теплоизоляции трактов с теплоносителем, а также непроизводительными затратами энергии, требуемыми для компенсации теплотерь в каналах хладагента и тепловыделений нагнетателей.

3. Размещение источников холода в одной зоне увеличивает рост удельных тепловых потоков на теплообменных поверхностях, причем как на холодных, так и на горячих спаях ТЭ, что требует наличия принудительного теплообмена на контактах, обеспечение которого не только усложняет устройство, но и увеличивает его габариты.

4. Внутренний объем камеры с объектом охлаждения должен иметь соответствующие специально приспособленные каналы для теплоносителей.

5. Продолжительное охлаждение аппаратуры, работающей при пониженном давлении ненадежно из-за трудностей, вызванных необходимостью поддержания незначительного перепада температур между горячими спаями ТЭ и окружающей средой (в районе 10-15° С). Увеличение температуры горячих спаев по отношению к окружающей среде значительно увеличивает затраты на потребляемую энергию, а также габариты ТЭБ, что не всегда допустимо.

6. Охлаждение объема, в котором размещен объект, имеющий неравномерный уровень тепловыделений элементов, путем непосредственной подачи в него хладагента энергетически и экономически нецелесообразно, так как при этом производится отвод теплоты и от элементов аппаратуры, характеризующихся низкой величиной теплоты рассеяния.

Для последнего варианта увеличение мощности ТЭБ приводит к неоправданному, а зачастую и недопустимому, повышению расходов электроэнергии и увеличению размеров холодильного устройства. Таким образом, данную конструкцию целесообразно использовать только для определенных нужд, соответствующих специфическим условиям эксплуатации как объекта охлаждения, так и ТЭС. Без согласования параметров ТЭБ с характеристиками теплоприемника и условиями разводки теплоносителя численный анализ для определения возможности применения ТЭБ невозможно произвести даже ориентировочно. Вышеперечисленные особенности охлаждающей ТЭС, однако, позволяют утверждать, что для целей обеспечения температурных режимов работы приборов, для которых размеры, вес и экономичность играют определяющую роль даже при наибольшей эффективности термоэлектрика, она в большинстве случаев не приемлема.

Наиболее предпочтительное решение – непосредственное охлаждение прибора путем его сопряжения с ТЭБ. В данном случае при использовании многосоставной аппаратуры, в которой не все ее компоненты нуждаются в

отводе теплоты, может быть осуществлено охлаждение только наиболее тепловыделяющих или наиболее критичных к постоянству параметров элементов (кварцев, задающих генераторов и т. п.), что в большой степени увеличит экономичность и даст возможность снизить габаритные размеры охлаждающего аппарата.

Помимо того, в малогабаритной аппаратуре с высокой плотностью компоновки элементов, локальные перегревы часто достигают больших значений, что не дает возможность обеспечения необходимого постоянства ее характеристик. Охлаждение всего агрегата требует дополнительной системы отвода теплоты от ТЭБ, что требует повышения размеров и веса охлаждающей системы и всего прибора в целом, а это не всегда согласуется с техническими условиями эксплуатации. В случае же выборочного отвода теплоты от наиболее критичных к повышению температуры компонентов дополнительного теплосброса и системы его реализующей может не потребоваться.

Несмотря на достоинство такой схемы теплоотвода, когда различные объекты непосредственно сопрягаются с ТЭБ или ТЭ встраиваются в сам прибор, часто возникает необходимость пространственно отделить источник холода от потребителя. Если в качестве источника холода выступает фреоновый аппарат, это условие частично может быть реализовано, т. к. компрессор с двигателем и испаритель могут быть достаточно просто отдалены друг от друга за счет трубопроводов. В случае применения же в качестве генератора холода ТЭС, последняя должна находиться на поверхности, либо в объеме объекта, подлежащего охлаждению. Поэтому система отвода теплоты от горячих спаев ТЭБ также будет находиться в непосредственной близости от охлаждаемого устройства. Данное условие ограничивает применение ТЭС в тех случаях, когда вблизи объекта охлаждения из-за отсутствия места невозможно разместить систему теплосброса; охлаждаемый прибор в процессе эксплуатации подвергается ударным либо вибрационным нагрузкам, наличие которых может привести к



нарушению его механической прочности; создаваемые при работе ТЭУ магнитные поля могут влиять на функционирование устройства и т.п.

Возможным вариантом для решения проблемы дистанционного разделения источника холода и объекта охлаждения является использование специальных теплопроводов, выполненных из материалов с высокой теплопроводностью и обладающих малыми величинами тепловых сопротивлений по направлению теплового потока. Конструктивно такой теплопровод может представлять собой некоторый цельнометаллический стержень, изготовленный из меди или алюминия. При использовании цельнометаллического теплопровода источник холода и его потребитель могут быть разнесены друг от друга лишь на небольшое расстояние. Они оказываются жестко связанными друг с другом, что вызывает дополнительные теплопритоки к теплопроводу, имеющему относительно большую поверхность. У самой ТЭС резко возрастают вес и габаритные размеры.

Применение теплообменных аппаратов с различными типами хладоносителей также позволяет отделить источник холода от объекта охлаждения. Однако в данном случае охлаждающее устройство должно иметь специальное нагнетающее приспособление, прокачивающее хладагент, что существенно усложняет систему и повышает энергопотребление. Эксплуатационные параметры ТЭС существенно зависят от конструктивного исполнения теплообменных систем, размещенных на холодной и горячей поверхностях ТЭБ. В большинстве случаев, когда отвод теплоты производится воздушными радиаторами или вентиляторными агрегатами, данное техническое решение имеет ряд недостатков, основными из которых являются: тепловые потери, связанные с сопряжением спев ТЭ и радиаторов; сложность распределения теплового потока от ТЭБ равномерно по всей поверхности радиатора; необходимость изготовления радиаторных систем из материалов с высокой теплопроводностью, таких как медь или алюминий, имеющих относительно высокую стоимость. В этих условиях наиболее

приемлемым методом, дающим возможность устранить, либо значительно снизить роль перечисленных недостатков, является использование радиаторной системы, выполненной в виде теплового термосифона, работающего по циклу испарение-конденсация.

Тепловой термосифон дает возможность обеспечить величину коэффициента теплообмена со спаями ТЭБ равную  $1,6 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>. Для сравнения в случае принудительного обдува его значение составляет  $32 \cdot 10^2$  Вт/м<sup>2</sup>, при использовании жидкостной системы теплоотвода -  $8 \cdot 10^3$  Вт/м<sup>2</sup>. Помимо интенсификации теплообмена и пространственного отделения объекта охлаждения от охлаждающей ТЭС, использование тепловых термосифонов дает возможность решить еще две важные для термоэлектрической техники задачи. Одна из них состоит в создании прибора с односторонней теплопроводностью, т.е. так называемого «теплового вентиля». Вторая задача - обеспечение работы ТЭС в циклическом режиме питания, что важно в тех случаях, когда электропитание не может подаваться на ТЭБ постоянно.

### **1.5 Постановка задач исследования**

Развитие аппаратуры в последнее время характеризуется включением в ее состав значительного количества теплонагруженных элементов. Постоянно расширяется диапазон изменения температуры среды, окружающей объект размещения прибора, усложняются другие условия эксплуатации объектов, вместе с тем растут требования к стабильности характеристик систем. Работа многих теплонагруженных приборов должна проходить в условиях значительных внутренних и внешних тепловых воздействий, колебаний температуры окружающей среды, а параметры приборов при этом должны оставаться в заданных пределах.

Продолжительной, устойчивой работы приборов удастся добиться, лишь создав им необходимые температурные условия. Как правило, они обеспечиваются специальными теплообменными системами, включая различные типы

холодильных установок. Последние весьма разнообразны, сложны, могут иметь значительные габаритные размеры, массу, энергопотребление.

В значительном числе случаев данные параметры терморегулирующих систем не всегда сравнимы с соответствующими показателями объектов охлаждения, особенно актуально это для микроминиатюрных устройств с высокими удельными тепловыми потоками. Решение задачи обеспечения температурных режимов работы такой аппаратуры в этом случае может быть получено применением в качестве охладителей ТЭУ, оптимально сочетающихся с ней по важнейшим энергетическим и массогабаритным показателям.

Обычные методы снижения температуры – применение компрессионных, абсорбционных холодильных машин, использование охлаждающих агентов (твердая углекислота, лед, жидкий азот), фазовых превращений – из-за эксплуатационных неудобств не всегда могут быть использованы для указанной цели. Так, например, применение холодильных машин, работающих на компрессионном или абсорбционном принципе, целесообразно только для понижения температуры в больших объемах при мощности рассеяния, исчисляемой сотнями и тысячами ватт. В этом случае холодильная машина работает с высоким холодильным коэффициентом. При работе холодильной машины мощностью менее 100 Вт ее холодильный коэффициент снижается до 10-15 %. Кроме теплотехнических соображений, использование холодильных аппаратов данных типов для понижения температуры в небольших объемах невыгодно также и по той причине, что любая, наиболее компактная машина занимает относительно большой объем, имеет значительный вес (десятки килограмм). И требует для своего питания значительного расхода электроэнергии. Применение для данных целей различных охлаждающих сред требует периодического их пополнения, что недопустимо по условиям эксплуатации. Термоэлектрический метод преобразования энергии дает возможность снижения температуры в малом объеме при незначительных габаритах и весе всего прибора. В случае необходимости температура, обеспечиваемая ТЭУ посредством специальной схемы, может быть стабилизирована

на требуемом уровне с высокой точностью.

При этом до сегодняшнего момента исследования ТЭУ, работающих в данных условиях, отличающихся относительно большой мощностью (от 500 до 1000 Вт), когда требуется учет возникающих в них термомеханических напряжений, не проводились.

В этих условиях необходимым и практически значимым является исследование сильноточных ТЭ, в которых за счет специальной геометрии ветвей и коммутационных пластин были бы сведены до минимума термомеханические напряжения, возникающие за счет теплового расширения материалов. Также необходимым является изучение конструкций охлаждающих аппаратов, где могли бы найти применение сильноточные ТЭБ как классического, так и специального исполнения. Обзор публикаций, посвященных ТЭУ, указывает на то, что, несмотря на достаточно значительные успехи в этой области на данный момент существует необходимость в разработке новых термоэлектрических охлаждающих установок для элементов, являющихся составной частью различной аппаратуры. При этом наиболее важным является проектирование конструкций теплоотводящих и термостабилизирующих приборов для малогабаритных объектов, имеющих высокие удельные тепловые потоки. Важным является проектирование ТЭС на базе сильноточных ТЭ как классической, так и специальной слоистой конструкции, в которых реализована возможность снижения термомеханических напряжений. Это обусловлено недостатком исследований в указанной области наряду с существенной необходимостью проектирования высокоэффективных охлаждающих систем.

В этих условиях актуальным является разработка и исследование новых высокоэффективных охлаждающих систем и приборов, построенных на основе мощных сильноточных ТЭБ с улучшенными термомеханическими характеристиками, а также практическое использование их в радиоэлектронике и медицине, чему и посвящена настоящая диссертационная работа.

## ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ И ТЕРМОУПРУГОСТИ ДЛЯ ЕДИНИЧНОГО СЛОИСТОГО ТЕРМОЭЛЕМЕНТА

### 2.1 Расчет температурного поля слоистого термоэлемента

Как было отмечено выше, одним из путей снижения термомеханических напряжений в ТЭБ является конструктивное исполнение ТЭ в виде слоистой структуры [96, 97], приведенной на рисунке 2.1, где области 1, 3 и 5 – коммутационные пластины, 2 и 4 – термоэлектрический материал.

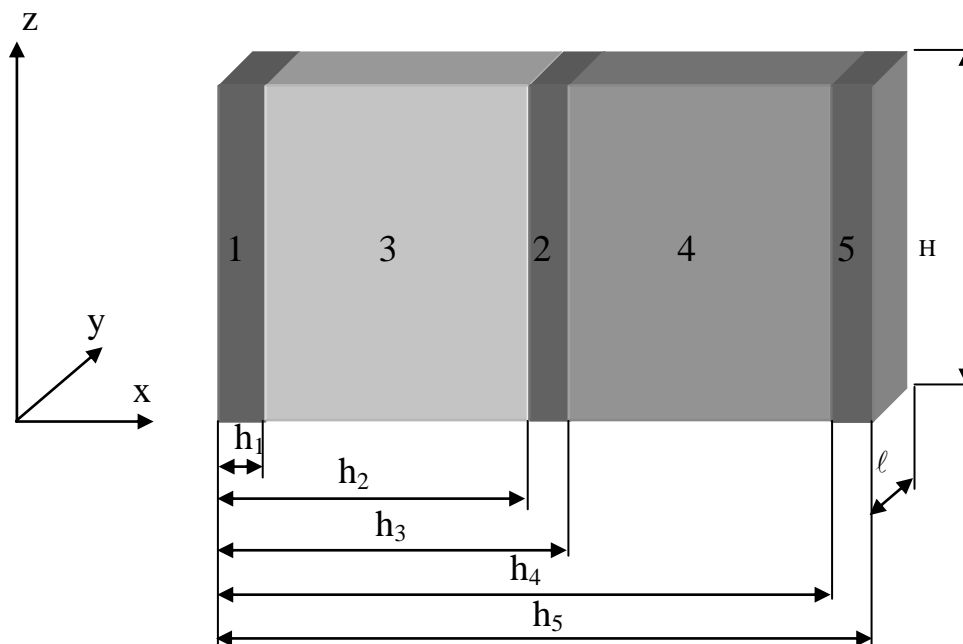


Рисунок 2.1 - Трехмерная расчетная модель слоистого ТЭ

Для наиболее полного расчета и анализа теплофизических процессов слоистого ТЭ, необходимо рассмотреть его трехмерную модель.

Система дифференциальных уравнений, описывающих теплофизические процессы в ней, имеет следующий вид:

$$\lambda_i \frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2} + \lambda_i \frac{\partial^2 T_i}{\partial y^2} + \lambda_i \frac{\partial^2 T_i}{\partial z^2} + j^2 \Omega_i = C_i \frac{\partial T_i}{\partial \tau}, \quad (2.1)$$

где  $i=1, \dots, 5$  – области ТЭ (рисунок 2.1);  $T_i$  – температура;  $\lambda_i$  – удельный ко-

эффицент теплопроводности;  $j$  – плотность электрического тока;  $\Omega_i$  – удельное электрическое сопротивление;  $c_i$  – объемная теплоемкость;  $\tau$  – время.

Начальные, граничные условия и условия сопряжения имеют вид [157]:

$$\begin{aligned}
 T_{1,2,3,4,5} &= T_{\text{cp}} \text{ при } \tau = 0, \\
 \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} &= \beta_{\text{тс}} (T_1 - T_{\text{тс}}) \text{ при } x = 0, 0 < y < \ell, 0 < z < H, \\
 \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} &= \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} + \alpha_{12} j T_2 \text{ при } x = h_1, 0 < y < \ell, 0 < z < H, \\
 \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} - \alpha_{23} j T_2 &= \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} \text{ при } x = h_2, 0 < y < \ell, 0 < z < H, \\
 \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} &= \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x} - \alpha_{34} j T_4 \text{ при } x = h_3, 0 < y < \ell, 0 < z < H, \\
 \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x} + \alpha_{45} j T_4 &= \lambda_5 \frac{\partial T_5}{\partial x} \text{ при } x = h_4, 0 < y < \ell, 0 < z < H, \\
 \lambda_5 \frac{\partial T_5}{\partial x} &= \beta_{\text{тс}} (T_5 - T_{\text{тс}}) \text{ при } x = h_5, 0 < y < \ell, 0 < z < H, \\
 \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} &= \beta (T_1 - T_{\text{cp}}) \text{ при } y = 0 \text{ и } \ell, 0 \leq x \leq h_1, 0 < z < H, \\
 \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} &= \beta (T_2 - T_{\text{cp}}) \text{ при } y = 0 \text{ и } \ell, h_1 \leq x \leq h_2, 0 < z < H, \\
 \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial y} &= \beta (T_3 - T_{\text{cp}}) \text{ при } y = 0 \text{ и } \ell, h_2 \leq x \leq h_3, 0 < z < H, \\
 \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial y} &= \beta (T_4 - T_{\text{cp}}) \text{ при } y = 0 \text{ и } \ell, h_3 \leq x \leq h_4, 0 < z < H, \\
 \lambda_5 \frac{\partial T_5}{\partial y} &= \beta (T_5 - T_{\text{cp}}) \text{ при } y = 0 \text{ и } \ell, h_4 \leq x \leq h_5, 0 < z < H, \\
 \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} &= \beta (T_1 - T_{\text{cp}}) \text{ при } z = 0 \text{ и } H, 0 < x \leq h_1, 0 < y \leq \ell, \\
 \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} &= \beta (T_2 - T_{\text{cp}}) \text{ при } z = 0 \text{ и } H, h_1 < x \leq h_2, 0 < y \leq \ell,
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

$$\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial z} = \beta(T_3 - T_{cp}) \text{ при } z = 0 \text{ и } H, \quad h_2 < x \leq h_3, \quad 0 < y \leq \ell,$$

$$\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial z} = \beta(T_4 - T_{cp}) \text{ при } z = 0 \text{ и } H, \quad h_3 < x \leq h_4, \quad 0 < y \leq \ell,$$

$$\lambda_5 \frac{\partial T_5}{\partial z} = \beta(T_5 - T_{cp}) \text{ при } z = 0 \text{ и } H, \quad h_4 < x \leq h_5, \quad 0 < y \leq \ell$$

где  $\alpha$  – коэффициент термо-э.д.с.;  $\beta_{тс}$  – коэффициент теплообмена с тепло-сбрасывающей системой;  $T_{ср}$  – температура окружающей среды;  $\beta$  – коэффициент теплообмена с окружающей средой;  $T_{тс}$  – температура теплосбрасывающей системы.

Решение трехмерной нестационарной задачи теплопроводности для условий, соответствующих (2.1)-(2.2), вызывает определенные трудности, поэтому имеет смысл упростить математическую формулировку задачи расчета теплообмена в слоистом ТЭ.

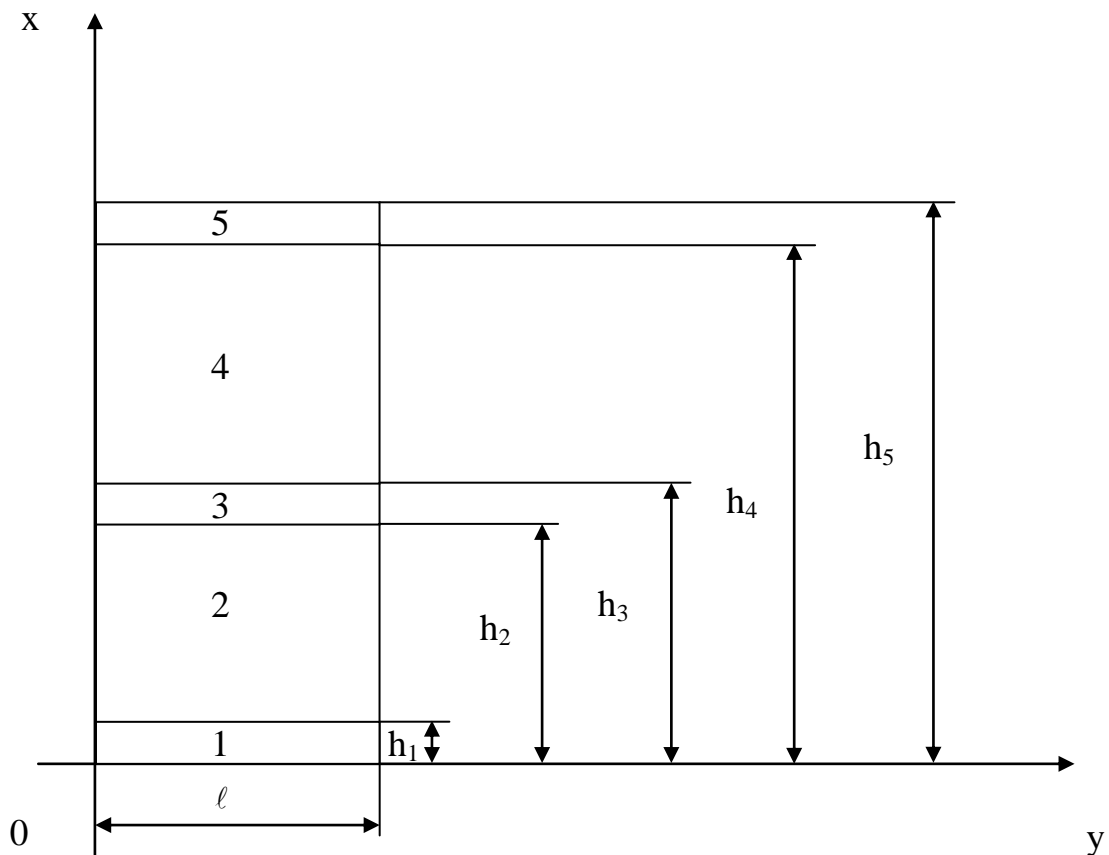


Рисунок 2.2 - Двумерная расчетная модель слоистого ТЭ

На практике в большинстве случаев при эксплуатации ТЭБ предусматривается ее теплоизоляция по боковой поверхности, за исключением поверхностей контакта с объектом воздействия и системой теплосброса. Поэтому с достаточной степенью точности можно рассмотреть сечение слоистого ТЭ в направлении оси  $x$  и перейти к двумерной задаче теплопроводности. Для данных условий расчетная схема будет иметь вид, соответствующий рисунку 2.2.

При этом математическая формулировка задачи расчета температурного поля слоистого ТЭ записывается следующим образом:

$$\lambda_i \frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2} + \lambda_i \frac{\partial^2 T_i}{\partial y^2} + j^2 \Omega_i = C_i \frac{\partial T_i}{\partial \tau}, \quad (2.3)$$

начальные и граничные условия:

$$\begin{aligned} T_{1,2,3,4,5} &= T_{cp} \text{ при } \tau = 0, \\ \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} &= \beta_{tc} (T_1 - T_{tc}) \text{ при } x = 0, 0 < y < \ell, \\ \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} &= \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} + \alpha_{12} j T_2 \text{ при } x = h_1, 0 < y < \ell, \\ \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} - \alpha_{23} j T_2 &= \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} \text{ при } x = h_2, 0 < y < \ell, \\ \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} &= \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x} - \alpha_{34} j T_4 \text{ при } x = h_3, 0 < y < \ell, \\ \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x} + \alpha_{45} j T_4 &= \lambda_5 \frac{\partial T_5}{\partial x} \text{ при } x = h_4, 0 < y < \ell, \\ \lambda_5 \frac{\partial T_5}{\partial x} &= \beta_{tc} (T_5 - T_{tc}) \text{ при } x = h_5, 0 < y < \ell, \\ \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} &= \beta (T_1 - T_{cp}) \text{ при } y = 0 \text{ и } \ell, 0 \leq x \leq h_1, \\ \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} &= \beta (T_2 - T_{cp}) \text{ при } y = 0 \text{ и } \ell, h_1 < x \leq h_2, \\ \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial y} &= \beta (T_3 - T_{cp}) \text{ при } y = 0 \text{ и } \ell, h_2 < x \leq h_3, \end{aligned} \quad (2.4)$$



$$\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial y} = \beta(T_4 - T_{cp}) \text{ при } y = 0 \text{ и } \ell, h_3 < x \leq h_4,$$

$$\lambda_5 \frac{\partial T_5}{\partial y} = \beta(T_5 - T_{cp}) \text{ при } y = 0 \text{ и } \ell, h_4 < x \leq h_5,$$

Расчет системы дифференциальных уравнений (2.3) аналитически также затруднителен [74]. Поэтому для решения задачи, описываемой вышеприведенными уравнениями, был использован численный метод конечных элементов, оптимальный для расчета задач теплопроводности в многослойных системах сложной конфигурации [20, 80, 148, 154, 175].

Расчет уравнений (2.3) методом конечных элементов произведен в следующей последовательности [175].

Первоначально вводится конечно-элементное представление в виде:

$$\tilde{T}(x, y, \tau) = \sum_{k=1}^K N_k(x, y) T_k(t), \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (2.5)$$

где черта сверху соответствует приближенному решению задачи;  $K$  – суммарное количество узловых точек;  $N_k(x, y)$  – пробная функция;  $T_k(t)$  – неизвестны коэффициенты, определяемые из исходного уравнения теплопроводности для каждой области ТЭ.

Каждое из соотношений (2.3) может быть записано в виде

$$L(T) = 0, \quad (2.6)$$

При подстановке (2.6) в (2.5), последнее выражение будет тождественно удовлетворять (2.3). Следовательно,

$$L(T) = R,$$

где  $R$  - невязка уравнения.

Для определения искомым значений  $T_k(t)$  составлена система уравнений Галеркина, имеющая вид:

$$\int_D N_m(x, y) R(x, y, t) dx dy = 0, \quad m = 1, \dots, K$$

При решении стационарной задачи применены изопараметрические элементы треугольной формы. На рисунке 2.3 изображены два типа этих элементов.

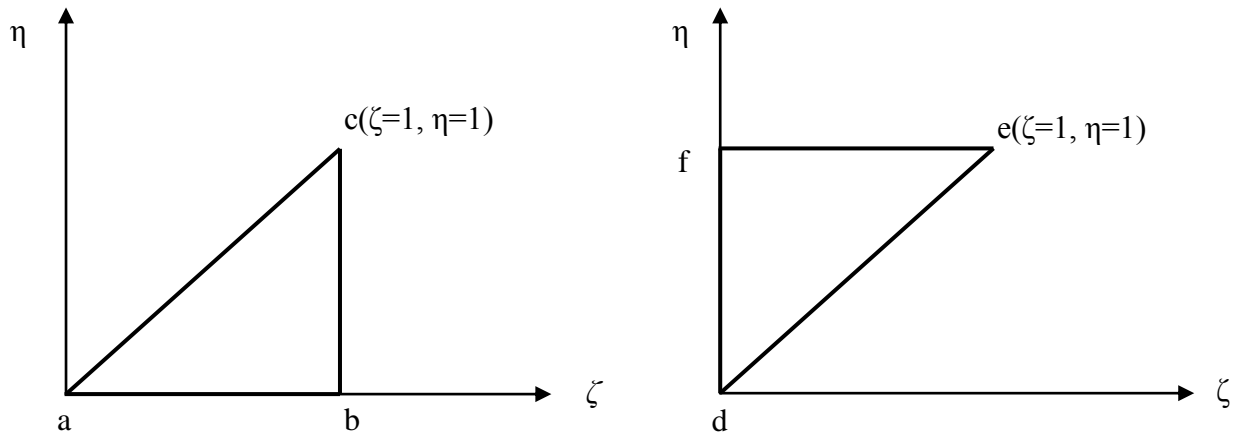


Рисунок 2.3 - Треугольные изопараметрические элементы двух типов

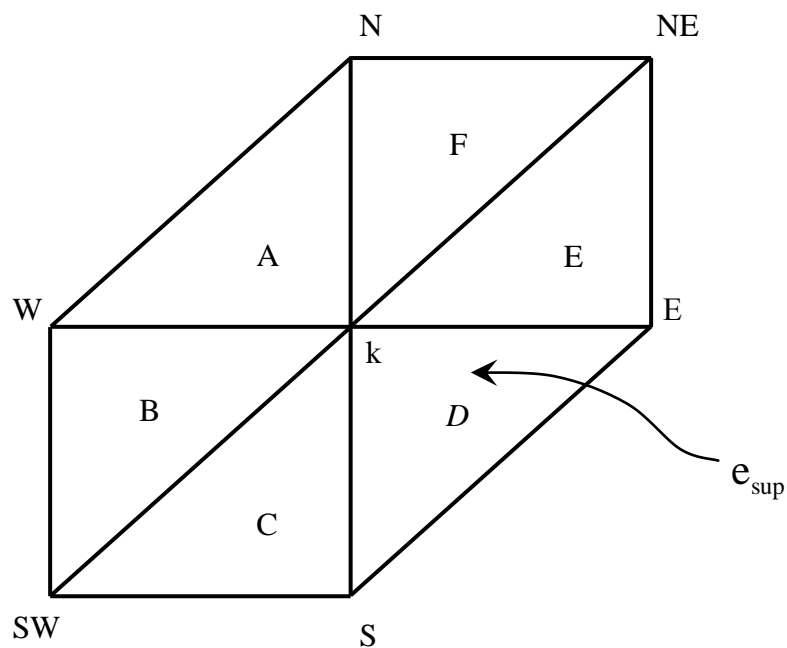


Рисунок 2.4 - Шесть треугольных элементов  $e_{sup}$ , окружающих точку сетки  $k$

Приближенное решение задачи, описываемой уравнениями (2.5) имеет вид:

$$\tilde{T}(x, y) = T_a N_a(\zeta, \eta) + T_b N_b(\zeta, \eta) + T_c N_c(\zeta, \eta), \quad \text{если } x, y \in e_{abc},$$

$$\tilde{T}(x, y) = T_d N_d(\zeta, \eta) + T_e N_e(\zeta, \eta) + T_f N_f(\zeta, \eta), \quad \text{если } x, y \in e_{def},$$

где  $N_k(\zeta, \eta)$  - базисные функции.

Базисные функции определяются из соотношений:

$$\begin{aligned} N_a(\zeta, \eta) &= 1 - \zeta, & N_b(\zeta, \eta) &= \zeta - \eta, & N_c(\zeta, \eta) &= \eta, \\ N_d(\zeta, \eta) &= 1 - \eta, & N_f(\zeta, \eta) &= \eta - \zeta, & N_e(\zeta, \eta) &= \zeta. \end{aligned}$$

Для уменьшения невязки функцию  $R(x, y)$  выбираем ортогональной ко всем базисным функциям  $N_k(x, y)$ . Учитывая, что выражения  $N_k(x, y)$  обладают локальным носителем только на элементах, расположенных вокруг точек сетки  $k$ , получим [89]:

$$(R, N_k) = K_A + K_B + K_C + K_D + K_E + K_F,$$

где

$$K_p = \iint_{e_p} \left( \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x} \frac{\partial N_k}{\partial x} + \frac{\partial \tilde{T}}{\partial y} \frac{\partial N_k}{\partial y} + 2N_k \right) dx dy, \quad p = A, B, C, D, E, F.$$

Элементы  $A, \dots, F$  окружают точку сетки  $k$  (рисунок 2.4).

Значение интегралов  $K_A, K_B, K_C, K_D, K_E, K_F$  вычисляются следующим образом:

$$K_A = D_{bb} T_k + D_{cb} T_N + D_{ab} T_W + 2h_c E_b,$$

$$K_B = D_{ee} T_k + D_{fe} T_W + D_{de} T_{SW} + 2h_c E_e,$$

$$K_C = D_{cc} T_k + D_{ac} T_{SW} + D_{cb} T_S + 2h_c E_c,$$

$$K_D = D_{ff} T_k + D_{df} T_S + D_{fe} T_E + 2h_c E_f,$$

$$K_E = D_{aa} T_k + D_{ab} T_E + D_{ac} T_{NE} + 2h_c E_a,$$

$$K_F = D_{dd} T_k + D_{de} T_{NE} + D_{df} T_N + 2h_c E_d,$$

где  $h_c$  - шаг сетки,

$$D_{pq} = \iint_{00}^{11} \left( \frac{\partial N_p}{\partial \zeta} \frac{\partial N_q}{\partial \zeta} + \frac{\partial N_p}{\partial \eta} \frac{\partial N_q}{\partial \eta} \right) d\zeta d\eta,$$

$$E_r = \iint_{00}^{11} N_r d\zeta d\eta,$$

Числовые значения интегралов  $D_{pq}$  и  $E_r$  приведены в таблице 2.1 [175].

Таблица 2.1 - Числовые значения интегралов  $D_{pq}$  и  $E_r$

Выражение для интеграла	Числовое значение
$D_{pq}$ , a-b, b-c, d-f, e-f	-1
$D_{pq}$ , a-c, d-e	0
$D_{pq}$ , a-a, c-c, d-d, e-e	1
$D_{pq}$ , b-b, f-f	2
$E_r$ , r=a, c, d, e	0,5
$E_r$ , r=b, fe	0

По рассмотренной методике произведен расчет температурного поля ТЭ слоистой конструкции. Его результаты представлены на рисунках 2.5-2.9.

На рисунке 2.5 рассмотрен слоистый ТЭ с указанными геометрическими размерами и наложенной конечноэлементной сеткой. Размер каждой ячейки сетки соответствует определяющему размеру.

На рисунках 2.6 и 2.7 изображены двумерное температурное поле ТЭ слоистой конструкции и распределение плотности теплового потока в нем после выхода на стационарный режим.

В качестве исходных данных приняты:  $\lambda_1=\lambda_3=\lambda_5=395$  Вт/(м·К),  $\lambda_2=\lambda_4=1,5$  Вт/(м·К),  $\rho_1=\rho_3=\rho_5=0,0172 \cdot 10^{-6}$  Ом·м,  $\rho_2=\rho_4=10,65 \cdot 10^{-6}$  Ом·м,  $C_1=C_3=C_5=383$  Дж/(кг·К),  $C_2=C_4=123$  Дж/(кг·К),  $T_{cp}=293$  К,  $T_0=291$  К,  $\alpha=0,2 \cdot 10^{-3}$  В/К,  $\beta=10$  Вт/(м<sup>2</sup>·К),  $T_{тс}=291$  К,  $\beta_{тс}=70$  Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Значение теплового потока определено по выражениям [76]:

$$F_{xi} = \lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial x}, \quad F_{yi} = \lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial y},$$

где  $i=1, \dots, 5$ .

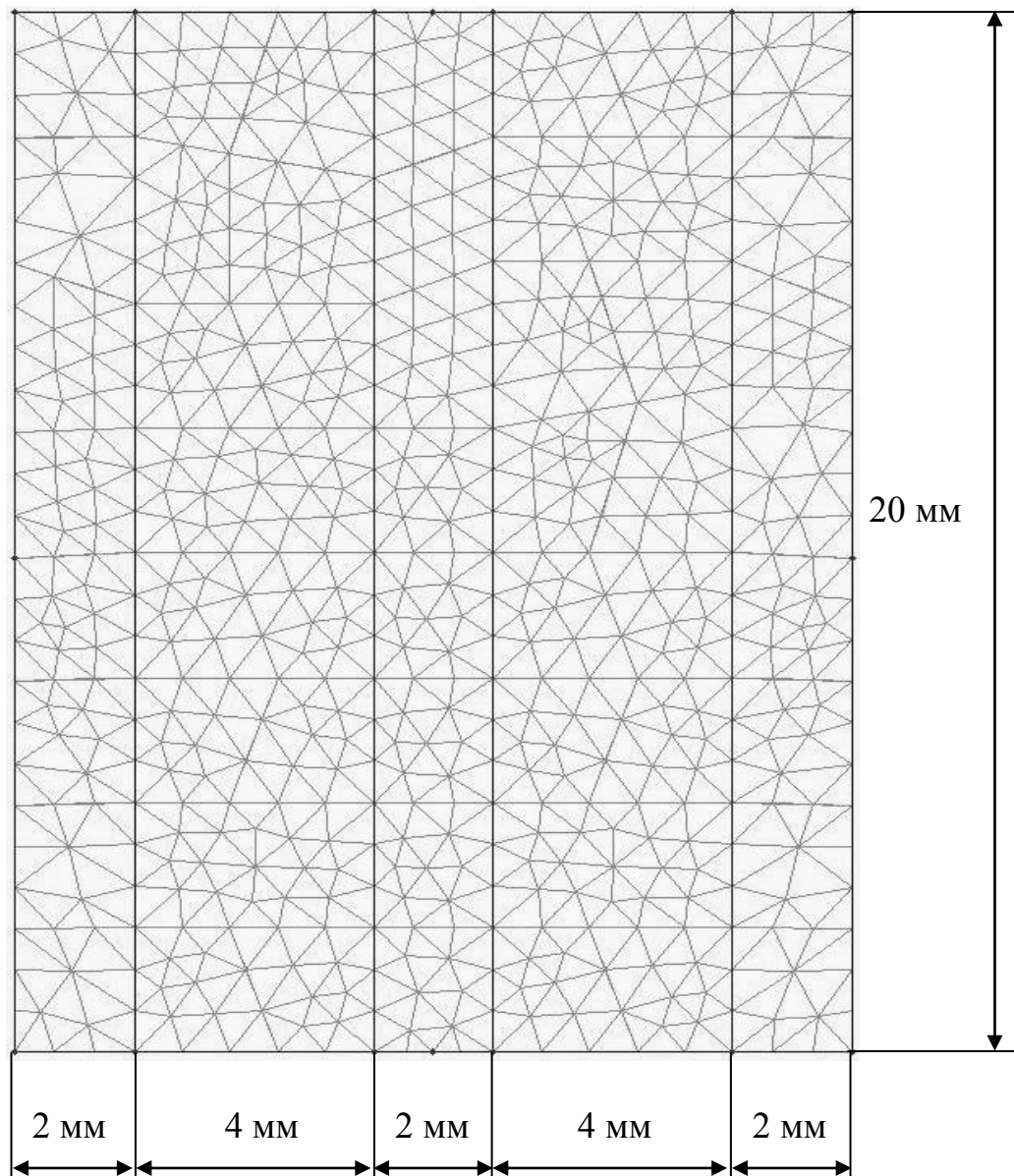


Рисунок 2.5 - Структура слоистого ТЭ с конечноэлементной сеткой

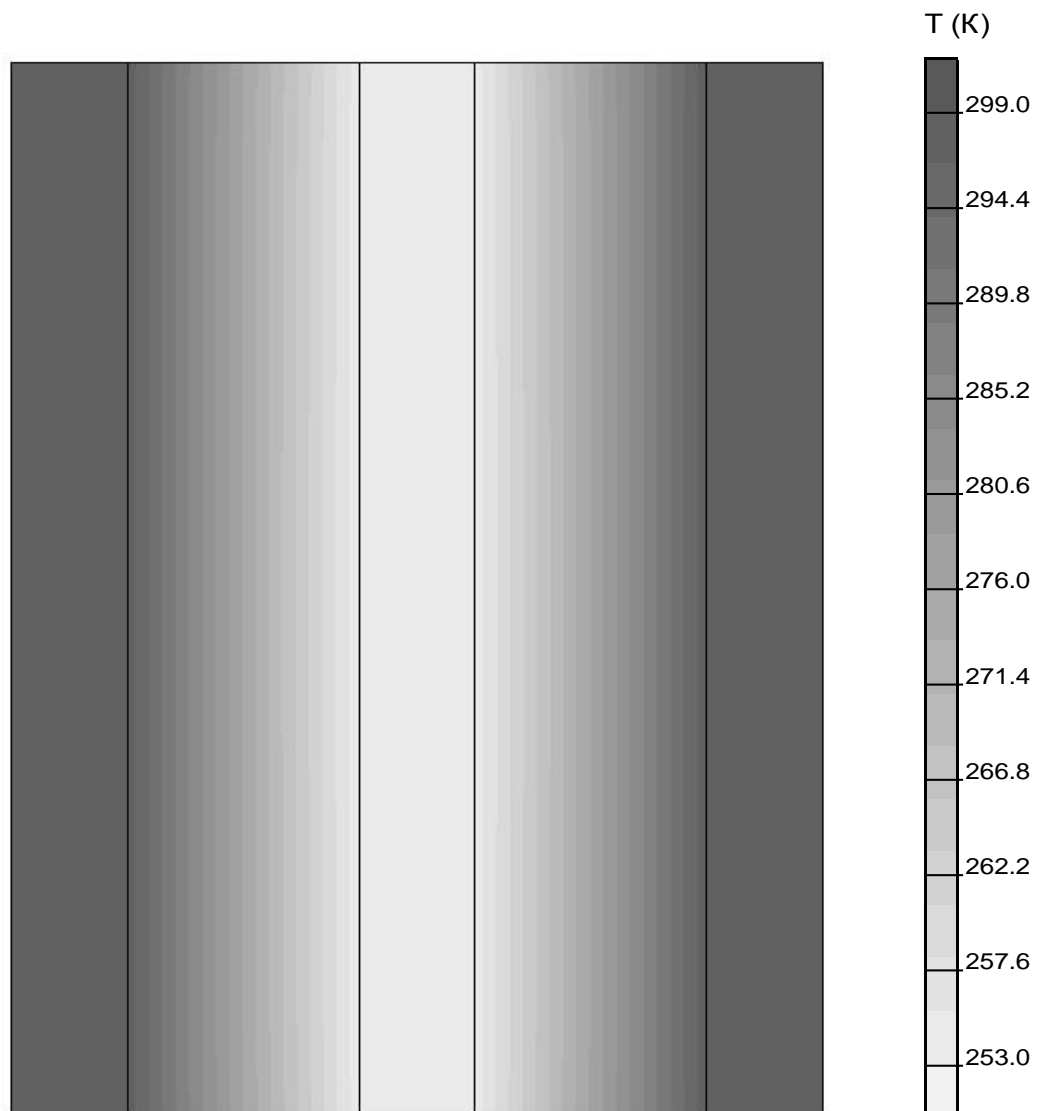


Рисунок 2.6 - Температурное поле слоистого ТЭ

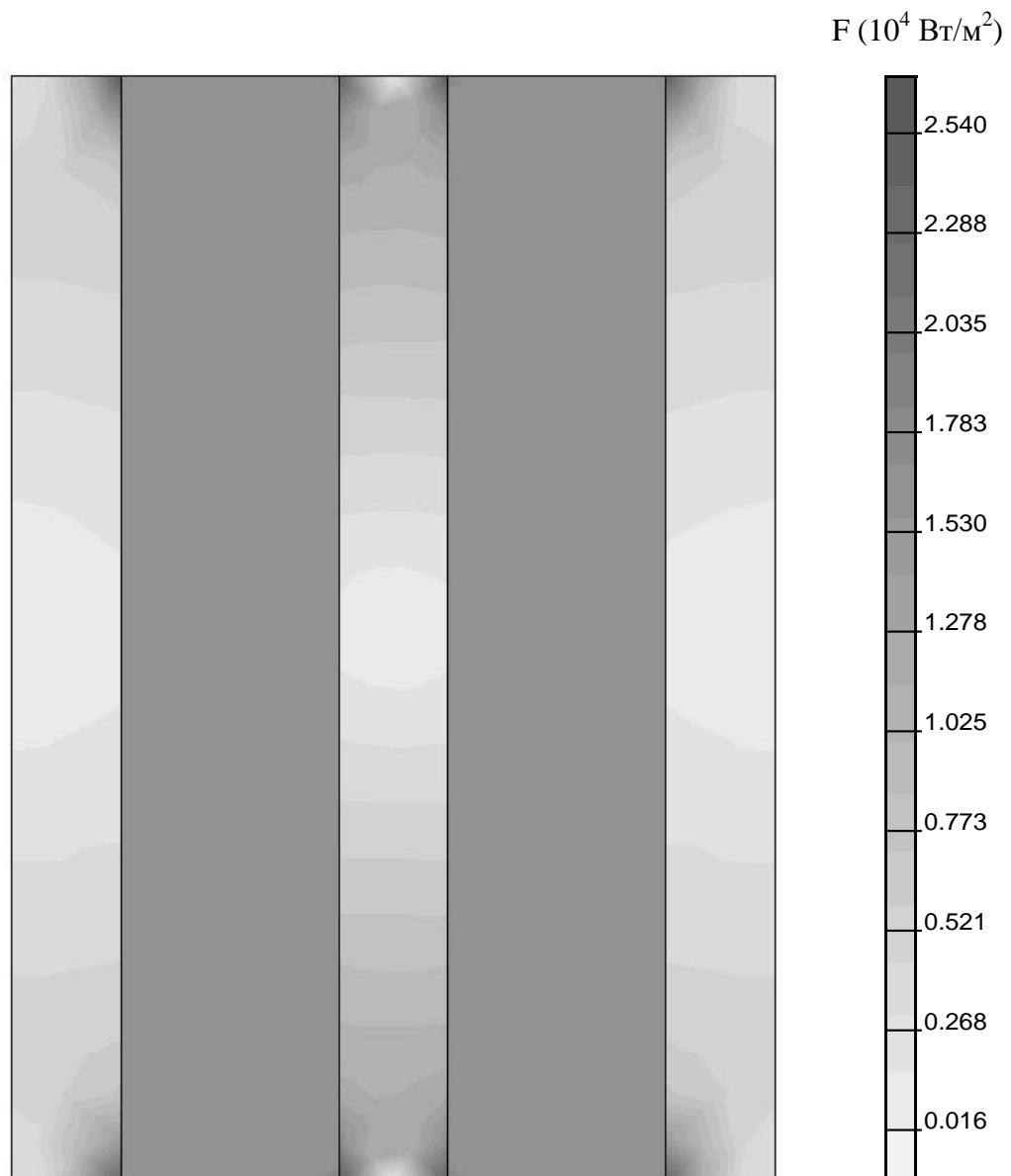


Рисунок 2.7 - Картина распределения тепловых потоков в слоистом ТЭ

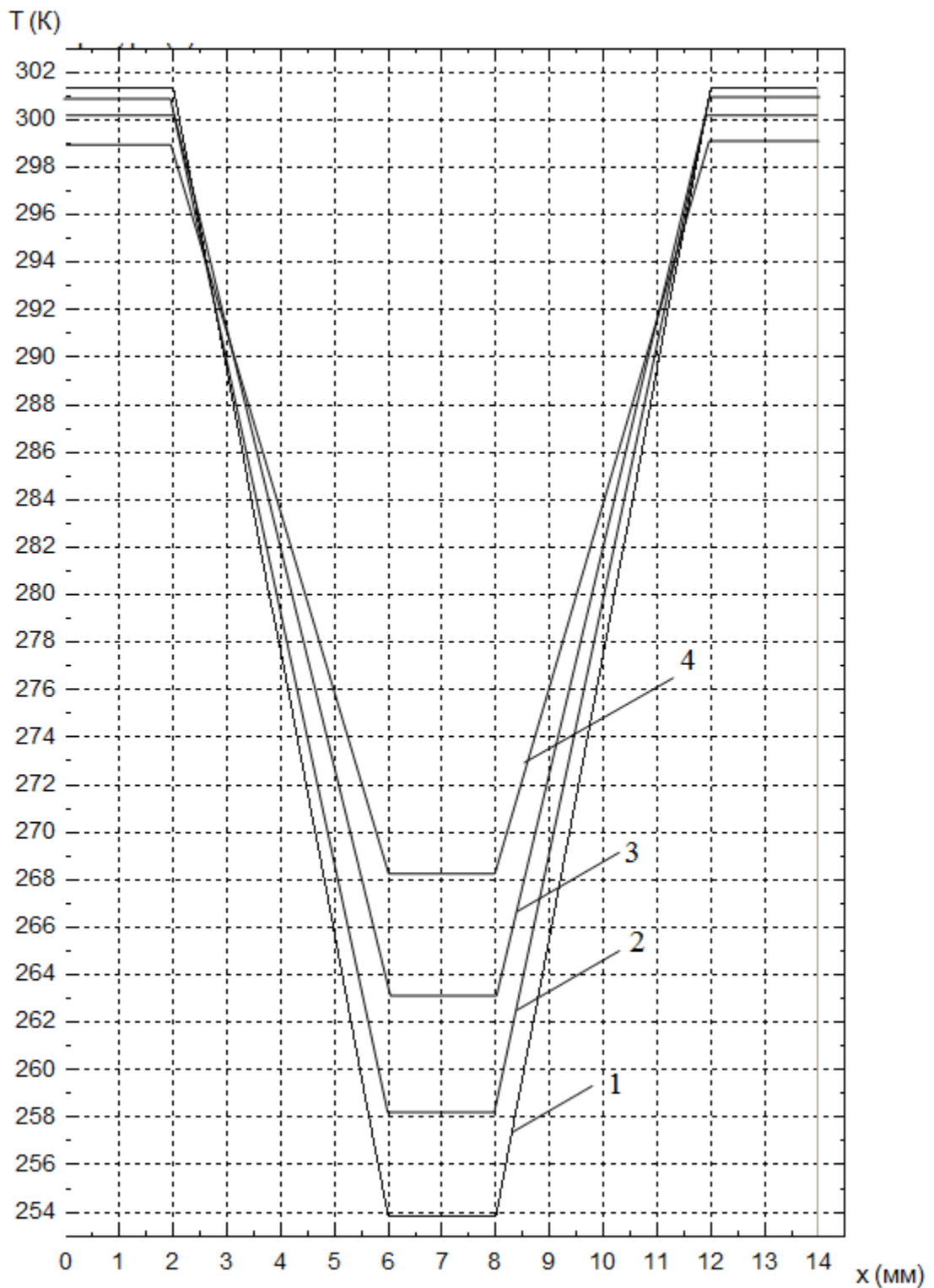


Рисунок 2.8 - Распределение температуры ТЭ вдоль продольной оси слоистого ТЭ при различной величине тока питания: 1 – 140 А, 2 – 120 А, 3 – 100 А, 4 – 80 А



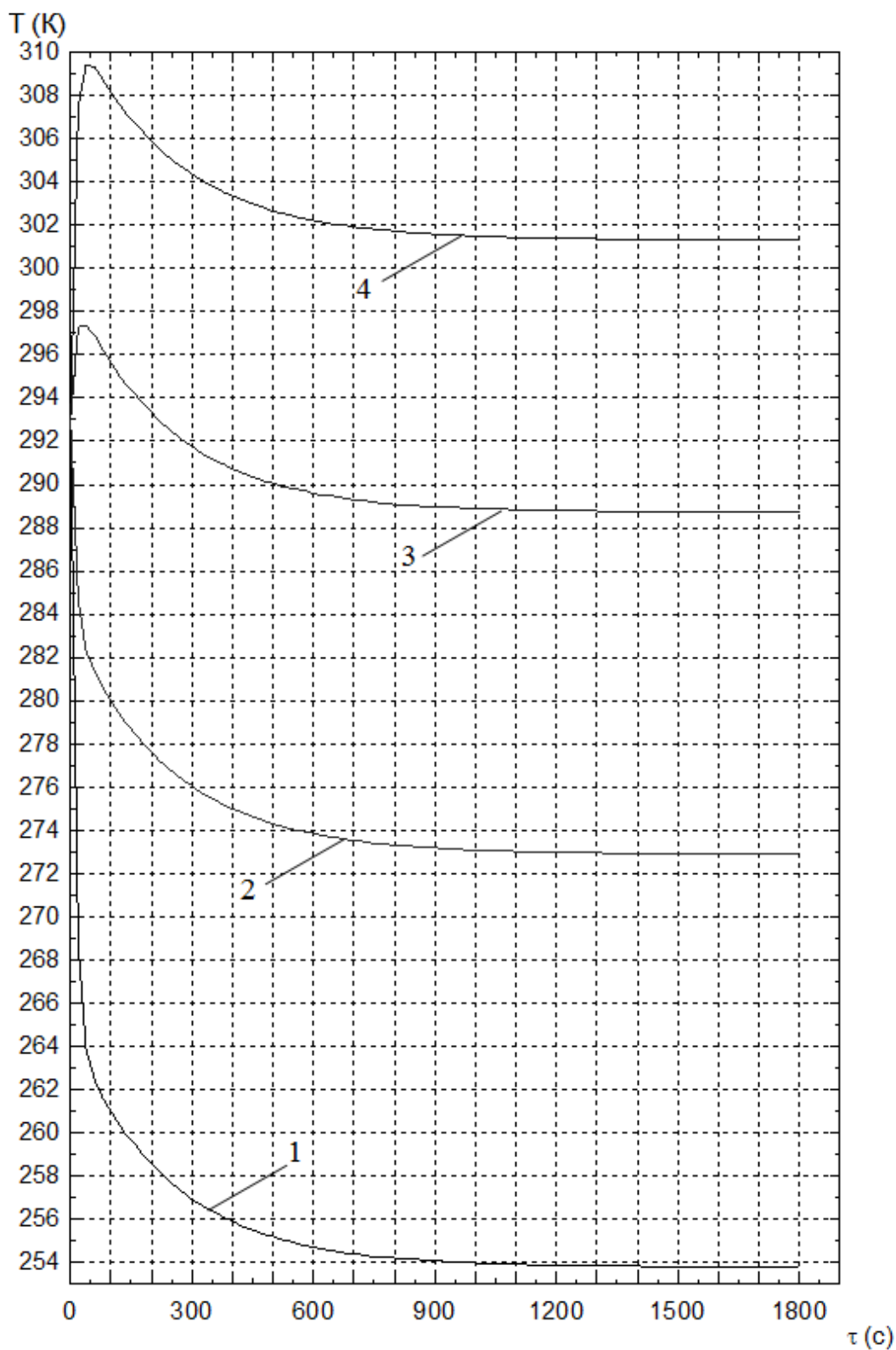


Рисунок 2.9 - Изменение температуры в различных точках слоистого ТЭ вдоль продольной оси во времени: 1 – холодная коммутационная пластина, 2 – ветвь ТЭ на расстоянии 1,5 мм от холодной коммутационной пластины, 3 – ветвь ТЭ на расстоянии 1,5 мм от горячей коммутационной пластины, 4 – горячая коммутационная пластина

На рисунках 2.8-2.9 представлено распределение температуры ТЭ вдоль его продольной оси при различных значениях тока питания и изменение во времени температуры в его контрольных точках. В соответствии с расчетами, при использовании слоистых ТЭ может быть получен существенный перепад температур между их коммутационными пластинами при значительной величине плотности теплового потока.

Так, при разнице температур между коммутационными пластинами в 47 К плотность теплового потока на холодном спае ТЭ, пропорциональная его холодопроизводительности, равняется  $18000 \text{ Вт/м}^2$  при токе питания ТЭ 140 А. С уменьшением значения электрического тока величина плотности теплового потока на холодном спае ТЭ и разница температур между его спаями уменьшаются. При этом снижение тока питания ТЭ с 140 А до 80 А уменьшает разницу температур между спаями ТЭ с 47 К до 31 К, что соответствует изменению плотности теплового потока на холодном спае с  $18000 \text{ Вт/м}^2$  до  $12000 \text{ Вт/м}^2$ .

На рисунке 2.9 рассмотрены данные об изменении температуры холодной (1) и горячей (4) коммутационных пластин, а также контрольных точек ветви ТЭ во времени при токе питания 140 А (2 - ветвь ТЭ на расстоянии 1,5 мм от холодной коммутационной пластины, 3 – ветвь ТЭ на расстоянии 1,5 мм от горячей коммутационной пластины). В соответствии с графиками, температура в данных точках выходит на стационарный режим примерно через 900 с. Указанное обстоятельство связано с относительно большими габаритными размерами ТЭ. Так, при толщине коммутационных пластин 2 мм и высоте ветвей ТЭ 4 мм площадь его поперечного сечения составляет  $400 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ .

В этих условиях, как следует из результатов расчета, эффективным будет предусмотреть, в соответствии с [113], теплосъем не только с горячих коммутационных пластин, но также и с близлежащих к ним боковых поверхностей ветвей ТЭ. Может быть предложен дополнительный отвод теплоты примерно с 1/3 боковой поверхности ТЭ, прилежащей к его горячим спаям.

## 2.2 Расчет поля термомеханических напряжений слоистого термоэлемента

Для определения термомеханических характеристик слоистого ТЭ осуществлен расчет возникающих в нем термомеханических напряжений и деформаций, являющихся следствием теплового расширения материалов.

Рассмотрим упругое тело (рисунок 2.1), свободное от закреплений и механических воздействий. Допустим, что напряженно-деформированное состояние тела обусловлено неравномерным температурным полем  $T$ . Требуется найти механические напряжения  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ . Для отыскания шести неизвестных функций напряжений необходимо решить систему [31] из:

трех уравнений равновесия

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} &= 0, \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial z} &= 0, \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} &= 0, \end{aligned}$$

и шести уравнений сплошности

$$\begin{aligned} (1+\nu)\nabla^2\sigma_x + \frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + E\gamma\left(\frac{1+\nu}{1-\nu}\nabla^2 T + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\right) &= 0, \\ (1+\nu)\nabla^2\sigma_y + \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} + E\gamma\left(\frac{1+\nu}{1-\nu}\nabla^2 T + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) &= 0, \\ (1+\nu)\nabla^2\sigma_z + \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} + E\gamma\left(\frac{1+\nu}{1-\nu}\nabla^2 T + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) &= 0, \\ (1+\nu)\nabla^2\tau_{xy} + \frac{\partial^2 S}{\partial x\partial y} + E\gamma\frac{\partial^2 T}{\partial x\partial y} &= 0, \\ (1+\nu)\nabla^2\tau_{yz} + \frac{\partial^2 S}{\partial y\partial z} + E\gamma\frac{\partial^2 T}{\partial y\partial z} &= 0, \end{aligned} \tag{2.7}$$

$$(1 + \nu)\nabla^2 \tau_{zx} + \frac{\partial^2 S}{\partial z \partial x} + E\gamma \frac{\partial^2 T}{\partial z \partial x} = 0,$$

где  $\nu$  - коэффициент Пуассона,  $S$  - сумма нормальных напряжений,  $E$  - модуль Юнга,  $\gamma$  - температурный коэффициент линейного расширения.

При этом должны быть удовлетворены граничные условия:

$$\sigma_x l + \tau_{yx} m + \tau_{zx} n = 0,$$

$$\tau_{xy} l + \sigma_y m + \tau_{zy} n = 0,$$

$$\tau_{xz} l + \tau_{yz} m + \sigma_z n = 0,$$

где  $l, m, n$  - направляющие косинусы нормали  $\vec{n}$  к поверхности  $\partial\Omega$ .

Связь между термоупругими напряжениями и деформациями выражается следующими равенствами (соотношения Дюгамеля-Неймана):

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)) + \gamma T, \quad \gamma_{xy} = \frac{1}{G} \tau_{xy},$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E}(\sigma_y - \nu(\sigma_z + \sigma_x)) + \gamma T, \quad \gamma_{yz} = \frac{1}{G} \tau_{yz},$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E}(\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)) + \gamma T, \quad \gamma_{zx} = \frac{1}{G} \tau_{zx}.$$

Постоянные упругости  $E, G$  и  $\nu$  и коэффициенты Ляме  $\mu_1$  и  $\mu_2$  связаны соотношениями:

$$\mu_1 = G = \frac{E}{2(1 + \nu)}, \quad \mu_2 = \frac{2\nu G}{1 - 2\nu} = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}.$$

Связь между термоупругими перемещениями и деформациями выражается соотношениями Коши:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x},$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y},$$

$$\varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}, \quad \gamma_{zx} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}.$$

Для решения составленной задачи конструкция ТЭ представлена в виде кусочно-однородного тела, состоящего из отдельных частей с различными, постоянными в пределах каждой из них, механическими характеристиками. Начальными и граничными условиями для вышеописанных выражений будут условия, определяющие наличие по всем граням ТЭ нулевого нормального давления.

Решение описанной задачи, как и в случае с расчетом трехмерного нестационарного поля ТЭ, представляет значительные трудности. Поэтому целесообразным является упростить задачу и рассматривать ее не в трехмерном, а в двухмерном виде. При этом для ее решения также может быть использован метод конечных элементов.

Математическая формулировка задачи следующая [48].

Соотношения для механических напряжений и деформаций представлены в следующем виде:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu\sigma_y) + \gamma T,$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E}(\sigma_y - \nu\sigma_x) + \gamma T,$$

$$\gamma_{xy} = \frac{2(1+\nu)}{E}\tau_{xy}.$$

Деформация  $\varepsilon_z$  зависит от  $\varepsilon_x$  и  $\varepsilon_y$  в виде

$$\varepsilon_z = \frac{\nu}{\nu-1}(\varepsilon_x + \varepsilon_y) + \frac{1+\nu}{1-\nu}\alpha T.$$

В качестве неизвестных при решении плоской задачи термоупругости принимаются величины  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  и  $\tau_{xy}$ .

Для плоского напряженного состояния исходя из уравнения (2.7) получим

$$\nabla^2(\sigma_x + \sigma_y) + E\gamma\nabla^2 T = 0.$$

Частное решение может быть записано следующим образом:

$$\sigma_x^{(T)} = -2G \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2}, \quad \sigma_y^{(T)} = -2G \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2}, \quad \tau_{xy}^{(T)} = 2G \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x \partial y}. \quad (2.8)$$

Для двумерного напряженного состояния имеем

$$\nabla^2 \Phi = (1 + \nu) \gamma T, \quad (2.9)$$

где  $\Phi$  – термоупругий потенциал перемещений.

Для стационарных температурных полей:

$$\nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0,$$

применив оператор  $\nabla^2$  к выражению (2.9), получим

$$\nabla^2 \nabla^2 \Phi = \frac{\partial^4 \Phi}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \Phi}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \Phi}{\partial y^4} = 0. \quad (2.10)$$

Если из соотношения (2.10) определен  $\Phi$ , то механические напряжения могут быть определены по формулам (2.8).

Так как термоупругий потенциал перемещений позволяет получить только частное решение, полученные с его помощью значения механических напряжений в общем случае не будут удовлетворять граничным условиям задачи.

Для того, чтобы граница областей была не напряжена необходимо наложить такое решение уравнений, описывающих термоупругие процессы, которое на поверхности ТЭ давало бы значения напряжений, равные по величине и противоположные по знаку полученным из (2.8).

Решение данной задачи осуществлено путем использования функции напряжений Эри. В этом случае:

$$\sigma_x^{(P)} = \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2}, \quad \sigma_y^{(P)} = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2}, \quad \tau_{xy}^{(P)} = -\frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial y}, \quad (2.11)$$

где  $\phi$  - бигармоническая функция.

Окончательный расчет термоупругих процессов в ТЭ произведем по следующим соотношениям, полученным путем суммирования (2.8) и (2.11):

$$\sigma_x = \sigma_x^{(T)} + \sigma_x^{(P)} = \frac{\partial^2 (\phi - 2G\Phi)}{\partial y^2},$$

$$\sigma_y = \sigma_y^{(T)} + \sigma_y^{(P)} = \frac{\partial^2(\phi - 2G\Phi)}{\partial x^2},$$

$$\tau_{xy} = \tau_{xy}^{(T)} + \tau_{xy}^{(P)} = \frac{\partial^2(2G\Phi - \phi)}{\partial x \partial y}.$$

После ввода функции напряжений Эри, связанной с  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$  выражениями, идентичными (2.11), и подстановки ее в (2.10), получим

$$\nabla^2 \nabla^2 \phi + E\gamma \nabla^2 T = 0.$$

Общее решение последнего уравнения получено в виде

$$\phi = \phi^{(P)} + \phi^{(T)},$$

где  $\phi^{(P)}$  – общее решение уравнения

$$\nabla^2 \nabla^2 \phi^{(P)} = 0,$$

$\phi^{(T)}$  – частное решение уравнения

$$\nabla^2 \phi^{(T)} + E\alpha \nabla^2 T = 0.$$

Начальными и граничными условиями для вышеописанных расчетных формул будут условия, определяющие наличие по всем граням ТЭ нулевого нормального давления. Их расчет численным методом конечных элементов дает возможность получить двумерную и одномерную картину распределения механических напряжений, деформаций и перемещений.

Результаты численного эксперимента представлены на рисунках 2.10-2.13. Исходными данными являлись:  $E=1,2 \cdot 10^6$  Н/м<sup>2</sup>,  $\nu=0,3$   $\gamma=22,2 \cdot 10^{-6}$  1/К для термоэлектрического материала и  $E=1,2 \cdot 10^{11}$  Н/м<sup>2</sup>,  $\nu=0,34$   $\gamma=16,8 \cdot 10^{-6}$  1/К для медных коммутационных пластин [166]. Предел прочности термоэлектрического материала –  $1,0 \cdot 10^7$  Н/м<sup>2</sup>, коммутационных пластин –  $3,2 \cdot 10^8$  Н/м<sup>2</sup>.

На рисунке 2.10 представлено поле механических напряжений слоистого ТЭ в двумерных координатах при токе питания 120 А, что соответствует плотности теплового потока 16000 Вт/м<sup>2</sup>. В соответствии с расчетными данными для такого конструктивного исполнения ТЭ величина механических напряжений не выходит за допустимые пределы. Максимальная механиче-

ская нагрузка приходится на места соединений коммутационных пластин с ветвями ТЭ. В данных областях значение механической нагрузки достигает величины  $0,9 \cdot 10^7$  Н/м<sup>2</sup> для коммутационной пластины, выполненной из меди. Наибольшие механические напряжения в термоэлектрике составляют  $0,2 \cdot 10^7$  Н/м<sup>2</sup>. На рисунке 2.10 также рассмотрена степень деформирования ТЭ. В соответствие с ним, в случае слоистого исполнения ТЭ деформации незначительны и связаны, прежде всего, с удлинением и расширением ТЭ по боковой поверхности, что объясняется отсутствием его жесткой фиксации по краям. При этом максимальная величина деформации согласно результатам расчетов не превышает 0,18 мм (рисунок 2.11).

Для сравнения на рисунке 2.12 изображена картина распределения механических напряжений по продольному сечению ТЭ при тех же условиях для его классического П-образного исполнения. В данном случае деформации достаточно велики, при токе питания 120 А без применения специальных мер по снижению термомеханических нагрузок механические напряжения превышают соответствующий предел прочности материалов. Так, для коммутационных пластин в месте их контакта с ветвью ТЭ значение механических напряжений составляет  $7 \cdot 10^8$  Н/м<sup>2</sup>, что более чем в два раза больше величины предела прочности меди, для термоэлектрика соотношение механических нагрузок и предела прочности в данном случае еще выше. При этом в соответствии с расчетами установлено, что для классической конструкции ТЭ наибольшим током питания без превышения допустимой величины механических нагрузок в системе является ток, не превышающий значения 82 А, почти в 1,7 раза меньший, чем в случае использования слоистого ТЭ, для которого максимальная величина тока питания составляет 140 А.

Таким образом, результаты численного эксперимента в полной мере подтверждают преимущества ТЭБ слоистой конструкции перед ТЭБ, выполненной из ТЭ классической П-образной формы. В первом случае ТЭБ может иметь большую мощность без снижения ее термомеханических характеристик и надежности работы.



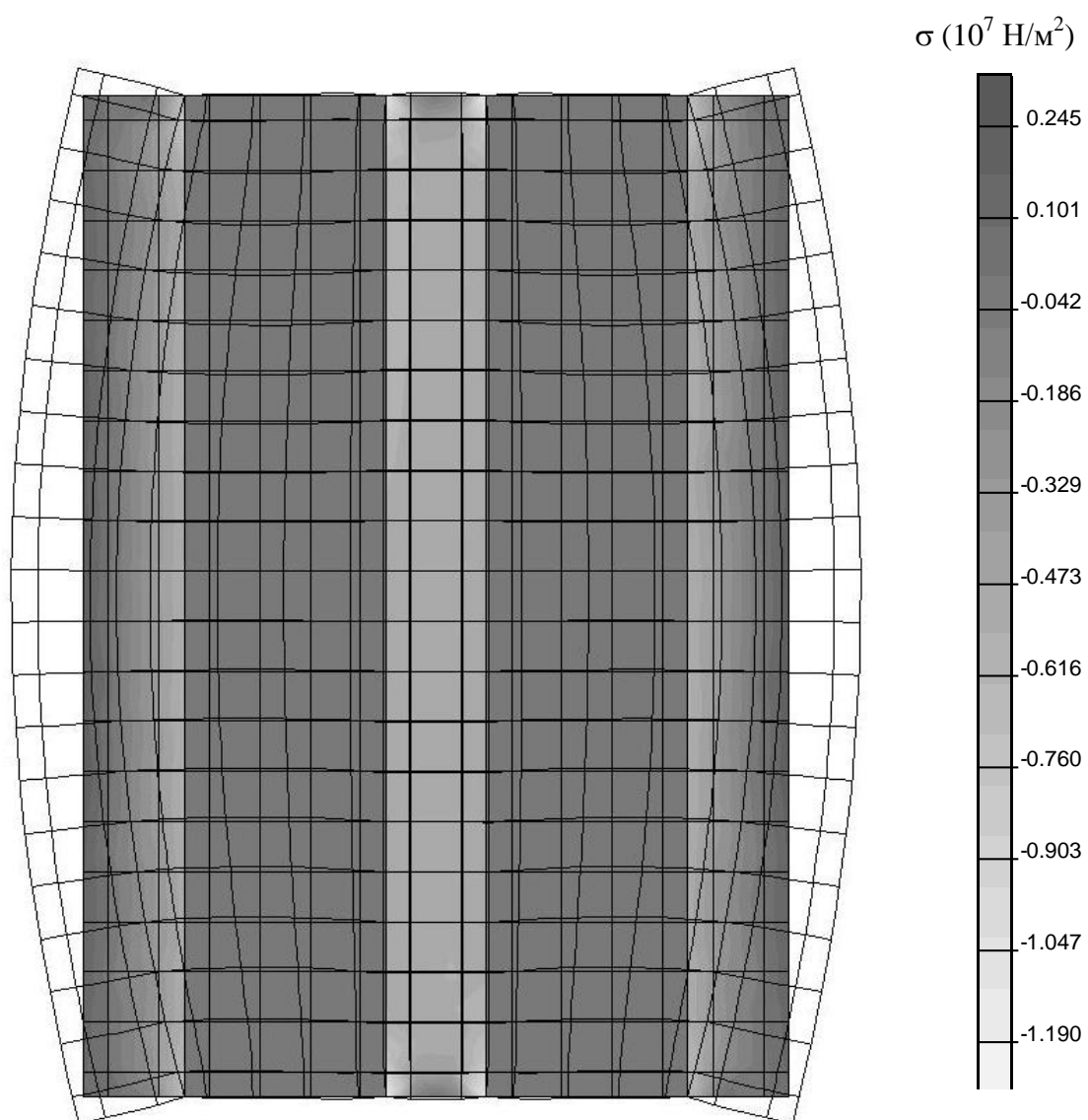


Рисунок 2.10 - Картина распределения механических напряжений в слоистом ТЭ

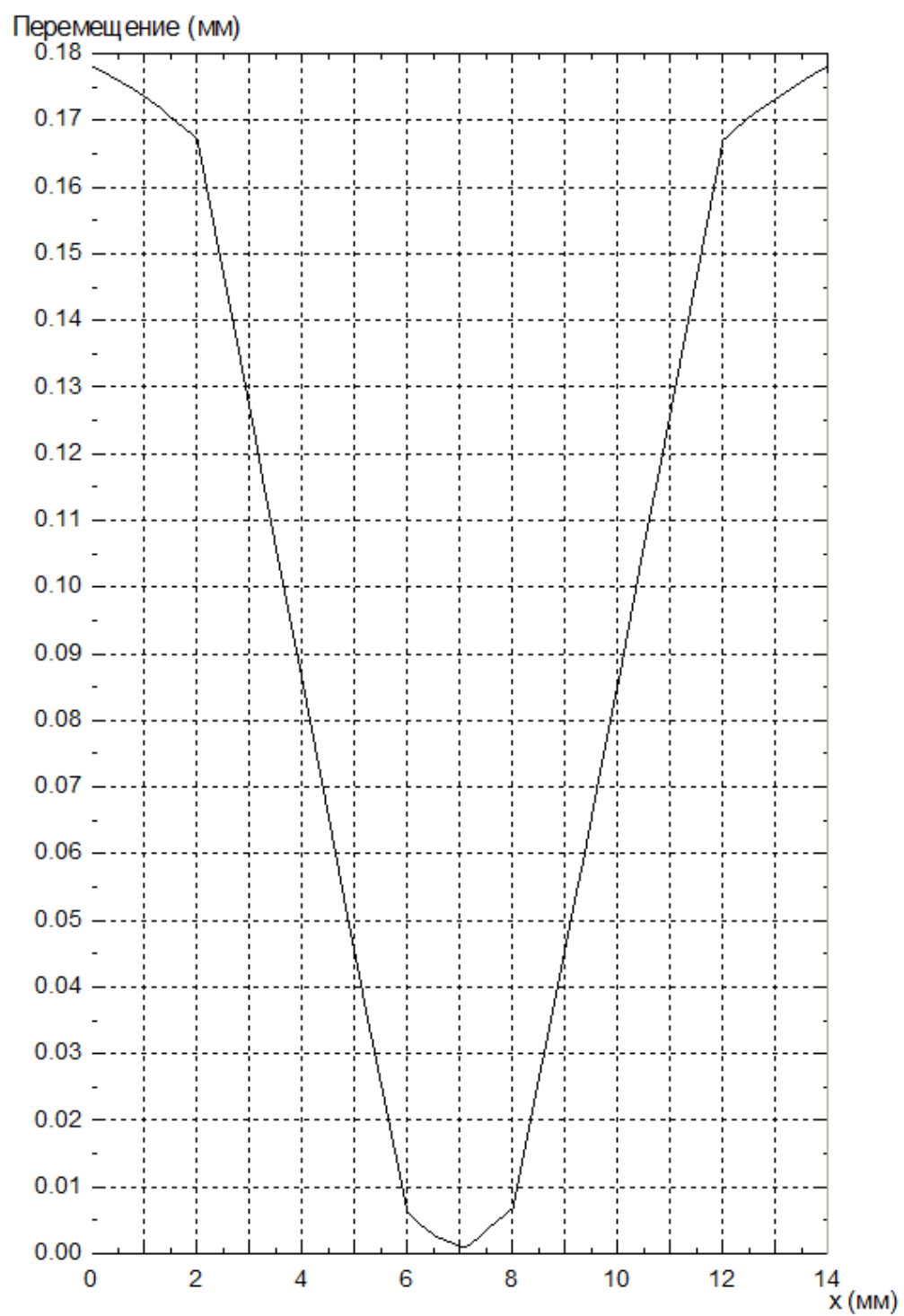


Рисунок 2.11 - Картина перемещений вдоль продольной оси слоистого ТЭ

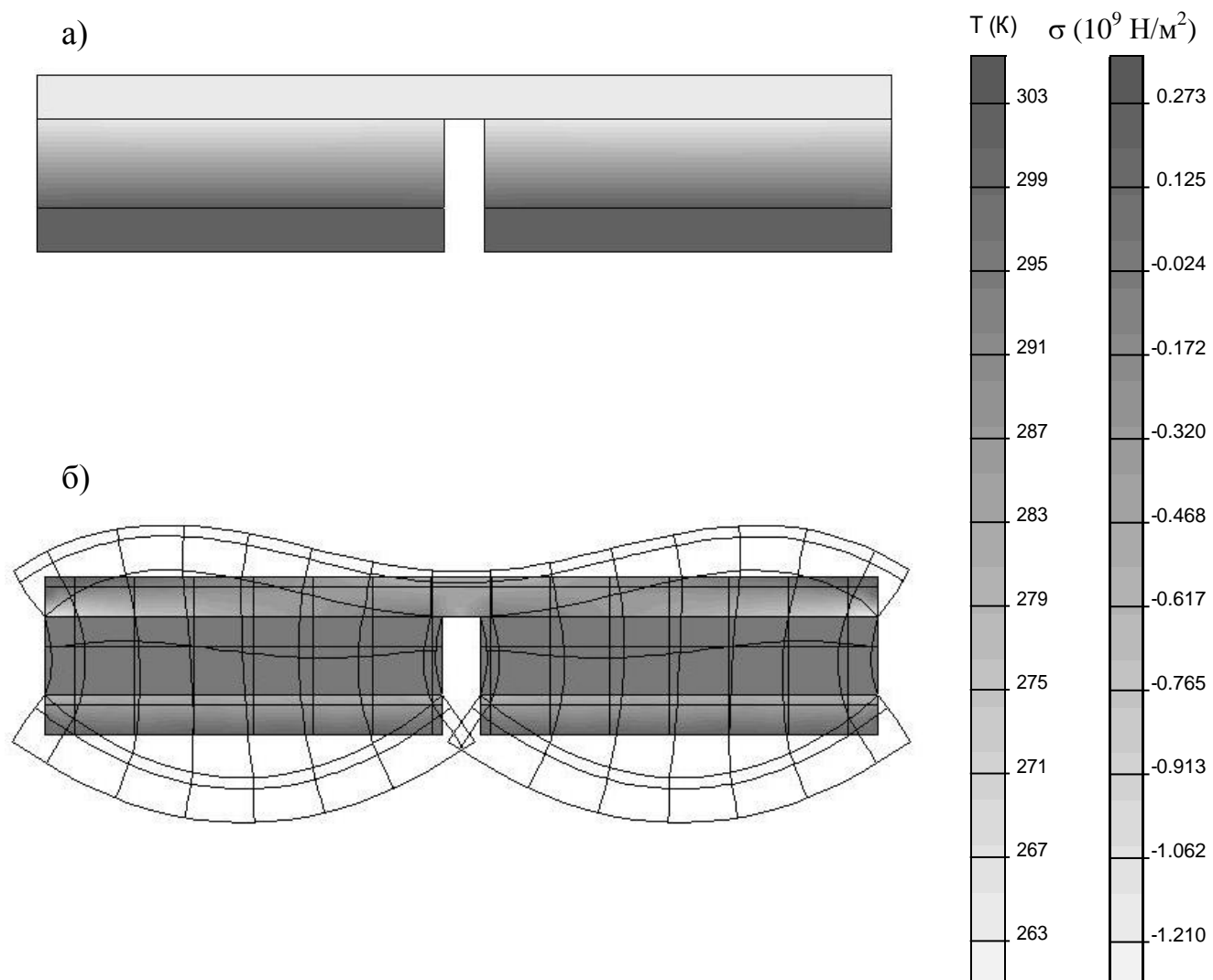


Рисунок 2.12 - Температурное поле (а) и поле механических напряжений (б) классической П-образной конструкции ТЭ

## **ГЛАВА 3. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В СИСТЕМАХ ОХЛАЖДЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ НА БАЗЕ ПЛАВЯЩИХСЯ РАБОЧИХ ВЕЩЕСТВ**

### **3.1 Математическая модель системы охлаждения элементов радиоэлектронной аппаратуры, работающих в режиме повторно-кратковременных тепловыделений**

При разработке РЭА, работающей в широком диапазоне температур, необходимо учитывать влияние температуры на ее характеристики. Если последние выходят за допустимые пределы, необходимые для ее эффективного функционирования, применяют те или иные методы охлаждения и термостабилизации.

На данный момент в процессе проектирования РЭА применяются различные методы теплоотвода, включающие в себя воздушные, жидкостные, кондуктивные, испарительные, термоэлектрические и некоторые специальные [13, 44, 77, 176, 184].

Для охлаждения РЭА, работающей в режиме повторно-кратковременных тепловых нагрузок, перспективным является метод, основанный на использовании плавящихся тепловых аккумуляторов со стабильной температурой и высокой теплотой плавления [1]. Технически системы, реализующие данный метод, включают в себя контейнер, заполненный рабочим веществом, на котором размещаются элементы РЭА. Во время работы теплота, выделяемая им, поглощается за счет скрытой теплоты плавления теплового аккумулятора. После окончания работы РЭА происходит остывание рабочего агента и его затвердевание за счет теплообмена с окружающей средой.

Основным недостатком такой конструкции, ограничивающим ее активное использование на практике для отвода теплоты от элементов РЭА, является необходимость поддержания рабочего агента в состоянии фазового перехода на протяжении всего времени работы радиоэлектронного

прибора. Так как зачастую РЭА при своей работе выделяет значительные удельные плотности теплового потока, во многих случаях теплоаккумулирующей способности вещества не хватает для обеспечения необходимого температурного режима на протяжении всего цикла ее работы (рабочее вещество полностью расплавится до окончания цикла работы РЭА). В результате этого требуемый температурный режим функционирования РЭА может быть нарушен, в результате чего прибор выйдет из строя.

Поэтому для отвода теплоты от мощной РЭА с применением плавящихся тепловых аккумуляторов целесообразным является использование некоторой дополнительной охлаждающей системы, обеспечивающей эффективный теплоотвод от рабочего агента. В отношении энергетических и массогабаритных характеристик охлаждающей системы эффективным является применение для дополнительного теплоотвода ТЭБ. Целесообразной представляется такая конструктивная схема отвода теплоты от элементов РЭА, когда они размещаются на противоположных гранях емкости с плавящимся веществом, а ТЭБ устанавливаются на перпендикулярных к ним, как это показано на рисунке 3.1. При этом отвод теплоты от контейнера с тепловым аккумулятором осуществляется в перерыве работы элементов РЭА.

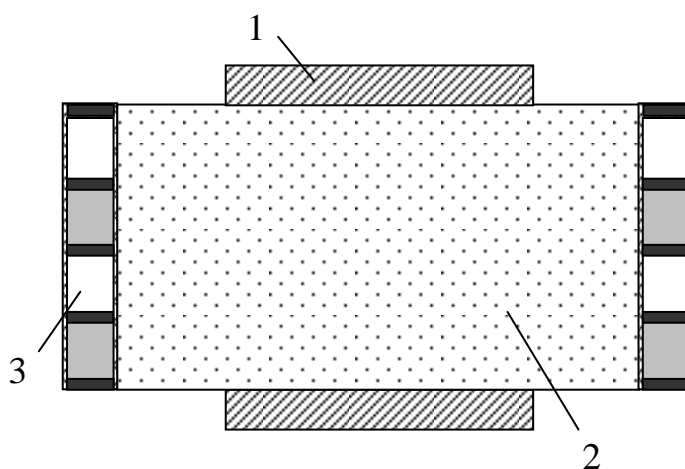


Рисунок 3.1 - Конструктивная схема расположения элементов РЭА и ТЭБ на емкости с плавящимся веществом  
1- элемент РЭА, 2 – контейнер с наполнителями, 3 – ТЭБ

Наличие некоторых особенностей в протекании процессов плавления и затвердевания вещества определяет необходимость их отдельного рассмотрения и математического описания.

### **3.1.1 Моделирование работы охлаждающей системы и исследование процессов теплообмена при плавлении рабочих веществ**

Задача расчета и исследования процессов теплообмена, сопровождающихся плавлением (затвердеванием) веществ в литературе носит название «задача Стефана» [2, 43]. Впервые она была решена в 1831 г. действительными членами Российской Академии наук, профессорами Г. Ляме и Б. Клайпероном [164].

Особенностью таких задач является учет наличия движущейся поверхности раздела между твердой и жидкой фазами, на которой происходит поглощение или выделение теплоты, закономерность движения которой необходимо определить. Теплофизические характеристики фаз по обеим сторонам движущейся поверхности в общем случае могут отличаться. «Задача Стефана» представляет собой задачу о сопряжении температурных полей в соприкасающихся твердой и жидкой фазах при особом граничном условии на движущейся поверхности раздела. Данное условие определяет равенство температур в соприкасающихся фазах и неравенство удельных тепловых потоков по обеим границам поверхности раздела, обусловленных тепловым эффектом фазового превращения. Задача описывается нелинейными дифференциальными уравнениями, получить ее точное аналитическое решение, за редким исключением, достаточно сложно, а зачастую с учетом существующего математического аппарата невозможно.

На рисунке 3.2 представлена одномерная модель емкости, заполненной плавящимся рабочим веществом для случая отсутствия естественной конвекции в его жидкой фазе (данное допущение справедливо для рабочих агентов,

используемых для данных целей на сегодняшний день, т.к. их плотности в твердой и жидкой фазах практически идентичны).

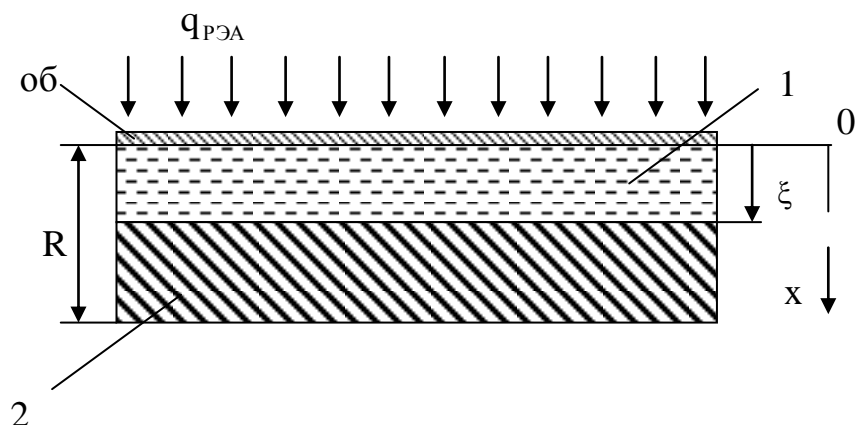


Рисунок 3.2 - Расчетная схема процесса плавления рабочего вещества

Анализ процессов теплообмена, происходящих в емкости, производится для одномерной модели при следующих основных допущениях [2]:

- температура в фазах рабочего агента зависит только от одной пространственной координаты;
- на границе раздела наблюдается устойчивое сосуществование твердой и жидкой фазы с соответствующей температурой;
- температура плавления (затвердевания) принимается постоянной в течение всего процесса фазового перехода;
- в жидкости конвективные потоки отсутствуют, при этом теплота по рабочему агенту передается только теплопроводностью;
- поверхности размещения элементов РЭА и ТЭБ плоскопараллельны;
- теплота, поступающая от элементов РЭА и ТЭБ равномерно распределена по всей поверхности их контакта с оболочкой емкости и характеризуется некоторым значением удельной плотности теплового потока;
- предполагается отсутствие термического сопротивления между элементами РЭА, а также ТЭБ и оболочкой емкости с рабочим веществом;

– теплота, необходимая для нагрева или охлаждения элементов РЭА и ТЭБ, учитывается в суммарной теплоемкости оболочки емкости с рабочим агентом.

Последнее допущение исключает из модели элементы РЭА и ТЭБ, что ее существенно упрощает и позволяет ввести в уравнение теплового баланса компонент, учитывающий рассеиваемую мощность, непосредственно применительно к оболочке емкости. Поэтому в расчетной схеме прибора (рисунок 3.2) эквивалентная рассеиваемая мощность, приведенная к единице площади поверхности охлаждающего устройства, представлена в виде равномерно распределенной тепловой нагрузки, поступающей непосредственно на плоскую поверхность емкости с рабочим веществом.

Данная постановка задачи отличается универсальностью ввиду того, что дает возможность установить температурный режим работы прибора практически для любой его геометрии.

В соответствие с принятыми допущениями математическое описание задачи расчета теплообмена для трехслойной модели емкости с плавящимся агентом будет иметь вид:

$$(c\rho\delta)_{об} \frac{dT_{об}}{d\tau} = q_{РЭА} + k_{ср}(T_{ср} - T_{об}) + q_{вещ}, \quad (3.1)$$

где  $c_i, \rho_i, \lambda_i$  - теплоемкость, плотность и теплопроводность вещества;  $T$  - температура;  $k_{ср}$  - коэффициент теплообмена с окружающей средой; индекс 1 соответствует жидкой фазе, 2 - твердой фазе рабочего вещества, об - оболочки емкости;  $q_{РЭА}$  - количество теплоты, выделяемое элементом РЭА в единицу времени и приходящееся на единицу площади емкости,  $T_{ср}$  - температура окружающей среды,  $q_{вещ}$  - количество теплоты, переданное в единицу времени рабочему веществу,  $\tau$  - время.

Для жидкой (1) и твердой (2) фаз теплового аккумулятора:

$$c_i\rho_i \frac{\partial T_i}{\partial \tau} = \lambda_i \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}; i = 1, 2; 0 \leq x \leq R; \quad (3.2)$$



$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=\xi} - \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x=\xi} = -\rho_2 r \frac{d\xi}{dt}, \quad (3.3)$$

где  $r$  - теплота плавления вещества;  $\xi$  - граница раздела фаз,

$$T_1 = T_2 = T_{кр} \text{ при } x = \xi; \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x=R} = 0; \quad (3.5)$$

$$T_1 \Big|_{x=0} = T_{об}, \quad (3.6)$$

$$q_{вещ} = \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=0}, \quad (3.7)$$

где  $R$  - толщина слоя вещества;  $T_{кр}$  - температура плавления вещества.

Решение системы дифференциальных уравнений (3.1)-(3.7) осуществлено с использованием приближенного метода Лейбензона Л.С. [1, 179]. Данный метод состоит в подборе функций изменения температуры в фазах рабочего вещества, которые бы удовлетворяли краевым условиям задачи. Подобранные таким образом зависимости подставляются в условие сопряжения на границе раздела фаз, полученное в итоге подстановки функций дифференциальное уравнение решается относительно координаты границы раздела фаз и температуры оболочки прибора. Для исследуемого случая функции температур в фазах рабочего агента представляют собой полиномиальные зависимости [2]:

$$T_1 = T_{кр} + (T_{об} - T_{кр}) \cdot \left( \frac{\xi - x}{\xi} \right)^{n_2} \quad (3.8)$$

$$0 \leq x \leq \xi$$

$$T_2 = T_{2R} + (T_{кр} - T_{2R}) \cdot \left( \frac{R - x}{R - \xi} \right)^{n_1}, \quad (3.9)$$

$$\xi \leq x \leq R$$

$$T_{2R} = T_{2R0} + (T_{кр} - T_{2R0}) \frac{\xi - \xi_0}{R - \xi_0},$$

где  $T_{2R}$ ,  $T_{2R0}$  - температуры при  $x = R$  для любого  $\tau$  и при  $\tau = \tau_0$ ,  $\xi_0$  – толщина жидкой фазы при  $\tau = \tau_0$ ;  $\tau_0$  – промежуток времени, начиная с которого изменение температуры  $T_{2R}$  во времени линейно;  $n_1$ ,  $n_2$  - экспериментально определяемые показатели степени [86].

Проинтегрируем уравнение (3.2) по  $x$  в соответствии с [62] и, воспользовавшись соотношением (3.3) и условием (3.4), исключим из уравнения удельные тепловые потоки границе раздела твердой и жидкой фазы:

$$c_1 \rho_1 \int_0^{\xi} \frac{dT_1}{d\tau} dx + c_2 \rho_2 \int_{\xi}^R \frac{dT_2}{d\tau} dx = -\lambda_1 \left. \frac{dT_1}{dx} \right|_{x=0} - r \rho_2 \frac{d\xi}{d\tau} \quad (3.10)$$

Учитывая, что значения показателей степени  $n_1$  и  $n_2$  в интересующем нас промежутке времени равны единице [2], после подстановки и интегрирования соотношений для переменных  $T_1$  и  $T_2$  в уравнение (3.10), получим систему дифференциальных уравнений, описывающих теплообмен при плавлении вещества, в окончательном виде:

$$\frac{dT_{об}}{d\tau} = \frac{1}{(c\rho\delta)_{об}} \left[ q_{PЭА} + k_{ср} (T_{кр} - T_{об}) + \frac{\lambda_1}{\xi} (T_{кр} - T_{об}) \right], \quad (3.11)$$

$$\frac{d\xi}{d\tau} = \frac{\frac{1}{2} c_1 \rho_1 \xi \frac{dT_{об}}{d\tau} + \frac{\lambda_1}{\xi} (T_{кр} - T_{об})}{c_1 \rho_1 \left( \frac{1}{2} T_{кр} - T_{об} \right) - c_2 \rho_2 (T_{кр} - T_{2R0}) \frac{\xi - R}{\xi_0 - R} - \rho_2 r}. \quad (3.12)$$

Для теплоотводящих устройств, отличающихся малой толщиной оболочки емкости и при условии, что элементы РЭА имеют незначительной массу, теплом, идущим на нагрев оболочки без особого ущерба для точности модели, можно пренебречь по сравнению с теплоаккумулирующей способностью рабочего вещества, т. е. допустить, что  $(c\rho\delta)_{об} \rightarrow 0$ .

В этом случае расчет сводится к определению координаты раздела границы твердой и жидкой фазы во времени, при этом уравнение теплового баланса для оболочки емкости записывается в виде

$$T_{об} = \frac{q_{РЭА} + k_{ср} T_{ср} + \frac{\lambda_1}{\xi} T_{кр}}{\frac{\lambda_1}{\xi} + k_{ср}}. \quad (3.13)$$

Когда на поверхности емкости с веществом поддерживается постоянный тепловой поток и она адиабатически изолирована от окружающей среды, формула (3.13) может быть заменена выражением

$$T_{об} = \frac{q_{РЭА} \xi + \lambda_1 T_{кр}}{\lambda_1}. \quad (3.14)$$

При подстановке производной температуры оболочки по времени  $\frac{dT_{об}}{d\tau}$  из соотношения (3.14) в (3.12) получено обыкновенное дифференциальное уравнение с разделяющимися переменными. В результате интегрирования для начальных условий  $\xi = \xi_0$  и  $\tau = \tau_0$ , запишем:

$$\tau - \tau_0 = \frac{\left\{ (\xi - \xi_0) [(\xi_0 - R)M_1 - 2M_2(T_{кр} + T_{2R0})] + (\xi^2 - \xi_{00}^2) \left[ \frac{M_2}{R} (T_{кр} - T_{2R0}) + M_3 q_{РЭА} \right] \right\}}{M_4 q_{РЭА}}. \quad (3.15)$$

Из (3.15) можно определить полное время плавления вещества:

$$\tau = \tau_0 + \frac{\left\{ (R - \xi_0) [(\xi_0 - R)M_1 - 2M_2(T_{кр} + T_{2R0})] + (R^2 - \xi_{00}^2) \left[ \frac{M_2}{R} (T_{кр} - T_{2R0}) + M_3 q_{РЭА} \right] \right\}}{M_4 q_{РЭА}}, \quad (3.16)$$

где  $M_1 = c_1 \rho_1 \lambda_1 T_{кр} + 2\rho_2 r \lambda_1$ ,  $M_2 = c_2 \rho_2 \lambda_1 R$ ,  $M_3 = \frac{3}{2} c_1 \rho_1 (\xi_0 - R)$ ,  
 $M_4 = 2\lambda_1 (\xi_0 - R)$ .

Результаты расчета по рассмотренной модели для охлаждающего устройства представлены на рисунках 3.3-3.8. Приведены зависимости изменения температуры оболочки емкости от времени при плавлении рабочего агента, а также координаты границы раздела его фаз от времени при различных тепловых мощностях элемента РЭА (рисунки 3.3-3.4), типах аккумуля-

торов (рисунки 3.6-3.7), продолжительности полного проплавления рабочего вещества от мощности РЭА (рисунок 3.8). На рисунке 3.5 показано для сравнения изменение во времени температуры оболочки емкости охлаждающего устройства при использовании плавящегося вещества и радиаторной системы с естественным теплообменом с окружающей средой.

Расчет произведен при следующих исходных данных [67]: рабочие вещества – парафин ( $\rho_1=760$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_2=780$  кг/м<sup>3</sup>,  $c_1=2680$  Дж/кг·К,  $c_2=2350$  Дж/кг·К,  $\lambda=0,27$  Вт/м·К,  $r=156 \cdot 10^3$  Дж/кг,  $T_{кр}=313$  К), пальмитиновая кислота ( $\rho_1=845$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_2=855$  кг/м<sup>3</sup>,  $c_1=2730$  Дж/кг·К,  $c_2=1800$  Дж/кг·К,  $\lambda=0,17$  Вт/м·К,  $r=214 \cdot 10^3$  Дж/кг,  $T_{кр}=336$  К), элаидиновая кислота ( $\rho_1=850$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_2=860$  кг/м<sup>3</sup>,  $c_1=2180$  Дж/кг·К,  $c_2=1550$  Дж/кг·К,  $\lambda=0,16$  Вт/м·К,  $r=214 \cdot 10^3$  Дж/кг,  $T_{кр}=318$  К), азотнокислый никель ( $\rho_1=1980$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_2=2050$  кг/м<sup>3</sup>,  $c_1=2140$  Дж/кг·К,  $c_2=1800$  Дж/кг·К,  $\lambda=0,56$  Вт/м·К,  $r=155 \cdot 10^3$  Дж/кг,  $T_{кр}=329,7$  К),  $k_{ср}=10$  Вт/К·м<sup>2</sup>,  $T_{ср}=293$  К, (за исключением случаев, когда величина  $k_{ср}$  указана в подрисуночной надписи на рисунка с графиками),  $\xi_0=0,002$  м;  $\tau_0=20$  с.

Результаты расчетов показывают, что температура оболочки устройства и длительность плавления рабочего вещества зависят от величины  $q_{РЭА}$ , типа рабочего агента, а также характера теплообмена с окружающей средой. При отсутствии конвекции в жидкой фазе процесс теплообмена представляет собой нестационарный процесс теплопроводности, при котором температура оболочки емкости постоянно увеличивается. Ее скорость роста зависит от теплоты рассеяния элемента РЭА, толщины слоя рабочего вещества и его теплопроводности.

Установлено, что увеличение  $q_{РЭА}$  значительно повышает температуру оболочки системы и элемента РЭА, а также скорость плавления вещества (так согласно рисункам 3.3-3.4, после 1,5 часа работы элемента РЭА при изменении мощности тепловыделений с 1000 до 3000 Вт/м<sup>2</sup> температура оболочки прибора увеличивается с 317 до 367 К, а скорость плавления повышается с  $10^{-6}$  м/с до  $3,7 \cdot 10^{-6}$  м/с). Рост температуры оболочки системы связан, в

том числе, с увеличением теплового сопротивления жидкой фазы наполнителя, которое возрастает с толщиной расплавленного слоя.

Значительное влияние на температуру элемента РЭА в процессе его функционирования будет оказывать подбор рабочего вещества. Были произведены расчеты для случая использования в качестве него парафина, азотно-кислого никеля и элаидиновой кислоты (рисунки 3.6-3.7). В соответствие с результатами исследований, лучшим рабочим агентом можно считать азотно-кислый никель. Согласно расчетам при использовании в качестве наполнителя данного наполнителя температура оболочки устройства наиболее стабильная, а скорость плавления наименьшая. Это связано с более высокой теплопроводностью азотнокислого никеля, которая примерно в два раза превышает данный показатель парафина и в три раза элаидиновой кислоты. Из данного обстоятельства следует сделать вывод, что снижение скорости роста температуры элемента РЭА можно достичь за счет увеличения эффективной теплопроводности используемого рабочего вещества.

Так как системы охлаждения с тепловыми аккумуляторами проектируются из условия, чтобы к концу цикла работы не превысить допустимую температуру наиболее чувствительных к ней элементов РЭА, то и величина эффективной теплопроводности и, соответственно тип рабочего агента, выбираются также из этого условия. Т.е. наиболее рациональным является подбор тепловых аккумуляторов, имеющих наибольшее значение коэффициента теплопроводности. Для органических же веществ, обладающих относительно невысокой теплопроводностью, может быть рекомендовано использование в объеме емкости прибора различных наполнителей, таких как сотовые и пористые структуры из высокотеплопроводных материалов, оребрения, увеличивающих эффективную теплопроводность рабочих агентов.

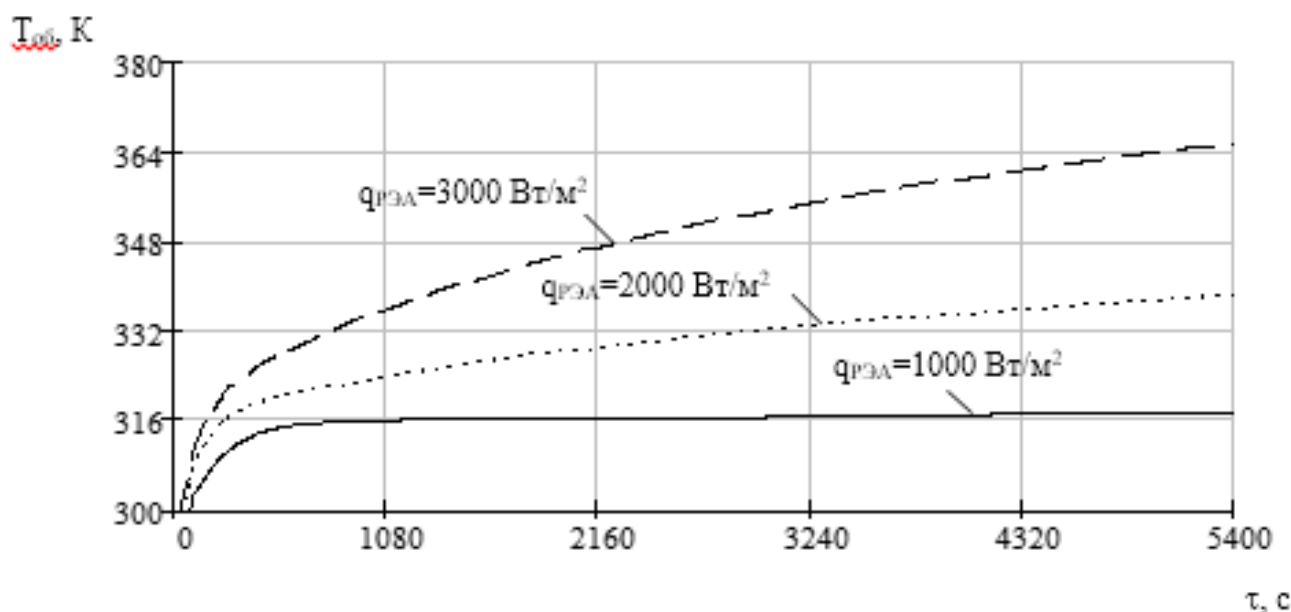


Рисунок 3.3 - Зависимость температуры оболочки от времени при плавлении вещества (вещество – парафин)  $(ср\delta)_{об} = 2,1 \cdot 10^3$  Дж/( $м^2 \cdot K$ );  $R = 0,02$  м.

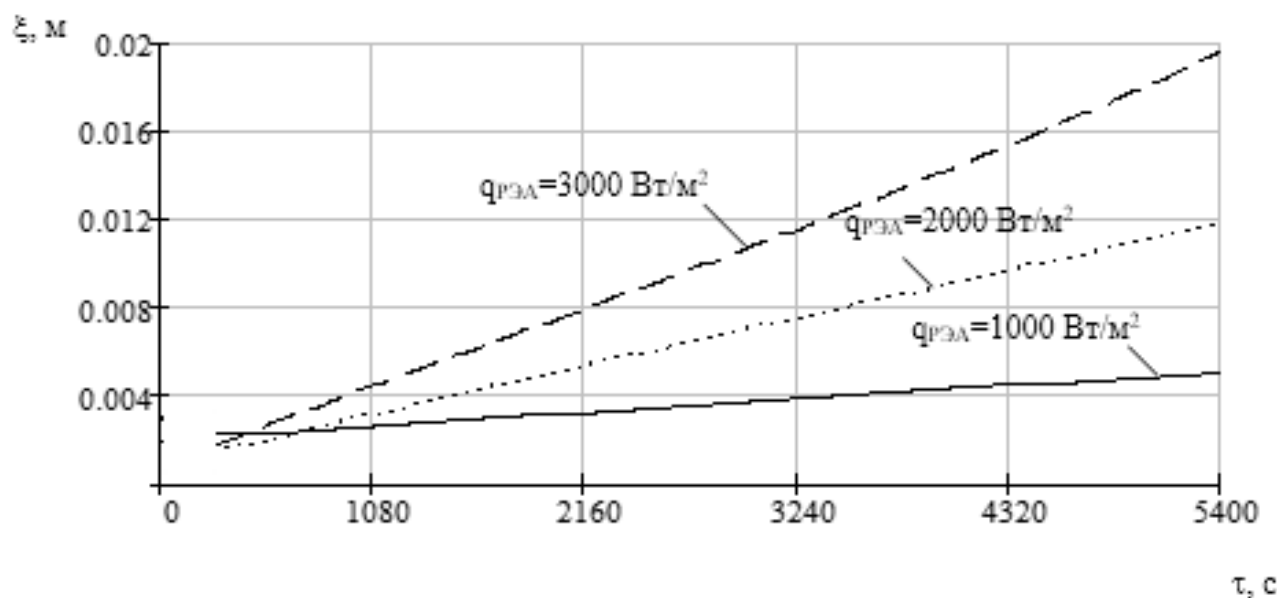


Рисунок 3.4 - Зависимость координаты раздела фаз от времени при плавлении вещества (вещество – парафин)  $(ср\delta)_{об} = 2,1 \cdot 10^3$  Дж/( $м^2 \cdot K$ );  $R = 0,02$  м.

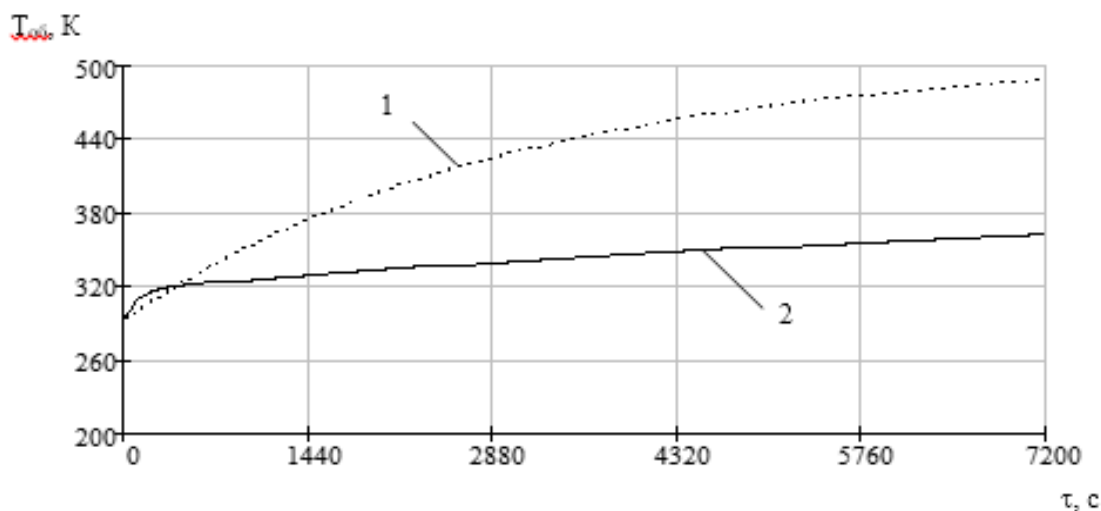


Рисунок 3.5 - Зависимость температуры оболочки от времени при плавлении вещества (вещество – парафин)  $(\text{ср}\delta)_{\text{об}}=2,1 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $R=0,02 \text{ м}$ ,  $q_{\text{РЭА}}=1500 \text{ Вт}/\text{м}^2$ .

- 1- использование естественного воздушного охлаждения с  $k_{\text{ср}}=7 \text{ Вт}/\text{м} \cdot \text{К}$ ,
- 2- использование системы охлаждения с рабочим веществом – азотнокислым никелем.

На рисунке 3.8 представлены графики зависимости изменения времени полного плавления различных рабочих наполнителей от мощности рассеяния элементов РЭА, что соответствует продолжительности их надежной работы. Из исследованных веществ наибольшую продолжительность процесса плавления в диапазоне удельных мощностей рассеяния от 1000 до 5000 Вт/м<sup>2</sup> имеет пальмитиновая кислота, что связано ее более высокой теплотой и температурой плавления. Однако, как следует из изображенных на рисунке 3.8 кривых, с повышением  $q_{\text{РЭА}}$  длительность полного проплавления вещества – пальмитиновой кислоты приближается к времени плавления азотнокислого никеля (при  $q_{\text{РЭА}}=5000 \text{ Вт}/\text{м}^2$  они практически одинаковы). Очевидно, что при более высоких  $q_{\text{РЭА}}$ , дольше всего будет плавиться азотнокислый никель, обладающий в данном контексту лучшими теплофизическими характеристиками.

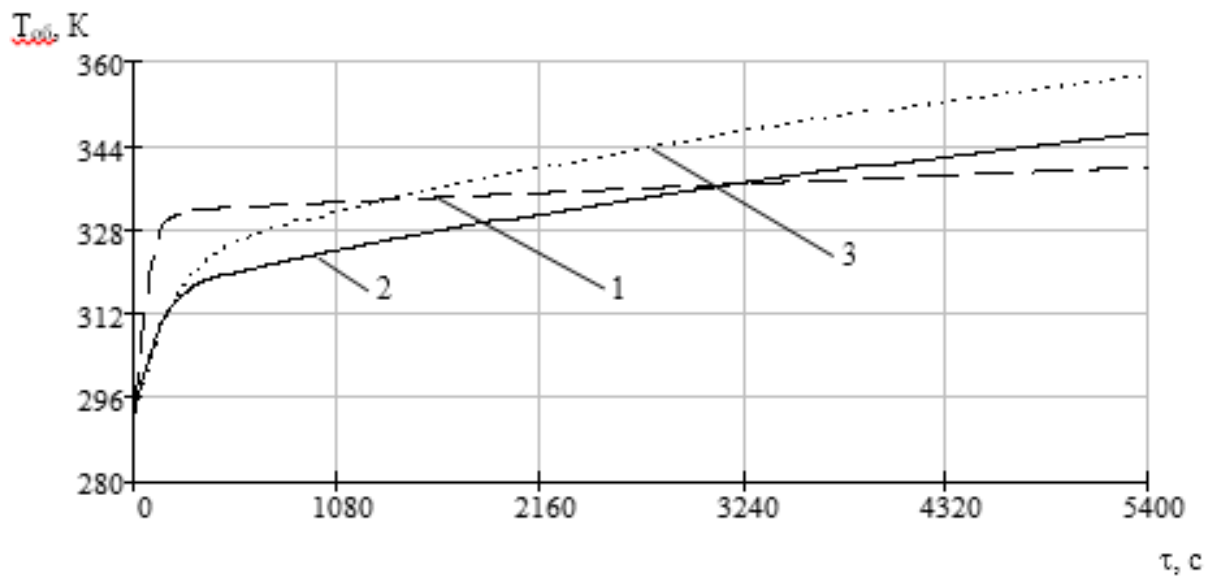


Рисунок 3.6 - Зависимость температуры оболочки от времени при плавлении различных веществ  $(\overline{c\delta})_{об} = 2,5 \cdot 10^3$  Дж/(м<sup>2</sup>·К);  $R=0,02$  м,  $q_{рэд}=1500$  Вт/м<sup>2</sup>.  
 1 – азотнокислый никель, 2 – парафин, 3 – аскорбиновая кислота.

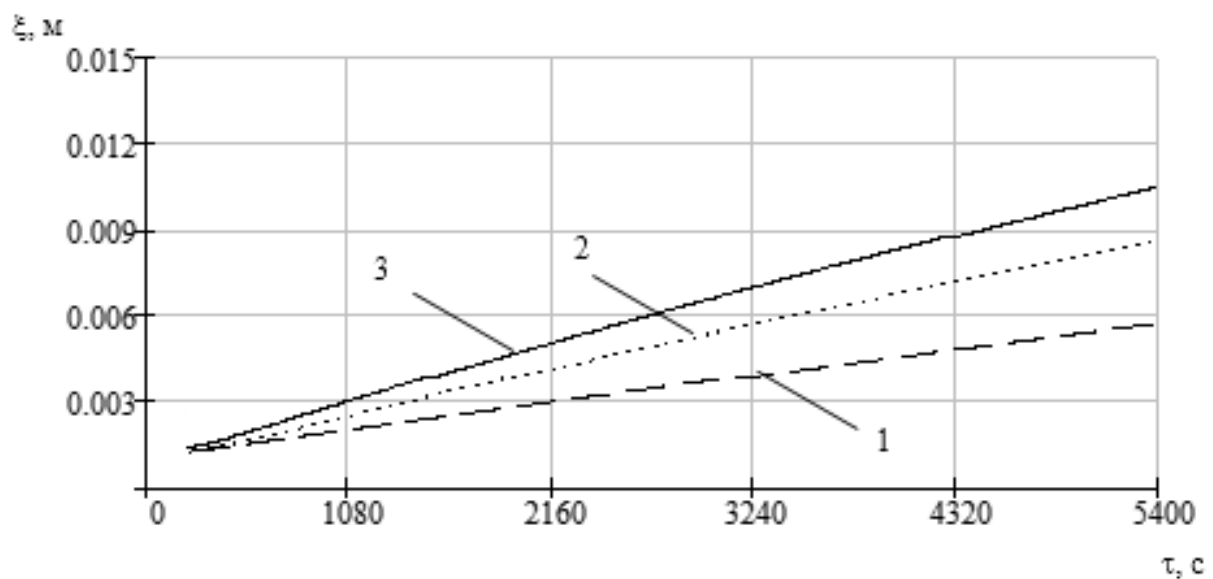


Рисунок 3.7 - Зависимость координаты раздела фаз от времени при плавлении различных веществ  $(\overline{c\delta})_{об} = 2,5 \cdot 10^3$  Дж/(м<sup>2</sup>·К);  $R=0,02$  м,  $q_{рэд}=1500$  Вт/м<sup>2</sup>.  
 1 – азотнокислый никель, 2 – парафин, 3 – аскорбиновая кислота.



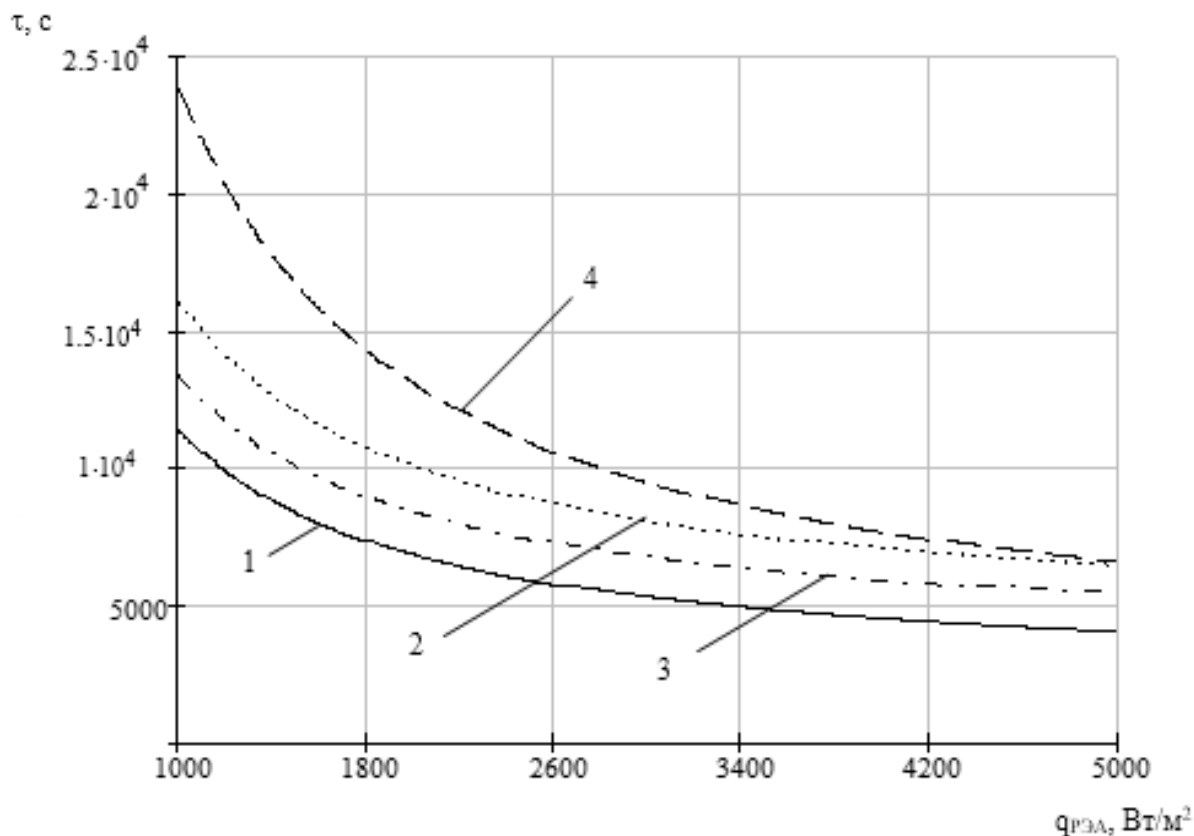


Рисунок 3.8 - Зависимость времени полного плавления различных веществ от мощности тепловыделений элемента РЭА, приходящихся на единицу площади  $(\text{ср}\delta)_{\text{об}} = 2,5 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $R=0,02 \text{ м}$ .  
 1 – парафин, 2 – азотнокислый никель, 3 – элаидиновая кислота, 4 – пальмитиновая кислота

### 3.1.2 Моделирование работы охлаждающей системы и исследование процессов теплообмена при затвердевании рабочих веществ

При исследовании охлаждения и затвердевания рабочих веществ справедливы те же допущения, что и для процесса плавления.

Расчетная схема процесса теплообмена при затвердевании, соответствующая «паузе» в работе элемента РЭА, приведена на рисунке 3.9.

В результате затвердевания рабочего вещества между ним и оболочкой емкости может образоваться зазор, обладающий дополнительным тепловым сопротивлением, что является весьма нежелательным.

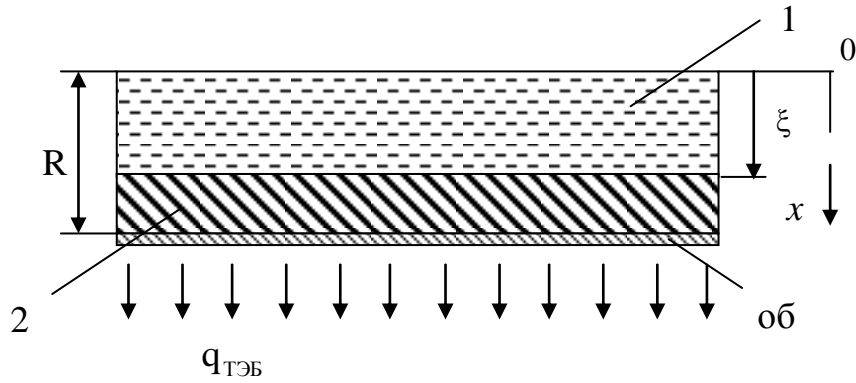


Рисунок 3.9 - Расчетная схема процесса затвердевания рабочего вещества

Теплообмен на оболочке охлаждающей системы при затвердевании вещества описывается уравнением [61]

$$(c\rho\delta)_{об} \frac{dT_{об}}{d\tau} = -q_{ТЭБ} + k_{cp}(T_{cp} - T_{об}) + \lambda_2 \left. \frac{\partial T_2}{\partial x} \right|_{x=0}. \quad (3.17)$$

Условие равенства температур оболочки и соприкасающейся поверхности вещества описывается следующим выражением:

$$\lambda_2 \left. \frac{\partial T_2}{\partial x} \right|_{x=0} = k_{20}(T_2|_{x=0} - T_{об}), \quad (3.18)$$

где  $k_{20}$  - коэффициент теплопередачи между оболочкой устройства и рабочим веществом с учетом конвективной и лучистой составляющих (определяется экспериментально).

В уравнении (3.4) индекс 2 заменяется на 1, в уравнении (3.3) вместо  $\rho_2$  подставляется  $\rho_1$ .

Для решения задачи составлено следующее интегральное равенство:

$$\left[ \rho_1 r - c_2 \rho_2 \int_0^\xi \frac{dT_2}{d\xi} dx - c_1 \rho_1 \int_\xi^R \frac{dT_1}{d\xi} dx \right] \frac{d\xi}{d\tau} = \lambda_2 \left. \frac{dT_2}{dx} \right|_{x=0} \quad (3.19)$$

Поля температур в твердой и жидкой фазах вещества описываются выражениями

$$T_2 = T_{кр} + (T_2|_{x=0} - T_{кр}) \cdot \left( \frac{\xi - x}{\xi} \right)^{n/2}, \quad (3.20)$$

$$0 \leq x \leq \xi$$

$$T_1 = T_{1R} + (T_{кр} - T_{1R}) \cdot \left( \frac{R - x}{R - \xi} \right)^{n_1'} , \quad (3.21)$$

$$\xi \leq x \leq R$$

$$T_{1R} = T_{1R0} + (T_{кр} - T_{1R0}) \frac{\xi - \xi_0}{R - \xi_0} ,$$

В результате аналогичных с п.3.1.1 преобразований окончательная система дифференциальных уравнений, описывающая теплообмен при затвердевании наполнителя, имеет вид:

$$\frac{dT_{об}}{d\tau} = \frac{1}{(c\rho\delta)_{об}} \left[ -q_{ТЭБ} + k_{cp}(T_{cp} - T_{об}) + \frac{\lambda_2 n_2' (T_{кр} - T_{об})}{\xi + \zeta} \right] , \quad (3.22)$$

$$\frac{d\xi}{d\tau} = \frac{\frac{\lambda_2 n_2'}{\xi + \zeta} (T_{кр} - T_{об}) + \frac{c_2 \rho_2 \xi^2}{(\xi + \zeta)(n_2' + 1)(c\rho\delta)_{об}} \left[ -q_{ТЭБ} + k_{cp}(T_{cp} - T_{об}) + \frac{\lambda_2 n_2'}{\xi + \zeta} (T_{кр} - T_{об}) \right]}{\rho_1 r + \frac{c_2 \rho_2 (T_{кр} - T_{об})(\xi^2 + 2\zeta\xi)}{(n_2' + 1)(\xi + \zeta^2)} - c_1 \rho_1 (T_{кр} - T_{1R0}) \frac{R - \xi}{R - \xi_0} \frac{2n_1'}{n_1' + 1}} , \quad (3.23)$$

где  $\zeta = \frac{\lambda_2 n_2'}{k_{20}}$

При идеальном контакте оболочки с рабочим агентом ( $T_{об} = T_2|_{x=0}$ ) при  $n_1' = n_2' = 1$  выражения (3.22)-(3.23) могут быть переписаны в виде:

$$\frac{dT_{об}}{d\tau} = \frac{1}{(c\rho\delta)_{об}} \left[ -q_{ТЭБ} + k_{cp}(T_{cp} - T_{об}) + \frac{\lambda_2 (T_{кр} - T_{об})}{\xi} \right] , \quad (3.24)$$

$$\frac{d\xi}{d\tau} = \frac{\lambda_2 (T_{кр} - T_{об})}{\rho_1 r - \frac{1}{2} c_2 \rho_2 (T_{об} - T_{кр}) - c_1 \rho_1 (T_{1R0} - T_{кр}) \frac{R - \xi}{\xi_0 - R}} . \quad (3.25)$$

Результаты вычислений выражений (3.22)-(3.23) и (3.24)-(3.25) численным методом конечных разностей [154], реализованным в пакете прикладных программ MathCad приведены на рисунках 3.10-3.15.

На рисунках 3.12-3.15 изображены кривые изменения температуры оболочки охлаждающего прибора со стороны ее контакта с ТЭБ и границы раздела фаз при затвердевании вещества в случае различных мощностей термобатареи, а также при естественном остывании агента за счет теплообмена с окружающей средой.

При исследовании теплофизических процессов, связанных с затвердеванием рабочего вещества, установлено, что продолжительность остывания рабочего агента и оболочки системы в случае применения ТЭБ существенно меньше их времени остывания при естественном теплообмене с окружающей средой (для парафина это отношение составило 2 раза при условии, что  $q_{\text{ТЭБ}} = 2000 \text{ Вт/м}^2$ , а  $k_{\text{ср}} = 10 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ ). Из этого следует, что использование для интенсификации процесса охлаждения и затвердевания рабочего агента ТЭБ позволит снять существующие ограничения в отношении продолжительности цикла работы элемента РЭА и времени перерыва между его включениями. Таким образом, если в случае естественного теплообмена прибора с окружающей средой период работы элемента РЭА должен был бы быть значительно меньше «паузы», то при использовании ТЭБ время между двумя последовательными циклами работы РЭА может быть существенно уменьшено. При этом для исследованных случаев быстрее всего процесс остывания и затвердевания вещества проходит при использовании в качестве наполнителей азотнокислого никеля и парафина (рисунки 3.14-3.15). Первого – за счет более высокого коэффициента теплопроводности, второго – за счет наименьшей теплоты и температуры плавления.

Для повышения точности расчетов теплообмена при плавлении и затвердевании веществ в емкости может быть использован принцип сложения скоростей, изложенный в [2]. С помощью данного метода точность вычислений может быть повышена за счет учета форм и размеров емкости с рабочим агентом.

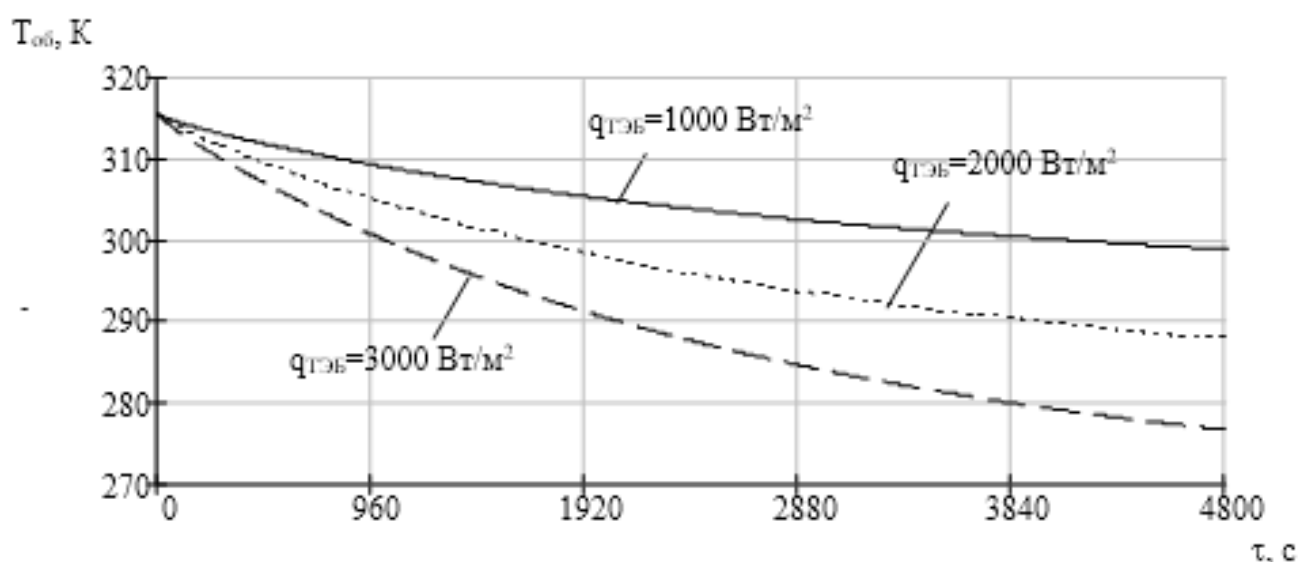


Рисунок 3.10 - Зависимость температуры оболочки от времени при за-  
твердевании вещества (вещество – парафин)  $(\overline{с\delta})_{об} = 6,5 \cdot 10^3$   
 $Дж/(м^2 \cdot К)$ ;  $R = 0,025$  м.

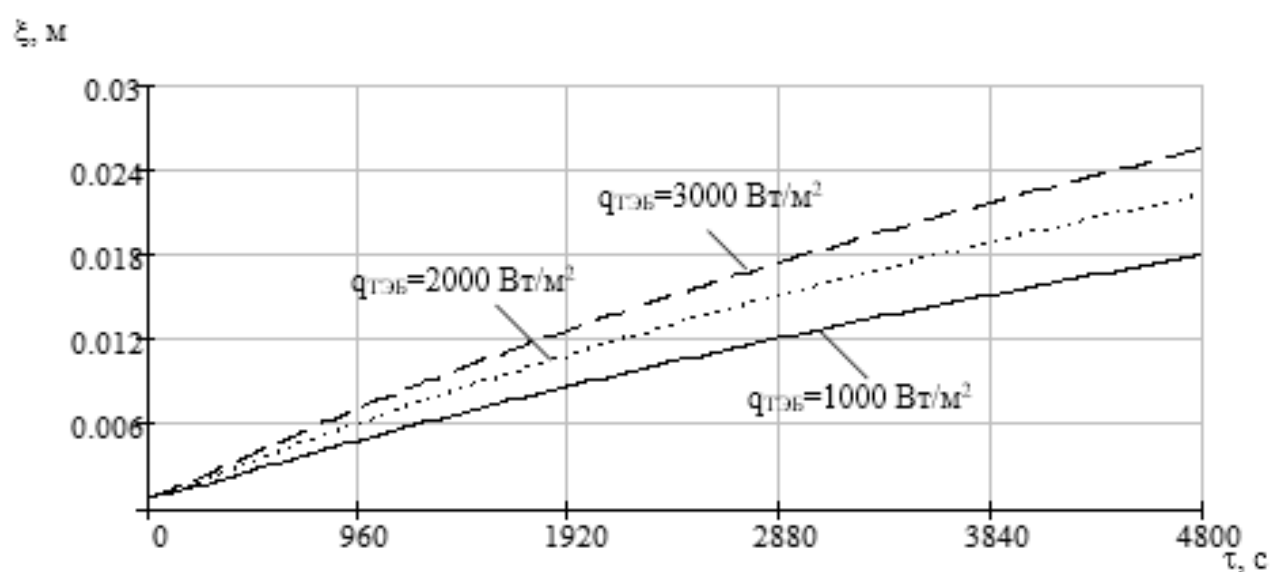


Рисунок 3.11 - Зависимость координаты раздела фаз от времени при за-  
твердевании вещества (вещество – парафин)  $(\overline{с\delta})_{об} = 6,5 \cdot 10^3$   
 $Дж/(м^2 \cdot К)$ ;  $R = 0,025$  м.

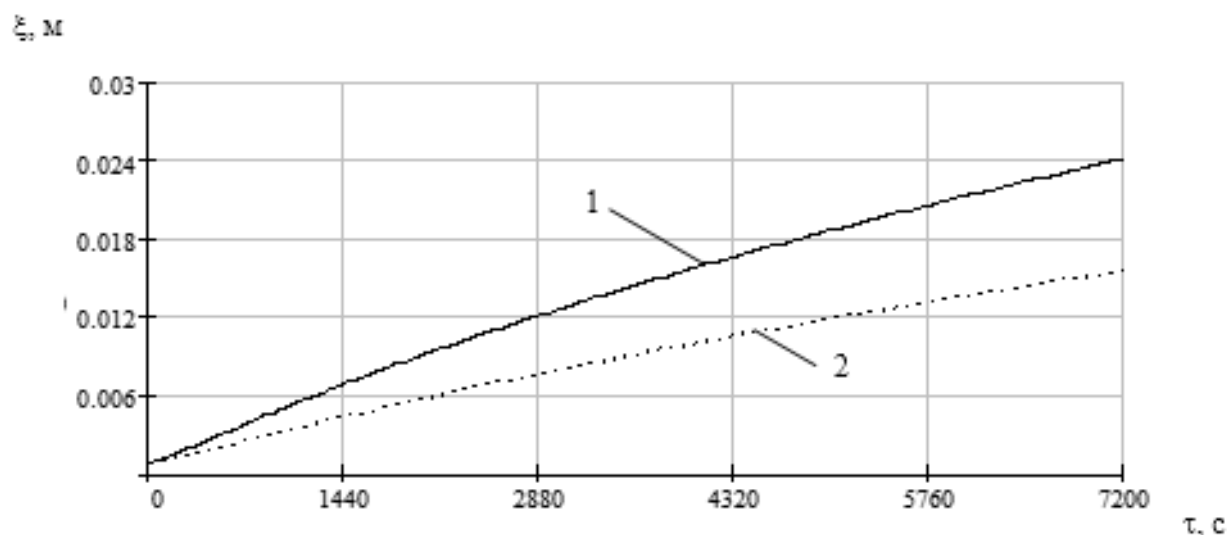


Рисунок 3.12 - Зависимость координаты раздела фаз от времени при затвердевании вещества (вещество – парафин)  $(\text{ср}\delta)_{\text{ср}}=6,5 \cdot 10^3$  Дж/(м<sup>2</sup>·К);  $R=0,025$  м.  
 1 – при использовании ТЭБ с 2000 Вт/м<sup>2</sup>  
 2 – при использовании естественного воздушного охлаждения за счет теплообмена с окружающей средой ( $k_{\text{ср}}=10$  Вт/м<sup>2</sup>·К)

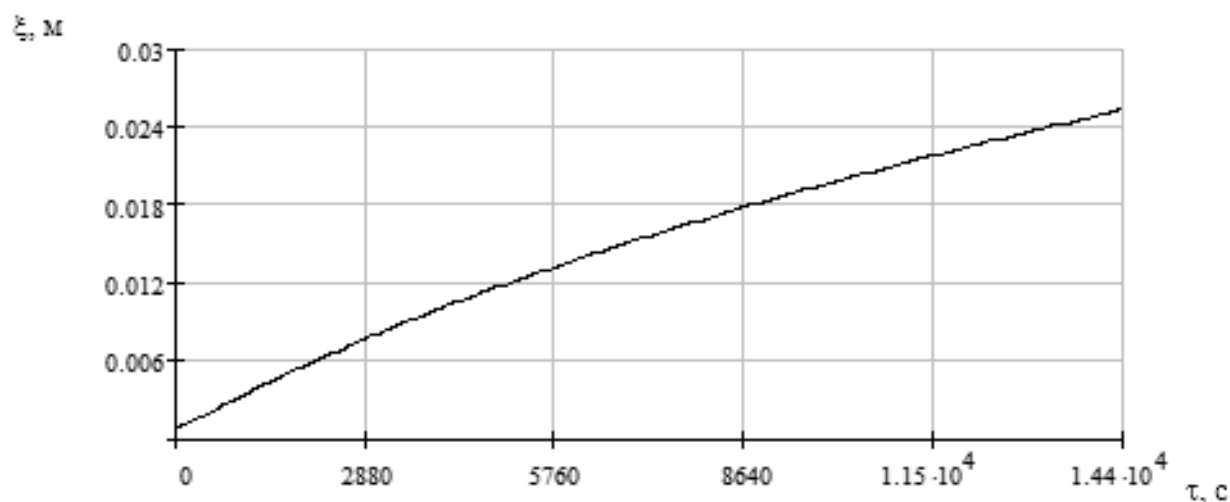


Рисунок 3.13 - Зависимость координаты раздела фаз от времени при затвердевании вещества (вещество – парафин) при использовании естественного воздушного охлаждения за счет теплообмена с окружающей средой  $(\text{ср}\delta)_{\text{ср}}=6,5 \cdot 10^3$  Дж/(м<sup>2</sup>·К);  $R=0,025$  м, ( $k_{\text{ср}}=10$  Вт/м<sup>2</sup>·К)

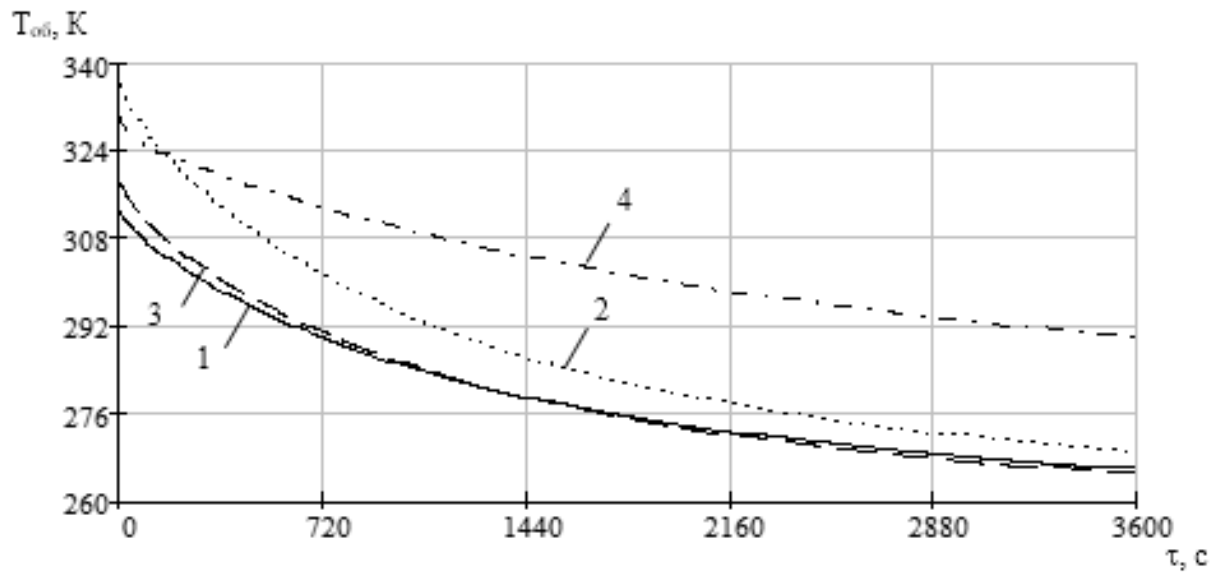


Рисунок 3.14 - Зависимость температуры оболочки от времени при затвердевании различных наполнителей  $(\text{ср}\delta)_{\text{об}}=2,1 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $R=0,02 \text{ м}$ ,  $q_{\text{ТЭВ}}=1500 \text{ Вт}/\text{м}^2$ .

1 – парафин, 2 – пальмитиновая кислота, 3 – элаидиновая кислота, 4 – азотнокислый никель

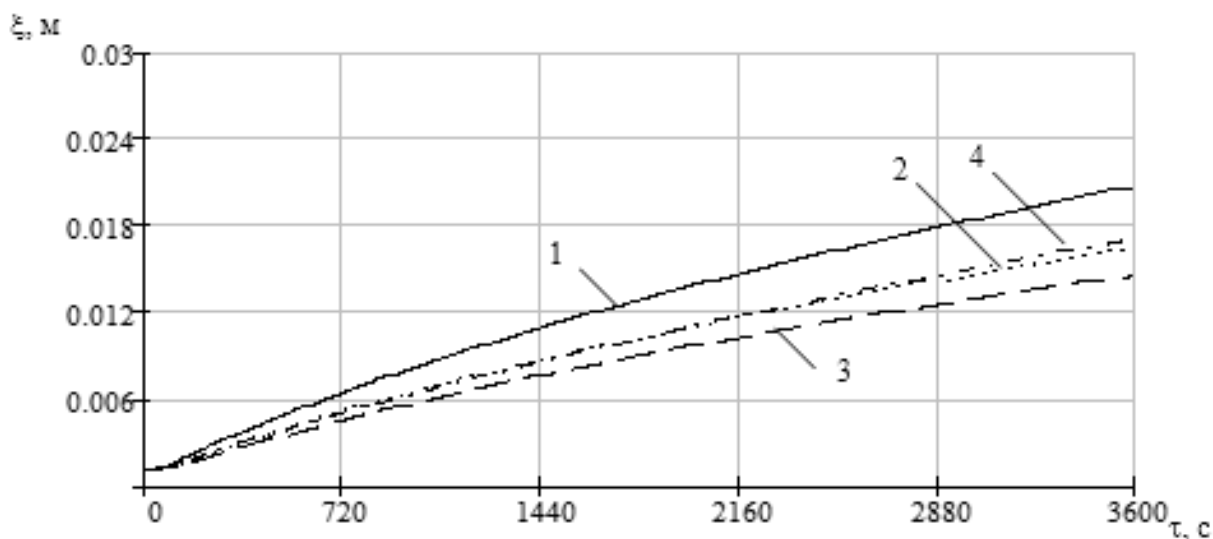


Рисунок 3.15 - Зависимость координаты раздела фаз от времени при затвердевании различных наполнителей  $(\text{ср}\delta)_{\text{об}}=2,1 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $R=0,02 \text{ м}$ ,  $q_{\text{ТЭВ}}=1500 \text{ Вт}/\text{м}^2$ .

1 – парафин, 2 – пальмитиновая кислота, 3 – элаидиновая кислота, 4 – азотнокислый никель

## **3.2 Математическая модель системы неравномерного охлаждения электронных плат при использовании плавящихся рабочих веществ**

### **3.2.1 Температурное поле электронной платы**

Одними из базовых элементов современной радиотехнической аппаратуры являются электронные платы [13], которые в зависимости от технологических особенностей коммутационной разводки делятся на односторонние, двусторонние и многослойные. Основной особенностью электронных плат является распределение по их площади тепловыделяющих элементов различной мощности. В данных условиях температурное поле такой конструкции будет существенно неравномерным.

Для обеспечения требуемых температурных условий эксплуатации такой аппаратуры ее равномерное охлаждение, при котором все тепловыделяющие элементы будут охлаждаться с одинаковой интенсивностью, является не целесообразным. Более эффективным необходимо признать неравномерный метод отвода теплоты от ее элементов. В случае его реализации элементы электронной платы с большей теплотой рассеяния будут охлаждаться с высокой интенсивностью, а элементы с меньшим уровнем тепловыделений – с меньшей интенсивностью.

Разработана охлаждающая система [71], структурная схема которой представлена на рисунке 3.16, в которой совместно использованы ТЭБ и плавящиеся тепловые аккумуляторы. В данной схеме применены однокаскадные ТЭБ 1, размещаемые в местах расположения элементов РЭА 2, наиболее критичных к температурному режиму работы или требующих существенного снижения температуры для наиболее полной воспроизводимости своих характеристик. ТЭБ устанавливаются в углублениях на поверхности емкости 3, выполненной из высокотеплопроводного материала (например, меди или алюминия), заполненной рабочим агентом, имеющим большое значение теплоты



плавления и температуру плавления, находящуюся в диапазоне от 35 до 65°C, контактирующей с остальной частью электронной платы 4. Теплоотводящая система проста в изготовлении, предусматривает возможность согласования режимов работы отдельно взятых ТЭБ.

Основной задачей разработчика при проектировании указанной системы охлаждения для конкретного типа электронной платы является оптимизация ее температурного поля.

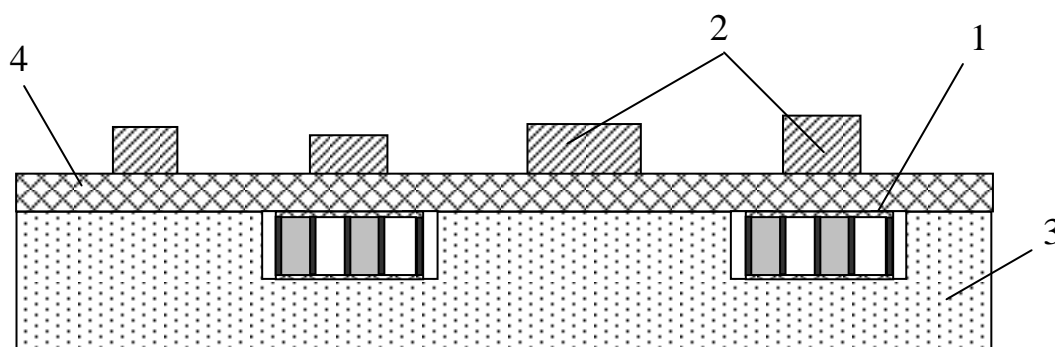


Рисунок 3.16 - Схема охлаждения электронной платы при совместном использовании плавящихся рабочих веществ и ТЭБ (1 - электронная плата, 2 - радиоэлементы, 3 - ТЭБ, 4 - емкость с плавящимся рабочим веществом)

Исследование тепловых режимов РЭА и отдельных элементов приводит к необходимости анализа температурного поля параллелепипеда и пластины с дискретными источниками энергии [44, 53]. Например, РЭА кассетной конструкции с плотной компоновкой рассматривается как анизотропный параллелепипед, источники энергии в котором распределены равномерно по объему тела или дискретно в виде ступеньки (рисунок 3.17.).

Анализ температурного поля электронной платы с элементами на общем теплоотводе проводится на модели пластины с дискретным источником энергии (рисунок 3.18). Обычно решение такой задачи весьма громоздко,

поэтому прибегают к применению различных приближенных методов и последующему графоаналитическому представлению результатов.

Довольно часто в настоящее время для описания дискретных источников энергии используется метод представления их в виде ступенчатых функций [44].

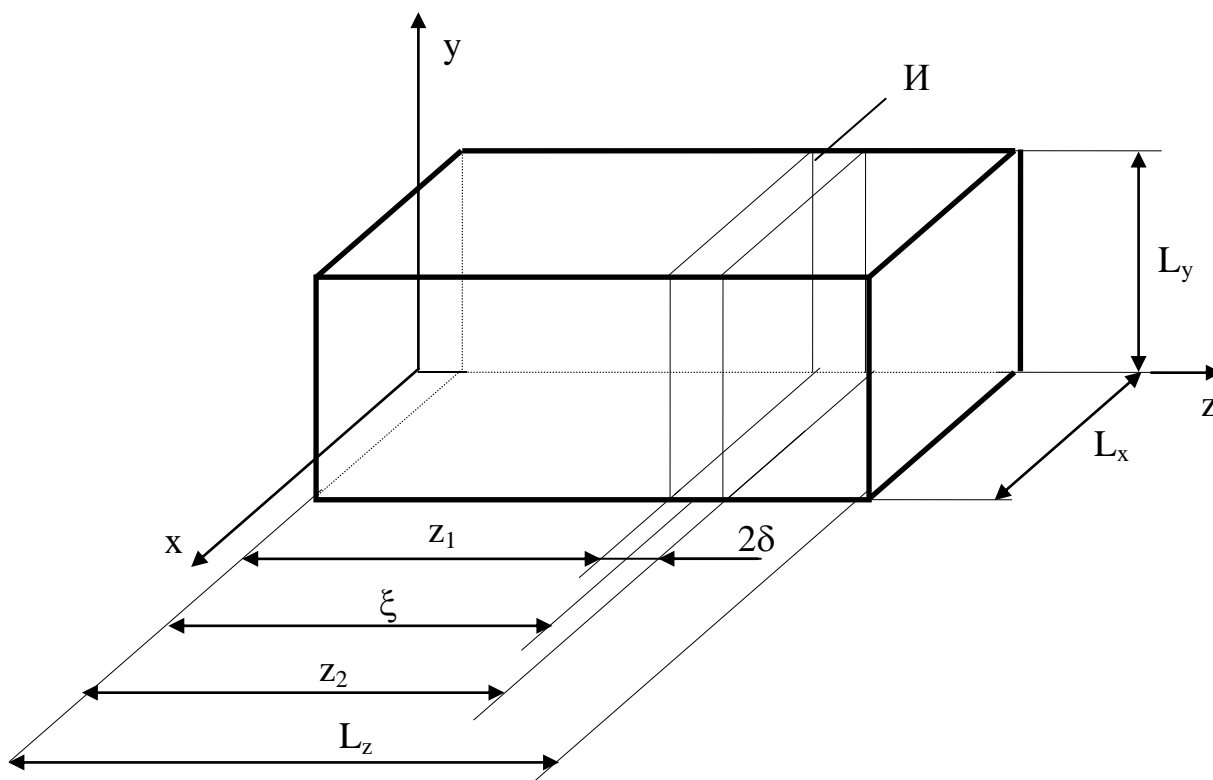


Рисунок 3.17 - Параллелепипед с дискретным источником энергии

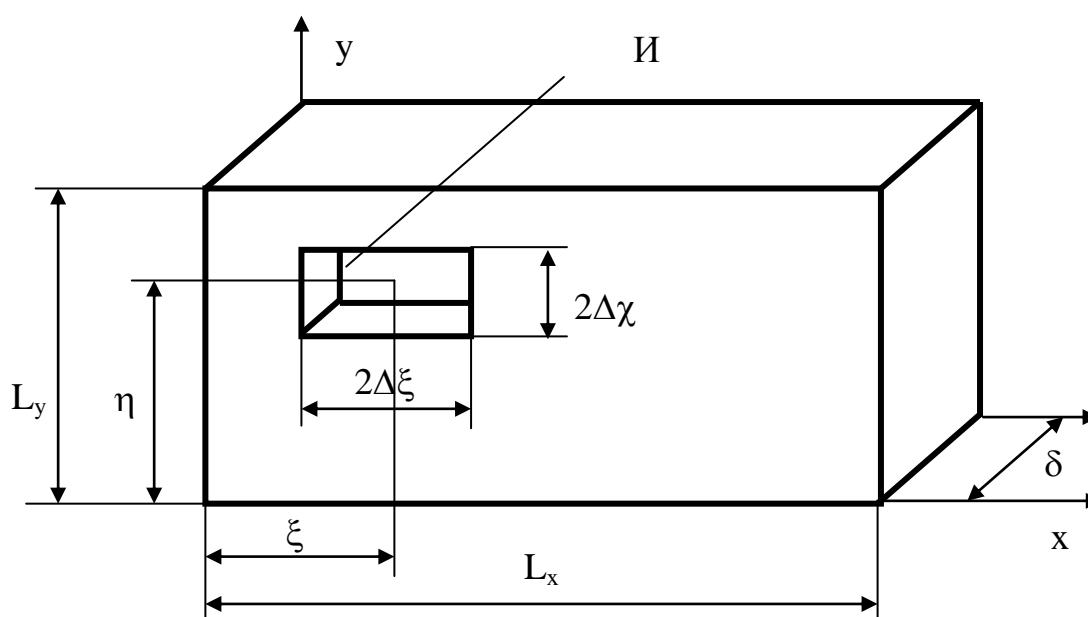


Рисунок 3.18 - Пластина с дискретным источником энергии

Пусть, например, в параллелепипеде имеется дискретный источник энергии, занимающий область «И» в форме ступеньки; внутри этой области объемная плотность теплового потока  $q_v$  постоянна. Обозначим координаты центра этой области через  $x$ , толщину  $2\delta$ , а координаты левого и правого краев области «И» равны  $z_1 = \xi - \delta$  и  $z_2 = \xi + \delta$  (рисунок 3.17).

Введем функцию  $F(z)$ , которая подчиняется условию:

$$F(z) = \begin{cases} 0 & \text{вне области И} \\ q_v & \text{в области И} \end{cases}.$$

Функцию  $F(z)$  можно аналитически описать. Для этого введем ступенчатую функцию  $1(z - z_i)$ , которой присущи следующие свойства:

$$1(z - z_i) = \begin{cases} 0 & \text{при } (z - z_i) \leq 0, i = 1, 2 \\ 1 & \text{при } (z - z_i) > 0 \end{cases} \quad (3.26)$$

На рисунке 3.19 графически представлен вид функций  $1(z - z_i)$ , а также их разности  $\delta = \{1(z - z_1) - 1(z - z_2)\}$ , которая образует ступеньку.

Действительно, при  $z < z_1$  на основании (3.26) функции  $1(z - z_1) = 1(z - z_2) = 0$  и  $\delta(z) = 0$ ; при  $z_1 \leq z \leq z_2$  функции  $1(z - z_1) = 1, 1(z - z_2) = 0$  и  $\delta(z) = 1$ ; при  $z > z_2$  функции  $1(z - z_1) = 1(z - z_2) = 1$  и  $\delta(z) = 0$ . С помощью  $\delta$  функции легко представить функцию  $F$ :

$$F(z) = q_v \delta(z) = q_v \{1(z - z_1) - 1(z - z_2)\}.$$

Раскрывая в этой формуле значения  $z_1$  и  $z_2$ , получим следующее аналитическое выражение для ступенчатой функции  $F$ :

$$F(z) = q_v \{1(z - \xi + \delta) - 1(z - \xi - \delta)\}.$$

Аналогично могут быть представлены двух- и трехмерные области  $\gamma = x, y, z$ :

$$F(\gamma) = q_v \Pi \{1(\gamma - \xi + \delta) - 1(\gamma - \xi - \delta)\}.$$

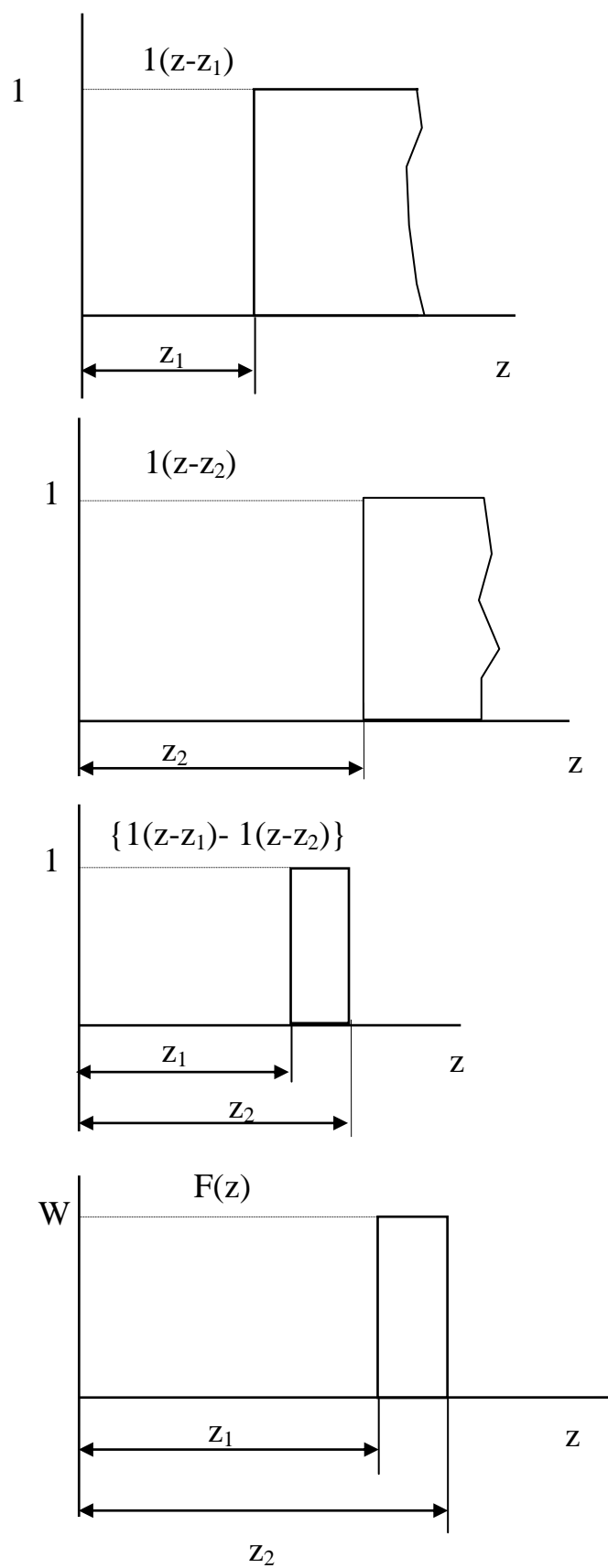


Рисунок 3.19 - Виды ступенчатых функций

Математическая формулировка расчета температурного поля электронной платы имеет вид:

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + q(x, y) - b^2 T = c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau}, \quad (3.27)$$

$$q(x, y) = \sum_{j=1}^J q_j(x, y); \quad (3.28)$$

$$q(x, y) = \begin{cases} \frac{P_i}{4\Delta\xi_j \Delta\eta_j \delta \lambda} & \text{в области источника энергии} \\ 0 & \text{вне области источника энергии} \end{cases}, \quad (3.29)$$

$$b^2 = \frac{k_{cp}}{\lambda \delta}, \quad (3.30)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=L_x} = \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0} = \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=L_y} = k_{cp} (T - T_{cp}), \quad T = T_{cp} \text{ при } \tau = 0, \quad (3.31)$$

где  $T$  – температура электронной платы;  $T_{cp}$  – температура окружающей среды;  $\tau$  – время;  $L_x, L_y$  – размеры электронной платы;  $\delta$  – толщина электронной платы;  $\rho$  – плотность;  $q(x, y)$  – поверхностная плотность теплового потока от локальных источников;  $P_j$  – мощность, рассеиваемая  $j$ -м источником теплоты;  $2\Delta\xi_j, 2\Delta\eta_j$  – длина и ширина области, в которой расположен источник теплоты.

Произведен расчет температурного поля электронной платы с тепловыделяющими элементами методом конечных элементов. Основные результаты вычислений приведены на рисунках 3.20-3.23.

На рисунке 3.20 рассмотрена физическая модель электронной платы, представленной в виде пластины с локальными источниками теплоты, с указанием ее геометрических размеров. Исследовалась электронная плата высокочастотного усилителя мощности, спроектированного ОАО «Избербашский радиозавод им. П.С. Плешакова». В модели выделены 3 наиболее тепловыделяющих элемента – биполярных транзистора мощностью 120 Вт каждый. Теплота, выделяемая остальными элементами электронной платы учтена в

виде равномерно рассредоточенного по всей остальной ее площади источника теплоты мощностью 20 Вт.

Исходными данными являлись: материал электронной платы - стеклотекстолит,  $\lambda=0,3$  Вт/(м·К),  $c=950$  Дж/(кг·К),  $\rho=1600$  кг/м<sup>3</sup>,  $T_{cp}=293$  К,  $k_{cp}=5$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), размеры на рисунке 3.20 указаны в мм.

На рисунке 3.21 показано двумерное температурное поле электронной платы. Из результатов расчетов следует, что три наиболее мощных элемента электронной платы (транзисторы) имеют высокие пиковые температуры, остальная же ее часть имеет температуру, близкую к температуре окружающей среды. При этом температура в части электронной платы, соответствующей расположению рядом двух тепловыделяющих элементов 1 и 2, является максимальной и превышает температуру области 3, соответствующей расположению одного биполярного транзистора. Это связано с наличием взаимного влияния двух расположенных рядом источников теплоты, что следует из принципа суперпозиции температурных полей.

Для более информативного представления картины на рисунке 3.24 рассмотрены данные об изменении температуры электронной платы вдоль оси x при  $y=42,5$  мм (данный путь охватывает источники теплоты 1 и 3). Как уже было отмечено, наибольшее значение температуры соответствует области с источником теплоты 1 и составляет 445 К (аналогичная температура источника теплоты 2), температура платы с установленным источником тепловыделений 3 меньше и имеет значение 405 К. Здесь необходимо обратить внимание на наличие значительного теплового фона от источников энергии, который повышает температуру соседних с ними областей электронной платы. Так, например, для рассмотренного случая, температура участков электронной платы отдаленных от тепловыделяющих элементов составляет порядка 320-330 К, тогда как вблизи источников теплоты температура существенно выше и составляет от 420 К до 380 К на расстоянии от 100 до 300 мм относительно объектов тепловыделений. Отсюда можно сделать вывод о возможности оптимизации температурного поля платы путем размещения

под источниками тепловыделений соответствующих стоков теплоты – ТЭБ и отводом теплоты от ее остальной части системой с плавящимися рабочими веществами. При этом критерием оптимизации теплового поля платы будет нормализация температуры источников теплоты.

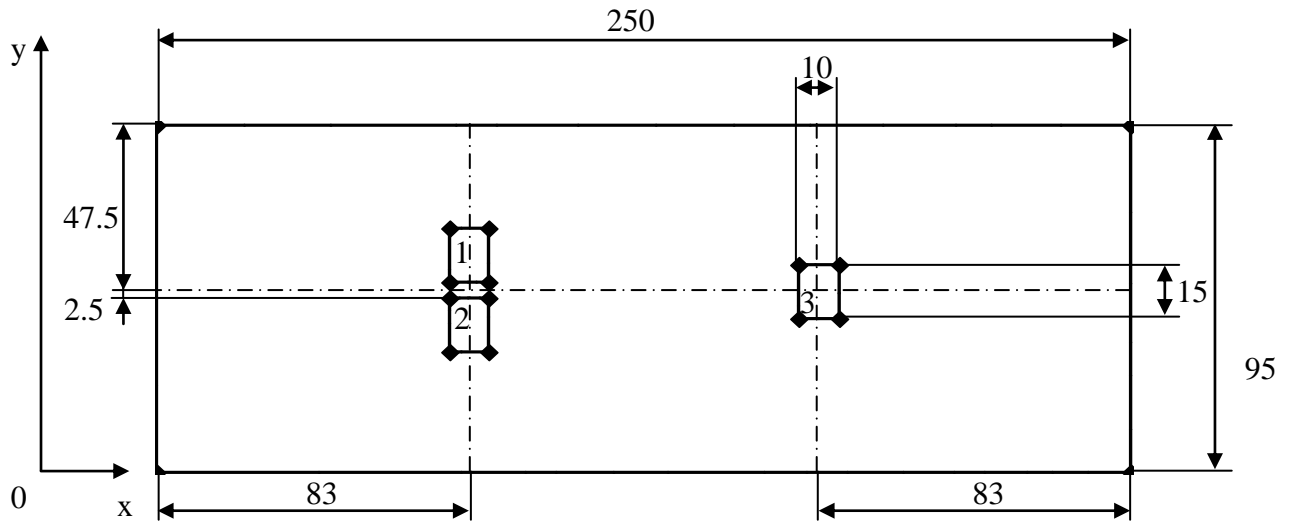


Рисунок 3.20 - Структура электронной платы

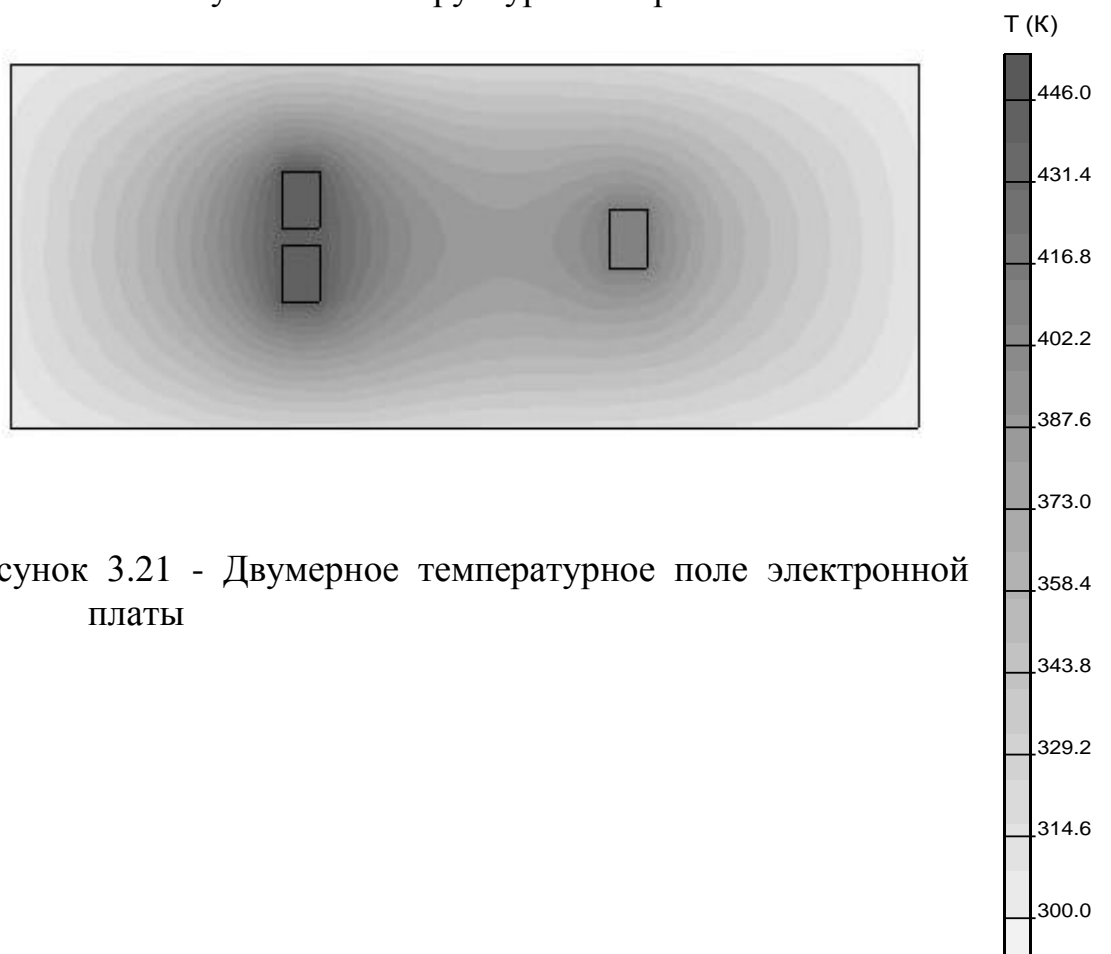


Рисунок 3.21 - Двумерное температурное поле электронной платы

На рисунке 3.23 показаны графики зависимости изменения температуры контрольных точек электронной платы во времени. Установлено, что температура в данных точках выходит в стационарный режим за одинаковое время, примерно через 4000 с. (67 мин.). Данное обстоятельство связано с относительно большими размерами электронной платы: длина - 250 мм, ширина - 95 мм, толщина 2 мм.

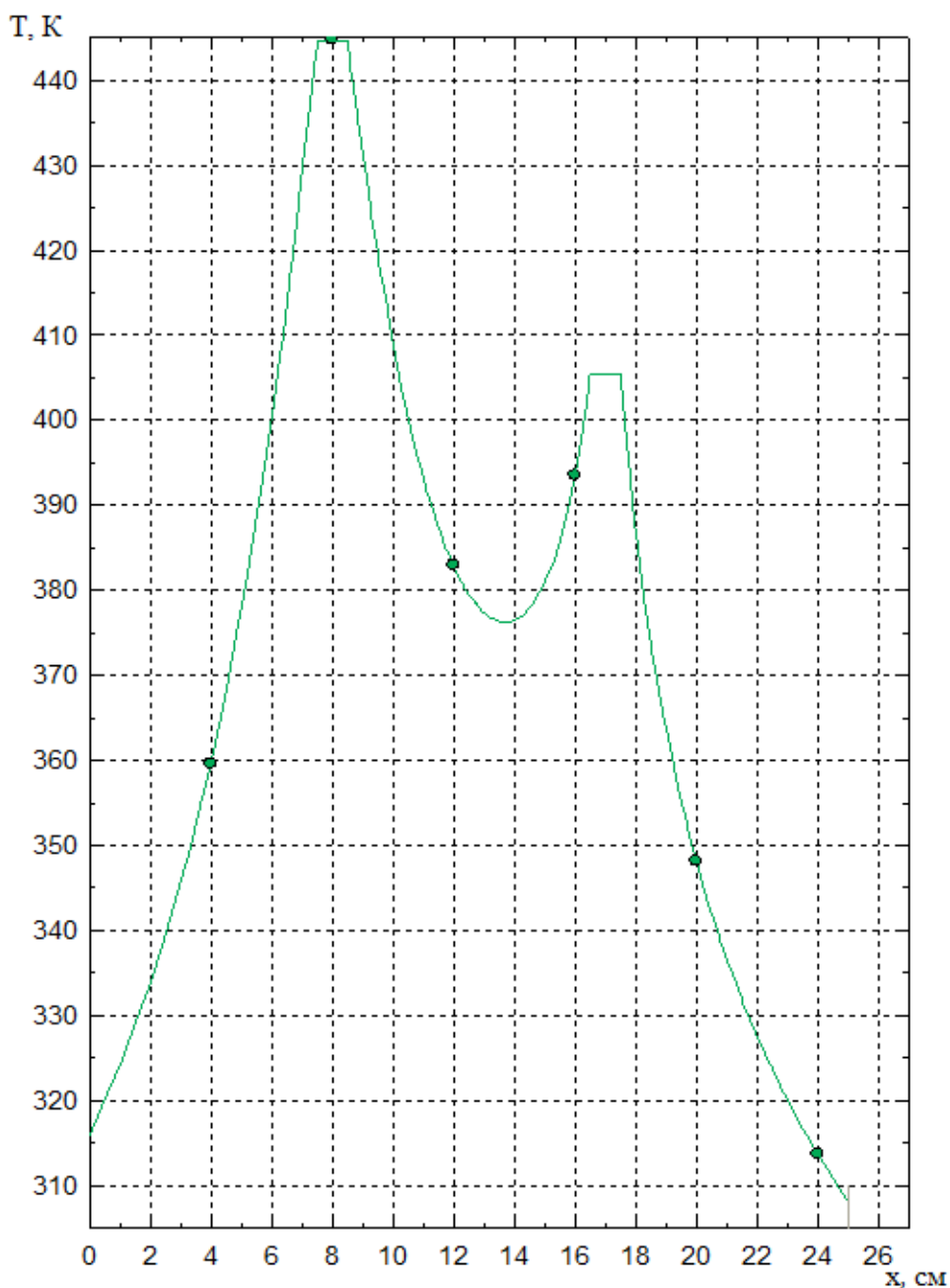


Рисунок 3.22 - Распределение температуры электронной платы вдоль оси  $x$  при  $y=42,5$  мм.



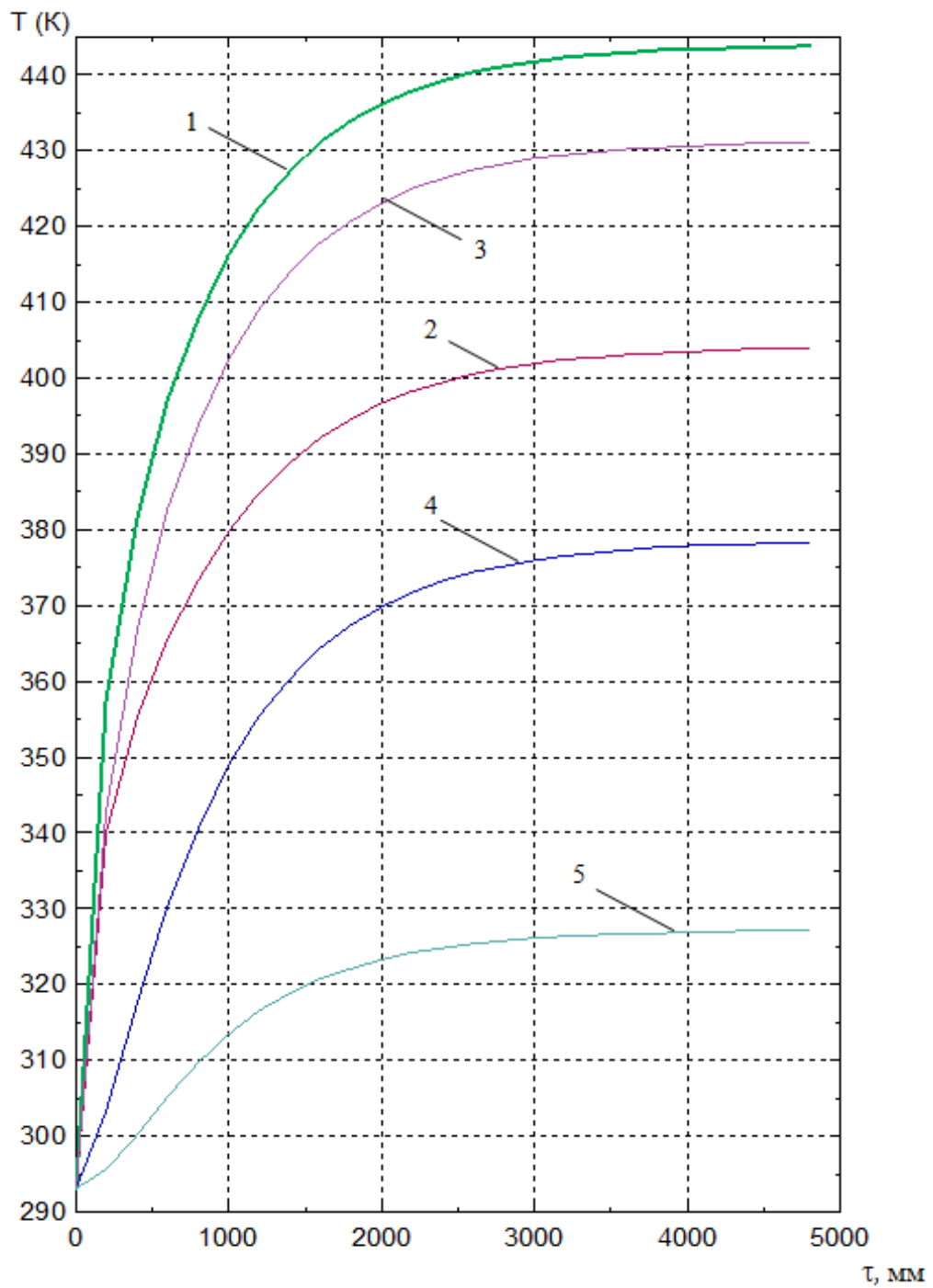


Рисунок 3.23 - Изменение температуры различных точек электронной платы во времени

- 1 – температура источника теплоты 1
- 2 – температура источника теплоты 3
- 3 – температура при  $x=125$  мм,  $y=47,5$  мм
- 4 – температура при  $x=90$  мм,  $y=47,5$  мм
- 5 – температура при  $x=17$  мм,  $y=14$  мм

### **3.2.2. Методика расчета и результаты исследований системы неравномерного охлаждения электронных плат**

Температурный рельеф электронной платы используется в качестве исходных данных для расчета холодопроизводительности ТЭБ. Целевая функция при этом представляет собой величину мощности, отводимой ТЭБ в окружающую среду для снижения температуры радиоэлементов до допустимых пороговых значений.

Численный расчет производится следующим образом.

1. Определяется количество компонентов электронной платы, имеющих значительную величину мощности рассеяния, температура которых лежит за диапазоном рабочих температур, а также их максимальный перегрев относительно допустимой рабочей температуры. Исходя из указанной информации, определяется количество теплопоглощающих элементов (ТЭБ), помещаемых под источниками теплоты – электронными компонентами платы.
2. Для остальных элементов электронной платы тепловая мощность суммируется и приводится к ее площади.
3. Основываясь на принципе суперпозиции температурных полей, составляется система уравнений, в которых величина необходимого значения температуры элемента электронной платы представляется как разность существующей температуры и температур, создаваемых теплопоглощающими элементами. В системе уравнений неизвестными являются величины мощностей теплопоглощающих элементов.
4. Осуществляется решение полученной системы уравнений.
5. Подбор рабочего вещества с соответствующей температурой плавления осуществляется в зависимости от требуемого температурного режима работы элементов платы. Его количество определяется продолжительностью их работы, а также мощностью тепловыделений.

По найденным значениям отводимых мощностей производится расчет параметров ТЭБ по известным соотношениям, описанным например в [5].

По предложенной методике проведен численный эксперимент для рассмотренной выше электронной платы. При этом предполагалось, что максимальная температура электронной платы не должна превышать 345 К. Основные результаты, полученные при расчете, приведены на рис.3.24-3.28.

На рисунке 3.24 изображено двумерное температурное поле электронной платы при ее неравномерном охлаждении, а на рисунке 3.25 представлены данные об изменении температуры электронной платы вдоль оси  $x$  при  $y=42,5$  мм. На рисунках 3.26-3.27 для сравнения представлен температурный рельеф и одномерное распределение температуры электронной платы при ее равномерном охлаждении посредством ТЭБ. В случае неравномерного охлаждения использовались два стока теплоты (ТЭБ), первый мощностью 148 Вт размещался под двумя тепловыделяющими элементами 1 и 2, второй мощностью 77 Вт помещался под тепловыделяющий элемент 3. При равномерном охлаждении использовался сток теплоты мощностью 354 Вт.

Как следует из анализа расчетных данных, при использовании равномерного охлаждения электронного узла имеет место трата энергии на отвод теплоты от участков электронной платы, температура которых и без охлаждающей системы лежит в допустимых пределах. данный подход приводит к увеличению холодопроизводительности, тока питания, а также габаритных размеров ТЭБ по сравнению с необходимыми. Это в большей степени снижает экономичность системы теплоотвода. Так для рассмотренного случая при равномерном охлаждении электронной платы ТЭБ требуется примерно в 1,6 раз больше мощности, чем при использовании неравномерного отвода теплоты. Соответственно увеличивается и потребляемая ТЭБ электрическая энергия. Применение для охлаждения электронной платы неравномерного теплоотвода устраняет этот недостаток. Полученные данные показывают, что в данном случае энергия, требуемая для обеспечения необходимого температурного режима, меньше, чем при использовании равномерного охлаждения.

При таком подходе температурное поле электронной платы практически однородно и охлаждение является более эффективным.

На рис.3.28 приведена информация об изменении температуры различных точек электронной платы во времени при ее неравномерном охлаждении. Продолжительность выхода на стационарный режим согласно расчетным данным соответствует примерно той же величине, что и для случая работы электронной платы без использования теплоотвода. Указанное обстоятельство говорит о том, что применение исследуемой системы охлаждения не влияет на инерционные свойства объекта охлаждения.

Основные закономерности теплообмена в контейнере с рабочим веществом аналогичны приведенным в параграфе 3.1. Поэтому подбор рабочего вещества и расчет его количества выполняется на основании соотношений (3.11)-(3.12), (3.16), (3.24)-(3.25).

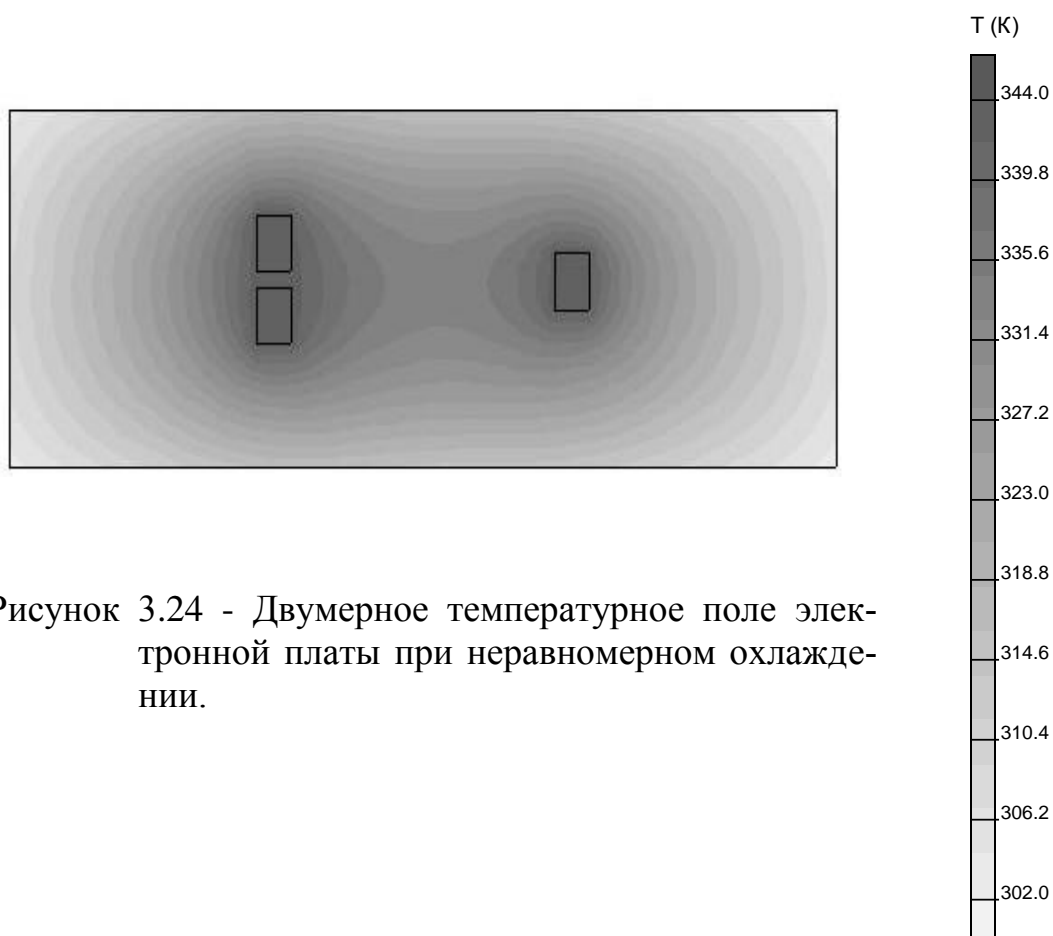


Рисунок 3.24 - Двумерное температурное поле электронной платы при неравномерном охлаждении.

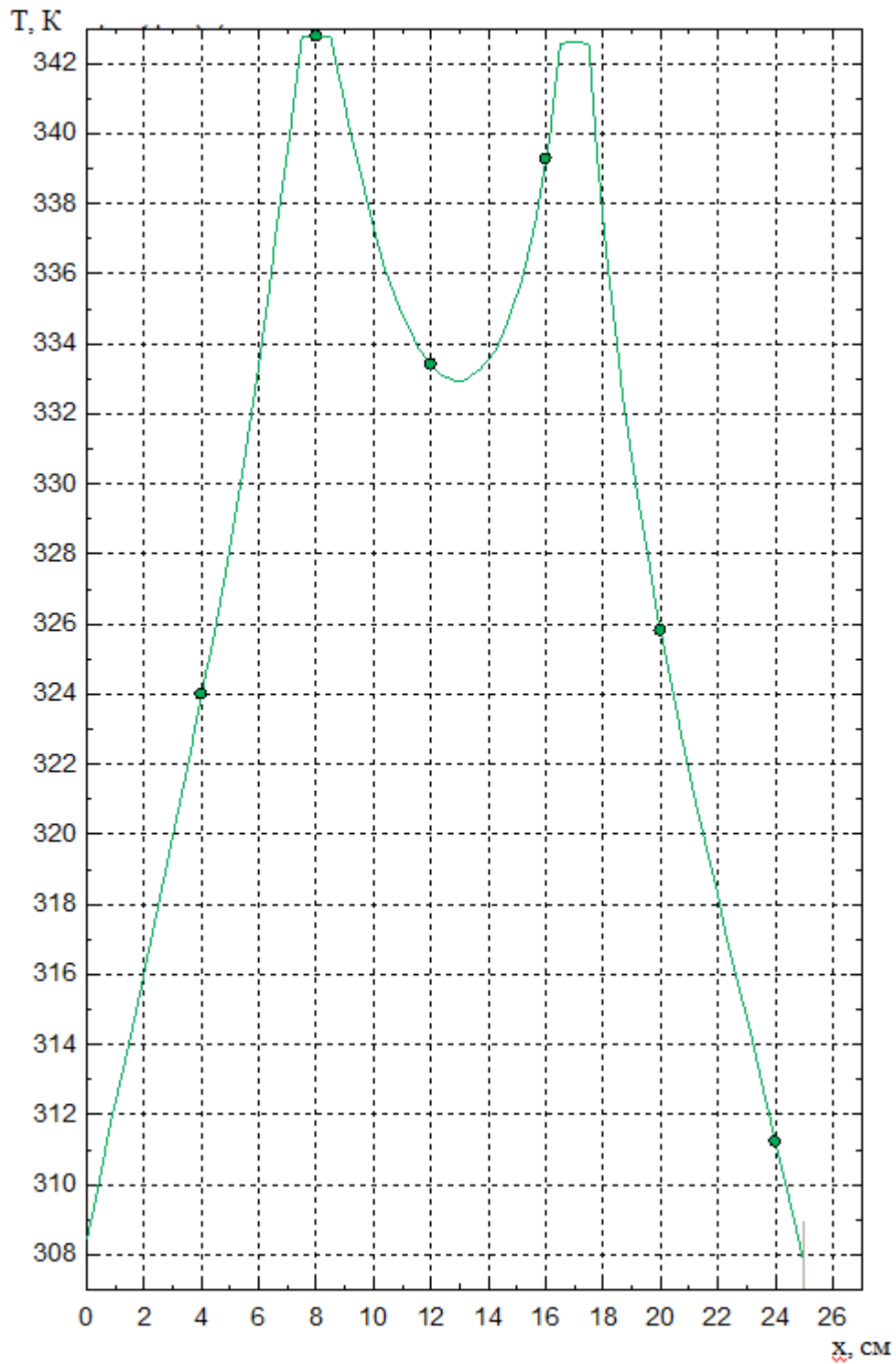


Рисунок 3.25 - Распределение температуры электронной платы вдоль оси  $x$  при  $y=42,5$  мм при неравномерном охлаждении.

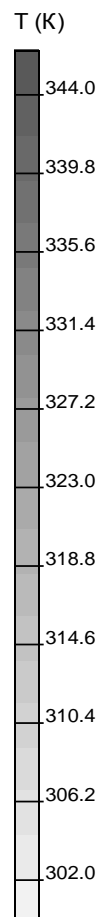
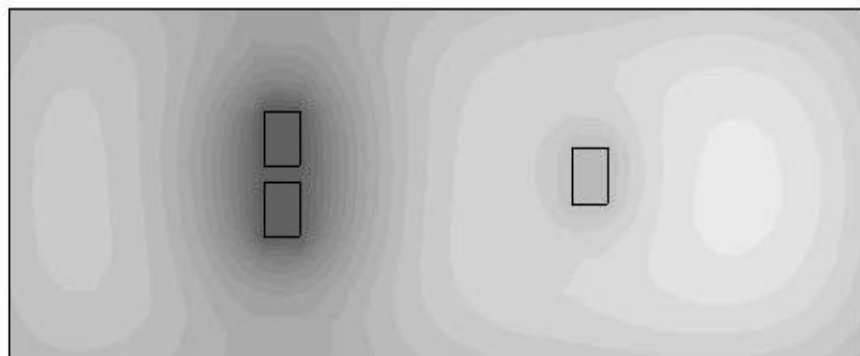


Рисунок 3.26 - Двумерное температурное поле электронной платы при равномерном охлаждении ТЭБ

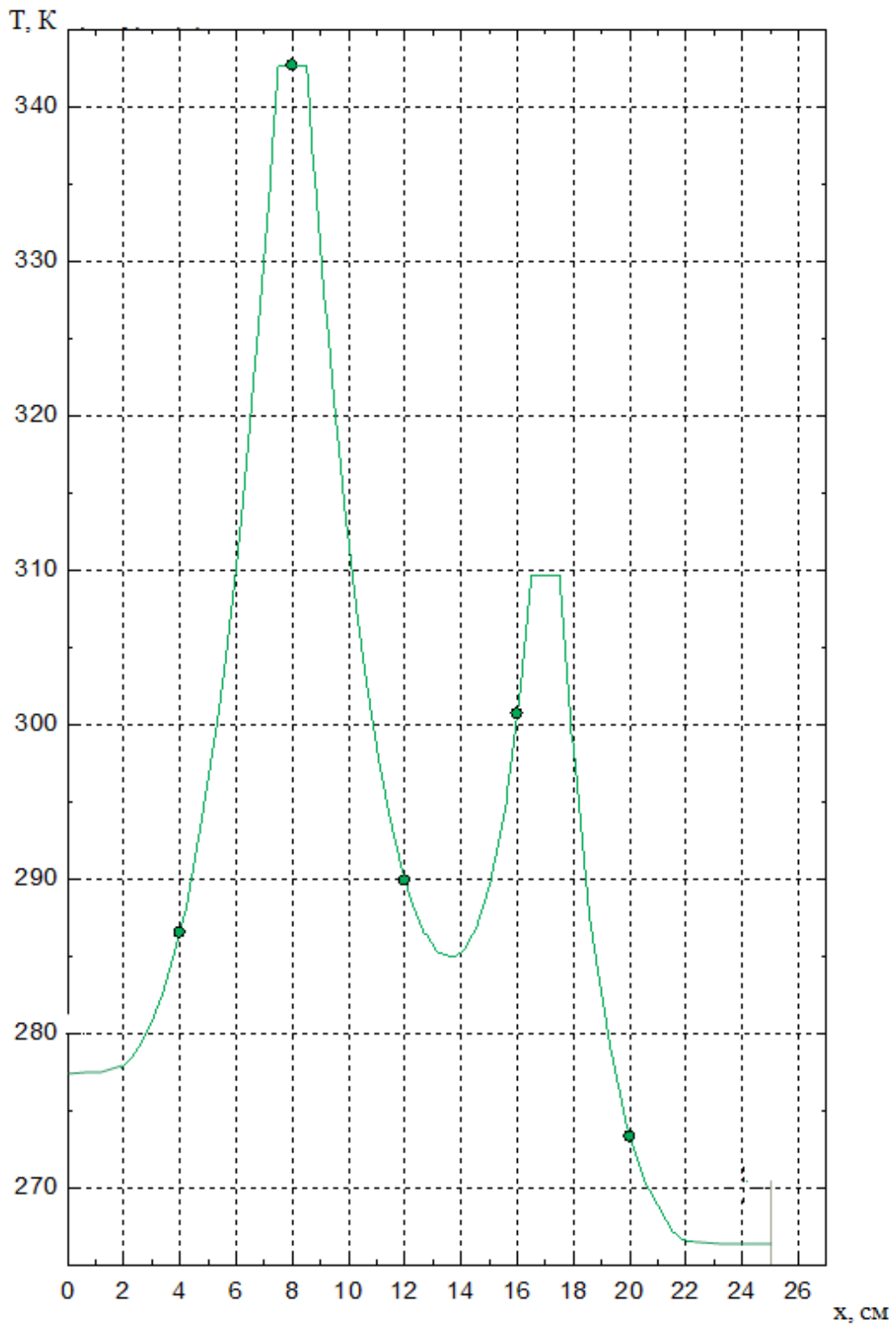


Рисунок 3.27 - Распределение температуры электронной платы вдоль оси x при  $y=42,5$  мм при равномерном охлаждении ТЭБ

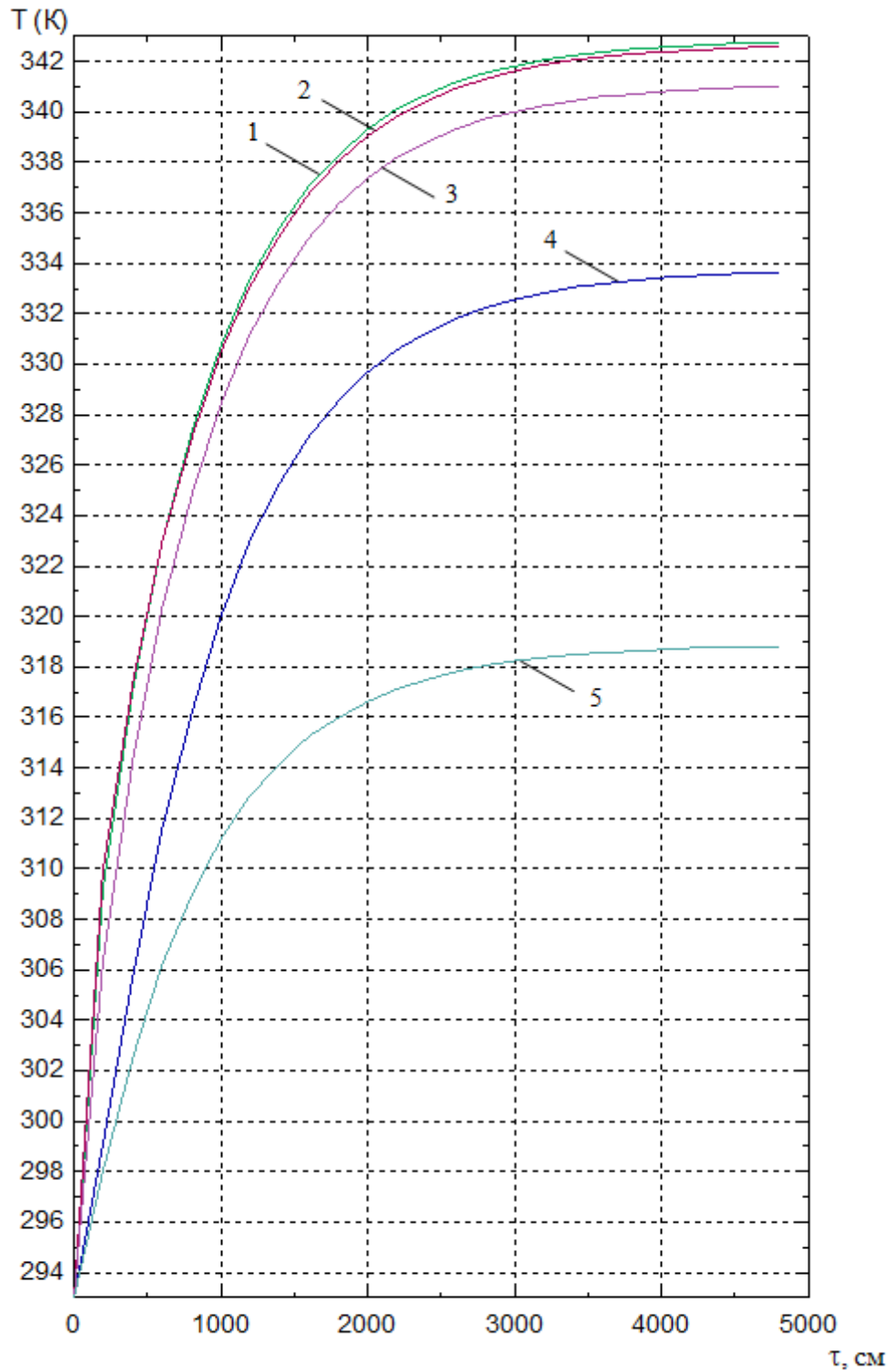


Рисунок 3.28 - Изменение температуры различных точек электронной платы во времени при неравномерном охлаждении.

- 1 – температура источника теплоты 1
- 2 – температура источника теплоты 3
- 3 – температура при  $x=125$  мм,  $y=47,5$  мм
- 4 – температура при  $x=90$  мм,  $y=47,5$  мм
- 5 – температура при  $x=17$  мм,  $y=14$  мм



## **ГЛАВА 4. ПРОЦЕССЫ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В СИСТЕМАХ ОХЛАЖДЕНИЯ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

### **4.1 Математическая модель и исследование теплового воздействия на биологически активные точки**

В человеческом организме существует определенное количество зон, в которых сконцентрированы так называемые биологически активные точки. Помимо сегментарных имеются также рефлексогенные зоны, своего рода проекции различных органов человека на кору головного мозга, топографически сконцентрированные в определенных областях поверхности тела. К ним относятся ладонная поверхность, стопа, нос, назолабиальная область, ушные раковины и т.п.

В исследованиях, посвященных практическому использованию свойств этих зон в медицинских целях [34] показано, что в биологически активной точке и прилегающей к ней области практически всегда сосредоточены подкожные нервы, артерии, вены, лимфатические сосуды, играющие важную роль в обменных процессах человеческого организма. Физическое воздействие на эти зоны (в том числе и термопунктура) раздражает рецепторы, что вызывает положительные ответные биологические реакции [16]. Эти точки также связаны с отдельными внутренними органами за счет их общей проекции на уровне высших вегетативных центров. Их стимуляция приводит к ответным реакциям также и со стороны внутренних органов [23, 50]. Поэтому является целесообразным разработка методов и технических сред для их стимуляции с целью профилактики и лечения различных заболеваний.

В данном параграфе рассматривается модель термоэлектрической системы для проведения тепловых процедур, связанных с локальным охлаждением этих точек.

Анализ возможного теплового воздействия на биологически активные точки (объект воздействия) [18, 19] требует рассмотрения различных режимов работы технического средства, сочетающих как охлаждение, так и нагрев рефлексогенных зон, а также чередование этих процессов в соответствии с

типом лечебной процедуры. Поэтому при моделировании теплофизических процессов воздействия на биологически активную точку необходимо рассмотреть нестационарную задачу для тепловой схемы, изображенной на рис.4.1.

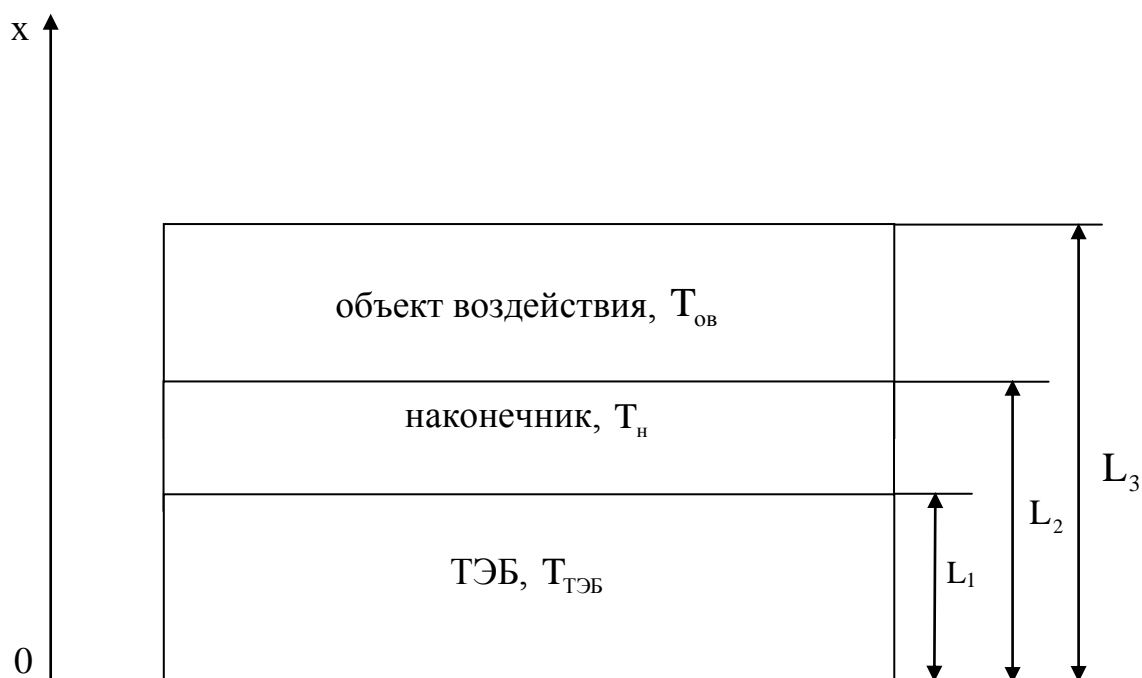


Рисунок 4.1 - Тепловая модель воздействия на биологически активную точку

На рисунке 4.1 изображены: слой 1, толщиной  $L_1$ , представляющий собой ТЭБ, приведенную в тепловой контакт с воздействующим наконечником; слой 2, толщиной  $L_2 - L_1$ , моделирующий непосредственно наконечник, осуществляющий тепловое воздействие; слой 3, толщиной  $L_3 - L_2$  - непосредственно объект воздействия.

В общем случае объект воздействия может представлять собой некоторую рефлексогенную зону, по которой возможно перемещение наконечника. Предполагается, что система: техническое средство - объект воздействия, изолирована по боковой поверхности; тепловой поток от ТЭБ равномерно распределен по всей поверхности контакта с наконечником; мощность теп-

ловыделений в объекте воздействия фиксирована, не зависит от температуры и равномерно распределена по объему; коэффициент теплопроводности наконечника имеет определенную величину, также независимую от температуры; передача теплоты во всех слоях системы осуществляется только за счет теплопроводности [57].

Основываясь на тепловой модели и введенных ограничениях, составим математическую формулировку задачи.

Для одномерного случая модели нестационарная задача теплообмена при проведении процедур по тепловому воздействию на рефлексогенную зону имеет следующий вид [58]:

$$\frac{\partial T_{\text{ТЭБ}}}{\partial \tau} = a_{\text{ТЭБ}} \frac{\partial^2 T_{\text{ТЭБ}}}{\partial x^2} + \frac{I_{\text{ТЭБ}}^2 r_{\text{ТЭБ}}}{c_{\text{ТЭБ}} \rho_{\text{ТЭБ}}}, \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial T_{\text{об}}}{\partial \tau} = a_{\text{об}} \frac{\partial^2 T_{\text{об}}}{\partial x^2} + \frac{q_{\text{об}}}{c_{\text{об}} \rho_{\text{об}}}, \quad (4.2)$$

$$\frac{\partial T_{\text{н}}}{\partial \tau} = a_{\text{н}} \frac{\partial^2 T_{\text{н}}}{\partial x^2}, \quad (4.3)$$

$$\beta_{\text{тс}} (T_{\text{ТЭБ}}|_{x=0} - T_{\text{тс}}) = \lambda_{\text{ТЭБ}} \frac{\partial T_{\text{ТЭБ}}}{\partial x} \Big|_{x=0}, \quad (4.4)$$

$$\lambda_{\text{ТЭБ}} \frac{\partial T_{\text{ТЭБ}}}{\partial \tau} \Big|_{x=L_1} - q_{\text{ТЭБ}} = \lambda_{\text{н}} \frac{\partial T_{\text{н}}}{\partial \tau} \Big|_{x=L_1}, \quad (4.5)$$

$$\lambda_{\text{об}} \frac{\partial T_{\text{об}}}{\partial x} \Big|_{x=L_2} - f_{\text{н}} v_{\text{н}} P_{\text{н}} = \lambda_{\text{н}} \frac{\partial T_{\text{н}}}{\partial x} \Big|_{x=L_2}, \quad (4.6)$$

$$\lambda_{\text{об}} \frac{\partial T_{\text{об}}}{\partial x} \Big|_{x=L_3} = 0, \quad (4.7)$$

где  $T_{\text{ТЭБ}}, T_{\text{н}}, T_{\text{об}}$  - температура ТЭБ, наконечника, объекта воздействия;  $\tau$  - время;  $a_{\text{ТЭБ}}, a_{\text{н}}, a_{\text{об}}$  - коэффициент температуропроводности ТЭБ, наконечника, объекта воздействия;  $I_{\text{ТЭБ}}$  - сила электрического тока, протекающего через ТЭБ;  $r_{\text{ТЭБ}}$  - электрическое сопротивление ТЭБ;  $q_{\text{об}}$  - количество теплоты, выделяемой в единицу времени в объекте воздействия;  $c_{\text{ТЭБ}}, c_{\text{об}}$  - теплоемкость ТЭБ, объекта воздействия;  $\rho_{\text{ТЭБ}}, \rho_{\text{об}}$  - эффективное значение плотно-

сти ТЭБ, объекта воздействия;  $\lambda_{\text{ТЭБ}}, \lambda_{\text{н}}, \lambda_{\text{об}}$  - эффективное значение коэффициента теплопроводности ТЭБ, наконечника, объекта воздействия;  $q_{\text{ТЭБ}}$  - холодопроизводительность ТЭБ;  $f_{\text{н}}$  - коэффициент трения при перемещении наконечника по рефлексогенной зоне;  $v_{\text{н}}$  - скорость перемещения наконечника по рефлексогенной зоне;  $P_{\text{н}}$  - давление наконечника на рефлексогенную зону,  $T_{\text{тс}}$  - температура теплосброса с горячих спаев ТЭБ,  $\beta_{\text{тс}}$  - коэффициент теплоотдачи к теплосбросу.

При составлении уравнения (4.1), описывающего процесс теплопередачи в ТЭБ, последняя представлена в виде целостной конструкции, имеющей определенное значение эффективного коэффициента теплопроводности и электрического сопротивления, в которой имеет место выделение теплоты Джоуля, определяемой величиной протекающего электрического тока. При этом поглощение и выделение теплоты Пельтье учитывается в условиях сопряжения слоев путем введения слагаемого  $q_{\text{ТЭБ}}$ . Подобное допущение существенно упрощает математическую модель, делает ее более наглядной, вместе с тем лишь незначительно снижая точность.

Результаты расчетов системы уравнений (4.1) - (4.7) методом конечных элементов представлены на рисунках 4.2-4.4. Вычисления производились при [65]  $T_{\text{тс}} = 293\text{К}$ ,  $\beta_{\text{тс}} = 30 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ,  $\lambda_{\text{ТЭБ}} = 1,5 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ,  $\lambda_{\text{н}} = 230 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$  (материал наконечника - алюминий),  $\lambda_{\text{об}} = 0,2 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ,  $q_{\text{об}} = 30 \text{ Вт}$ ,  $r_{\text{ТЭБ}} = 0,5 \text{ Ом}$ ,  $f_{\text{н}} = 0,5$ ,  $v_{\text{н}} = 0,001 \text{ м/с}$ ,  $P_{\text{н}} = 1000 \text{ Н/м}^2$ , толщина ТЭБ – 4 мм, толщина наконечника – 20 мм, усредненная толщина объекта воздействия – 30 мм.

На рисунке 4.2 рассмотрено распределение температуры по толщине каждого слоя (биологического объекта, наконечника и ТЭБ) при охлаждении биологически активной точки по достижению системы прибор - объект воздействия, стационарного режима. Как следует из рисунка, вдоль ТЭБ и наконечника зависимости имеют линейный характер. Это объясняется

линейными теплофизическими характеристиками батареи в соответствии с принятыми допущениями и отсутствием тепловыделений в наконечнике прибора. Температура же по толщине биологического объекта плавно увеличивается от своего минимального значения на границе контакта с наконечником до величины, примерно равной 310 К, соответствующей температуре человеческого тела. При этом наблюдается уменьшение температуры всех слоев системы при увеличении величины  $q_{ТЭБ}$  до своего максимального значения, соответствующего оптимальному току питания ТЭБ.

Полученные зависимости интересны возможностью оценки величины тепловых потерь в наконечнике устройства. Так, для случаев, соответствующих представленным на графике, величина тепловых потерь на наконечнике толщиной 20 мм достигает 1-1,5 К. Снизить это значение, очевидно возможно, применив материал для изготовления наконечника с более высоким коэффициентом теплопроводности (например, медь), оптимизировав толщину его слоя.

Также представляет интерес исследование динамических характеристик системы, влияющих на эффективность и комфортность проведения медицинских процедур.

На рисунке 4.3 представлено изменение различных точек прибора во времени, где кривая 1 – температура холодных спаев ТЭБ, 2 – температура наконечника, 3 - температура объекта воздействия, 4 – температура горячих спаев ТЭБ. Согласно представленным данным продолжительность выхода на стационарный режим всех точек системы не превышает 80 с, что объясняется незначительной тепловой инерционностью устройства, обусловленной его незначительными габаритными размерами, низкой теплоемкостью и высокой теплопроводностью применяемых материалов, высокими тепловыми потоками. Данное обстоятельство дает возможность сделать вывод об удобстве проведения оздоровительных процедур с использованием рассматриваемого термоэлектрического прибора.

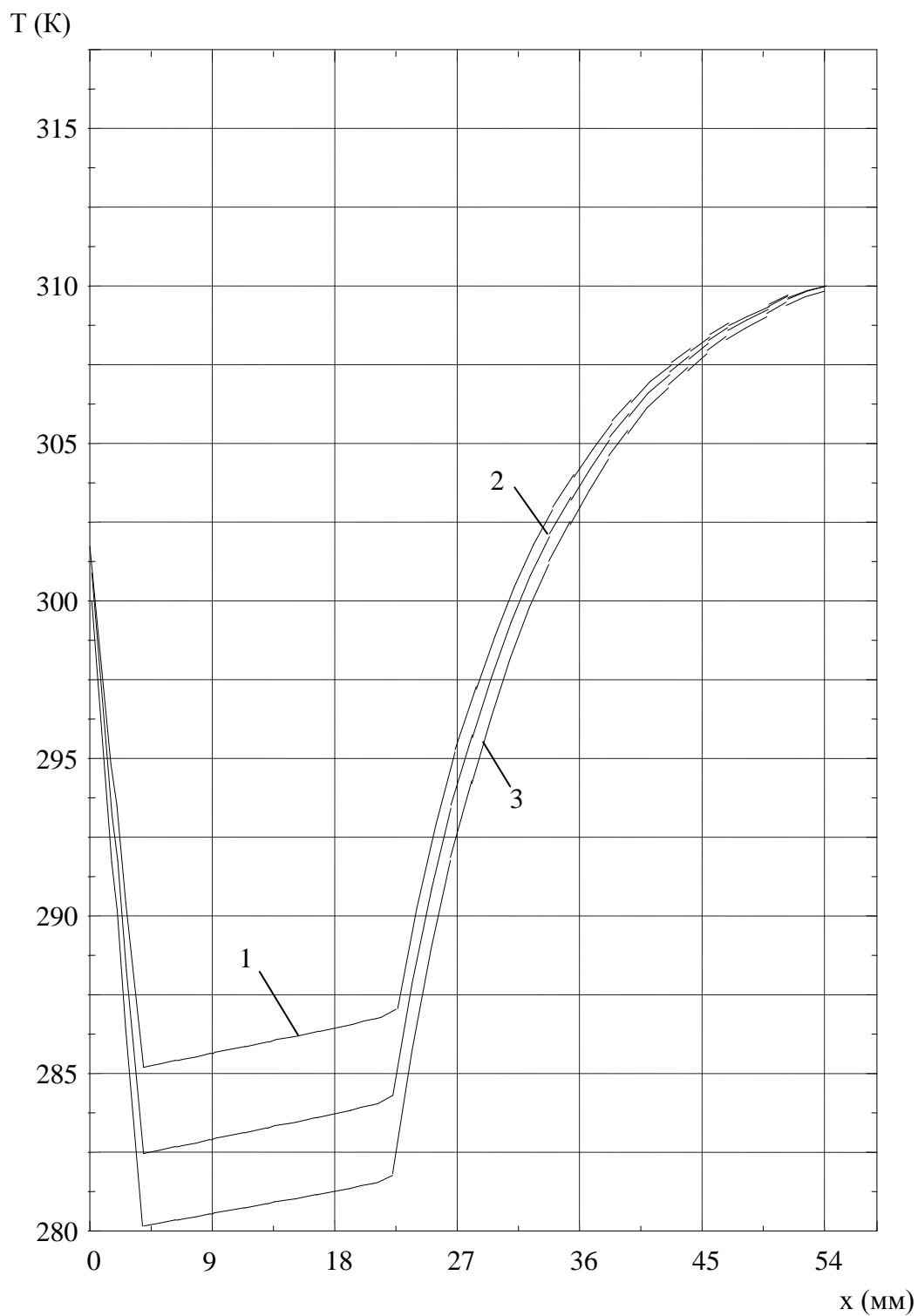


Рисунок 4.2 - Распределение температуры по толщине системы:  
 прибор - объект воздействия  
 1 -  $q_{TЭБ} = 20000 \text{ Вт/м}^2$ , 2 -  $q_{TЭБ} = 16000 \text{ Вт/м}^2$ , 3 -  $q_{TЭБ} = 12000 \text{ Вт/м}^2$

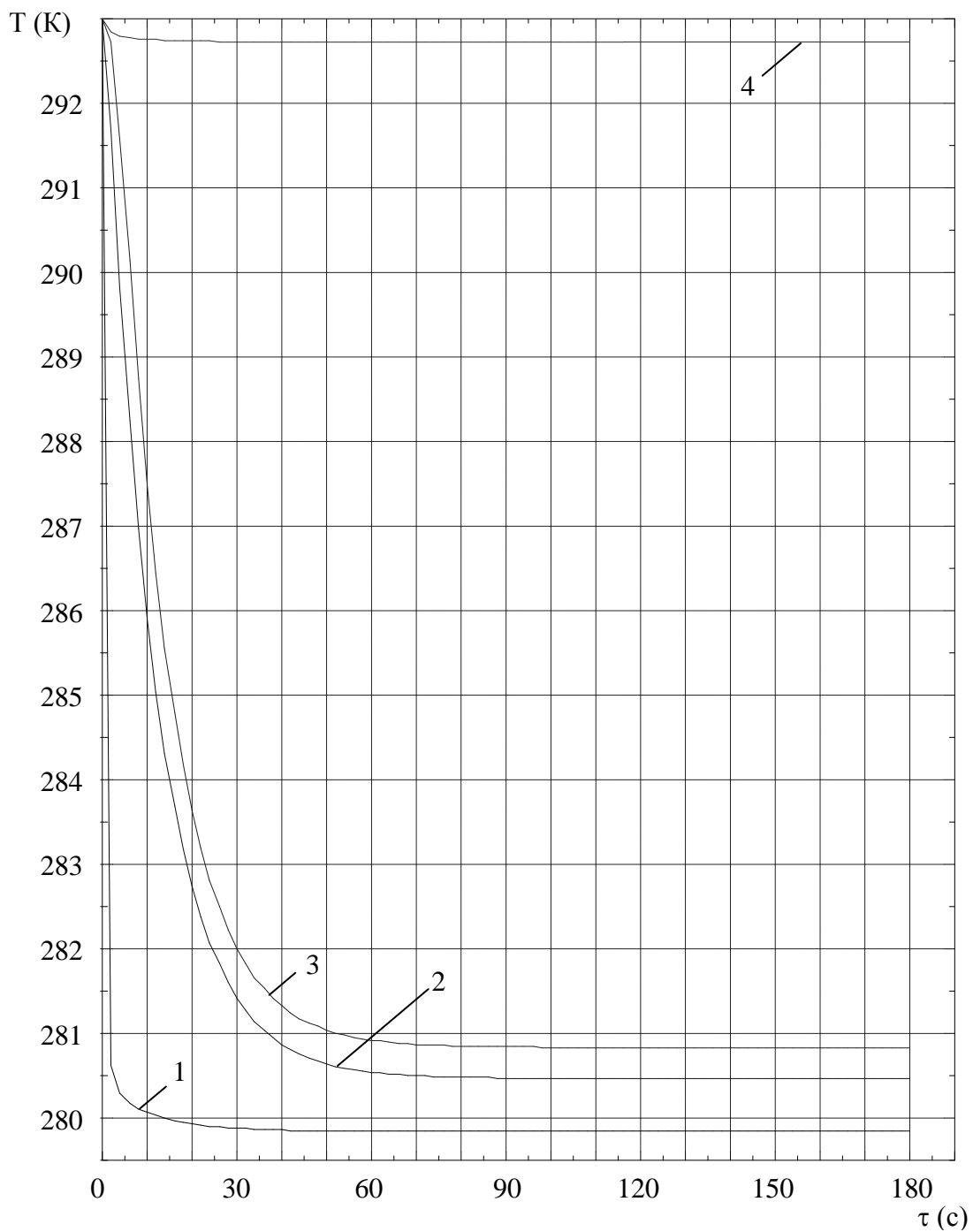


Рисунок 4.3 - Изменение температуры системы ТЭБ - наконечник - объект воздействия во времени при  $q_{\text{ТЭБ}}=20000 \text{ Вт/м}^2$

1 – температура холодных спаев ТЭБ, 2 – температура наконечника, 3 - температура объекта воздействия, 4 – температура горячих спаев ТЭБ

Так как проведение процедур с использованием термоэлектрического прибора может сопровождаться его перемещением по рефлексогенной зоне, важным является учет «неплотности» контакта наконечника и объекта

воздействия. В рассматриваемой модели устройства учет этого обстоятельства произведен введением в граничное условие (4.6) дополнительного слагаемого  $f\nu P$ , значение которого соответствует потерям теплоты, возникающим при не плотном (скользящем) контакте двух поверхностей. На рисунке 4.4 изображена зависимость изменения температуры объекта воздействия от координаты  $x$  при  $q_{ТЭБ} = 20000 \text{ Вт/м}^2$ , и различных значениях произведения  $f_{\text{н}}\nu_{\text{н}}P_{\text{н}}$ . Как следует из рисунка, с увеличением произведения  $f_{\text{н}}\nu_{\text{н}}P_{\text{н}}$  температура объекта воздействия повышается (при увеличении  $f_{\text{н}}\nu_{\text{н}}P_{\text{н}}$  в 3 раза температура увеличивается примерно на 2К). Таким образом, наравне с потерями теплоты в наконечнике, обусловленными его тепловым сопротивлением, имеют место потери мощности из-за неплотного контакта последнего с биологическим объектом. Поэтому для повышения точности дозирования теплового воздействия на биологически активную точку необходимо учитывать данные потери при подборе ТЭБ.

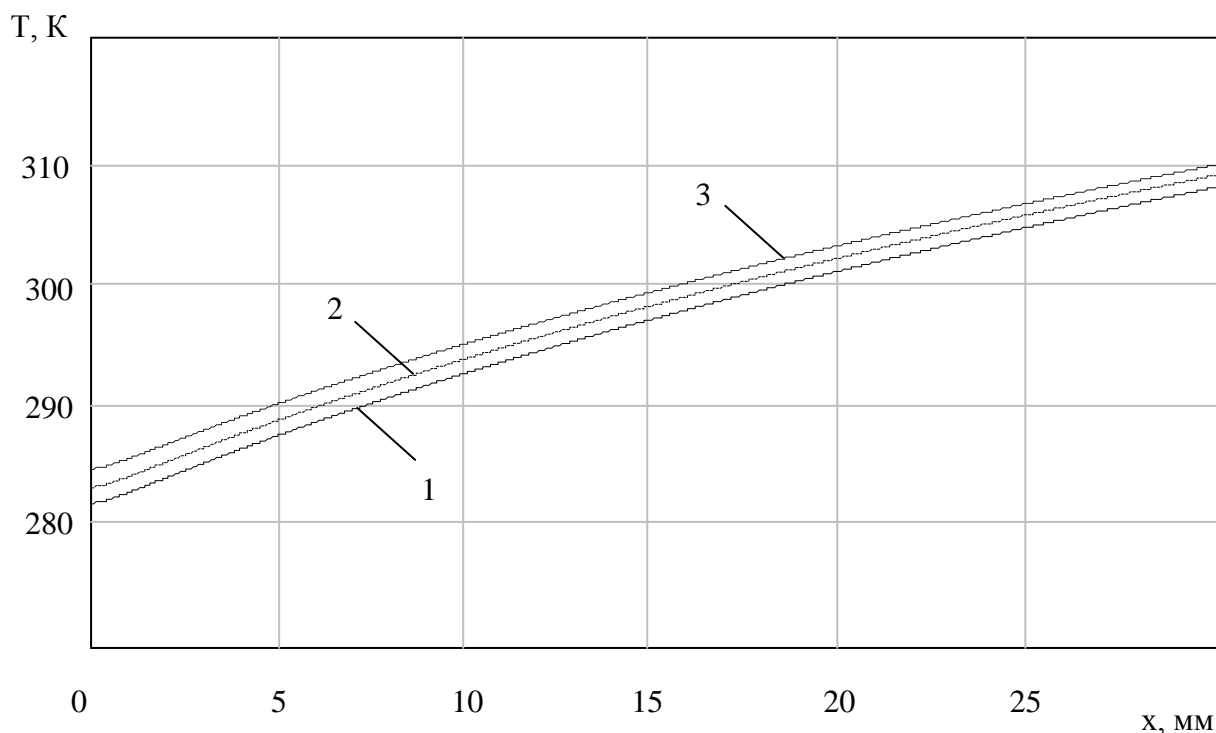


Рисунок 4.4 - Распределение температур по толщине объекта воздействия при различных значениях  $f\nu P$   
 1 -  $f_{\text{н}}\nu_{\text{н}}P_{\text{н}}=0,5$ ; 2-  $f_{\text{н}}\nu_{\text{н}}P_{\text{н}}=1$ ;  $f_{\text{н}}\nu_{\text{н}}P_{\text{н}}=1,5$



## **4.2 Математическая модель и теоретические исследования термоэлектрической системы для местного теплового воздействия на отдельные зоны организма человека**

Методики местного теплового воздействия на отдельные зоны поверхность тела человека распространены в медицинской практике при лечении и профилактике целого ряда различных заболеваний, к которым относятся механические травмы, заболевания мышц и суставов, включая возникающие в них воспалительные процессы, неврозы, артрозы и артриты, хроническая усталость и др. [24, 30, 46, 79, 86, 111, 168, 227]. При этом тепловые процедуры оказывают значительное влияние на энергетический баланс организма [10, 151, 167]. Под воздействием нагрева отдельных областей кожного покрова кровеносные и лимфатические сосуды расширяются, что улучшает кровообращение во многих внутренних органах. Данное обстоятельство приводит к активизации обмена веществ и качественному насыщению организма питательными веществами и кислородом. Термовоздействие стимулирует окисление жира, очищает организм, выводя вредные токсины и другие продукты жизнедеятельности, тем самым способствуя улучшению общего состояния человека.

Воздействие холодом (криовоздействие) обладает существенным омолаживающим эффектом, разглаживает морщины, устраняет распространение угревой сыпи и акне, целюлитные отложения, сглаживает рубцы, удаляет кожистые образования, папилломы и доброкачественные опухоли, снимает воспаление, а также имеет местное анестезирующее действие.

Разработана ТЭС [70], позволяющая осуществлять тепловое действие на поверхность тела человека в лечебных и профилактических целях. Настоящий параграф посвящен ее математическому моделированию.

Анализ возможных вариантов теплового воздействий на отдельные зоны поверхности тела человека (объекта воздействия) приводит к необходимости рассмотрения режимов работы ТЭС, сочетающих в себе как охлаждающие, так и

нагревающие процедуры, соответствующие той или иной методики. Обобщенная тепловая модель ТЭС, учитывающая возможность контрастного как в пространстве, так и во времени теплового воздействия, изображена на рисунке 4.5. Здесь обозначено: 1 – основание, на котором крепятся ТЭБ; 2 – непосредственно ТЭБ, выполняющие функции источников (стоков) теплоты и закрепленные на основании в местах, определяемых методикой проведения процедур, конструктивным удобством и комфортностью ощущений человека; 3 – объект воздействия.

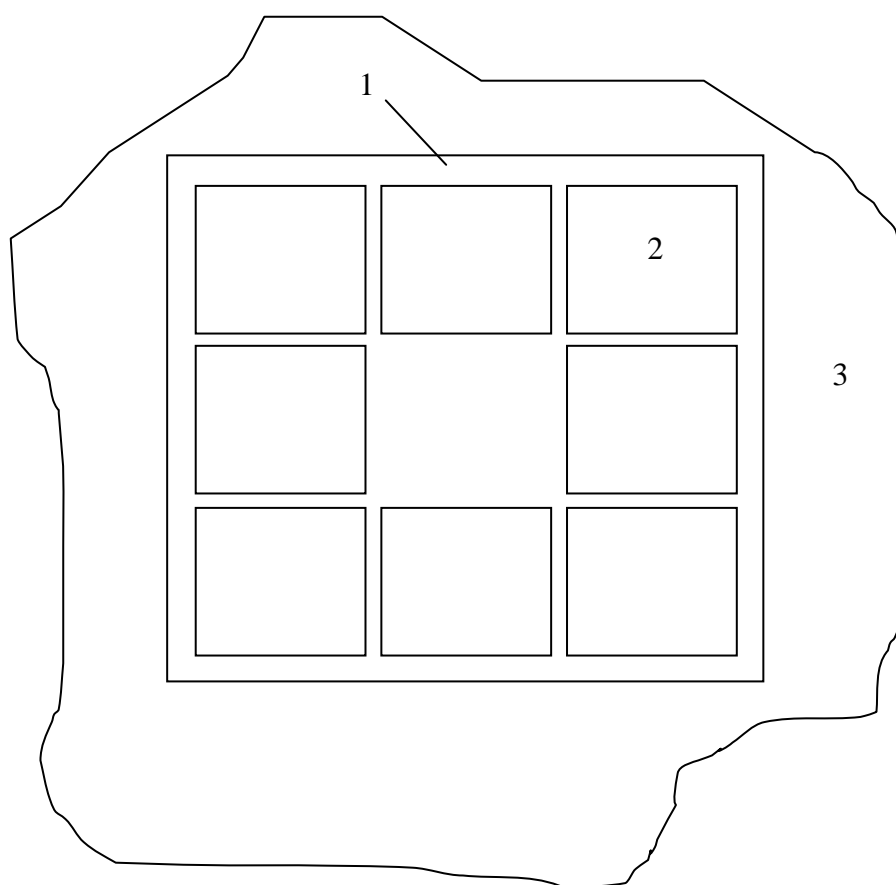


Рисунок 4.5 - Тепловая модель ТЭС теплового воздействий на отдельные зоны человеческого организма

В зависимости от проводимых оздоровительных процедур все ТЭБ могут работать либо в режиме охлаждения, либо в режиме нагрева, чередовать указанные режимы в течение определенного промежутка времени, а также формировать изменяющиеся во времени температурные поля различной

конфигурации (например, шахматное или коридорное чередование холодных и теплых зон, бегущая волна и др.) [25].

Исследование ТЭС по рассмотренной тепловой модели осуществлено на основе анализа температурного поля пластины произвольной формы с дискретными источниками энергии [43].

С учетом представления источников и стоков теплоты (ТЭБ) в виде ступенчатой функции, математическая формулировка задачи расчета температурного поля объекта воздействия получена в следующем виде [69]:

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + q_{\text{ТЭБ}}(x, y) + q_{\text{ср}} = c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau}, \quad (4.8)$$

$$q_{\text{ТЭБ}}(x, y) = \sum_{j=1}^J q_{\text{ТЭБ}j}(x, y); \quad (4.9)$$

$$q_{\text{ТЭБ}j}(x, y) = \begin{cases} \frac{Q_{\text{ТЭБ}j}}{S_{\text{ТЭБ}j}} & \text{в области источника энергии} \\ 0 & \text{вне области источника энергии} \end{cases}, \quad (4.10)$$

$$S_{\text{ТЭБ}j} = \iint_{S_{\text{ТЭБ}j}} S_{\text{ТЭБ}j}(x, y) dx dy, \quad (4.11)$$

$$q_{\text{ср}} = k_{\text{ср}}(T - T_{\text{ср}}), \quad (4.12)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = k_{\text{ср}}(T - T_{\text{ср}}) \text{ при } x, y \in L,$$

$$T = 309,6\text{K} \text{ при } \tau = 0. \quad (4.13)$$

где  $T$  – температура в любой точке объекта воздействия;  $T_{\text{ср}}$  – температура окружающей среды;  $\tau$  – время;  $\delta$  – толщина пластины;  $\lambda$  – эффективный коэффициент теплопроводности объекта воздействия;  $k_{\text{ср}}$  – коэффициент теплоотдачи в окружающую среду ( $k_{\text{ср}} = \text{const}$ );  $c$  – теплоемкость объекта воздействия,  $\rho$  – плотность объекта воздействия,  $q_{\text{ТЭБ}}(x, y)$  – суммарная поверхностная плотность теплового потока от локальных источников и стоков теплоты,  $q_{\text{ТЭБ}j}(x, y)$  – поверхностная плотность теплового потока от  $j$ -го локального источника теплоты (ТЭБ);  $Q_{\text{ТЭБ}j}$  – мощность, рассеиваемая  $j$ -м ло-

кальным источником теплоты;  $q_{cp}$  – поверхностная плотность теплового потока на объект воздействия от окружающей среды;  $L$  – кривая, ограничивающая площадь биологического объекта, на который осуществляется тепловое воздействие,  $n$  – нормаль к кривой  $L$ ,  $n = (xh + yg)$ ;  $h$ ,  $g$  – единичные вектора.

Решение уравнений (4.8) и (4.13) даст возможность определить изменение температуры в различных точках объекта воздействия – участка кожного покрова, подвергающегося тепловым процедурам, а также отследить ее изменение в зависимости от величины теплового потока от ТЭС (холодопроизводительности и теплопроизводительности ТЭБ), внешних условий. Для ее решения использован численный метод конечных элементов, схожий с методикой, изложенной в параграфе 2.1.

На основе расчетной модели для определения температурного поля области человеческого организма при тепловом воздействии ТЭС проведен численный эксперимент.

Расчет проводился в соответствии с необходимыми режимами проведения косметологических процедур: температура объекта воздействия –  $273 \div 318$  К, продолжительность воздействия –  $5 \div 15$  мин., возможность чередования режима нагрева и охлаждения. В системе предполагается использование 9 стандартных ТЭМ, расположенных в три ряда. В качестве исходных принимались следующие данные:  $\lambda = 0,6$  Вт/(м·К),  $c = 3458$  Дж/(кг·К),  $\rho = 1041$  кг/м<sup>3</sup> [38, 76],  $T|_{\tau=0} = 295$  К. Геометрические размеры ТЭС и объекта воздействия приведены на рисунке 4.6. Для упрощения представления и интерпретации результатов численного эксперимента в качестве объекта воздействия рассматривается участок поверхности кожного покрова человека квадратной формы.

Результаты произведенных расчетов рассмотрены на рисунках 4.7-4.11.

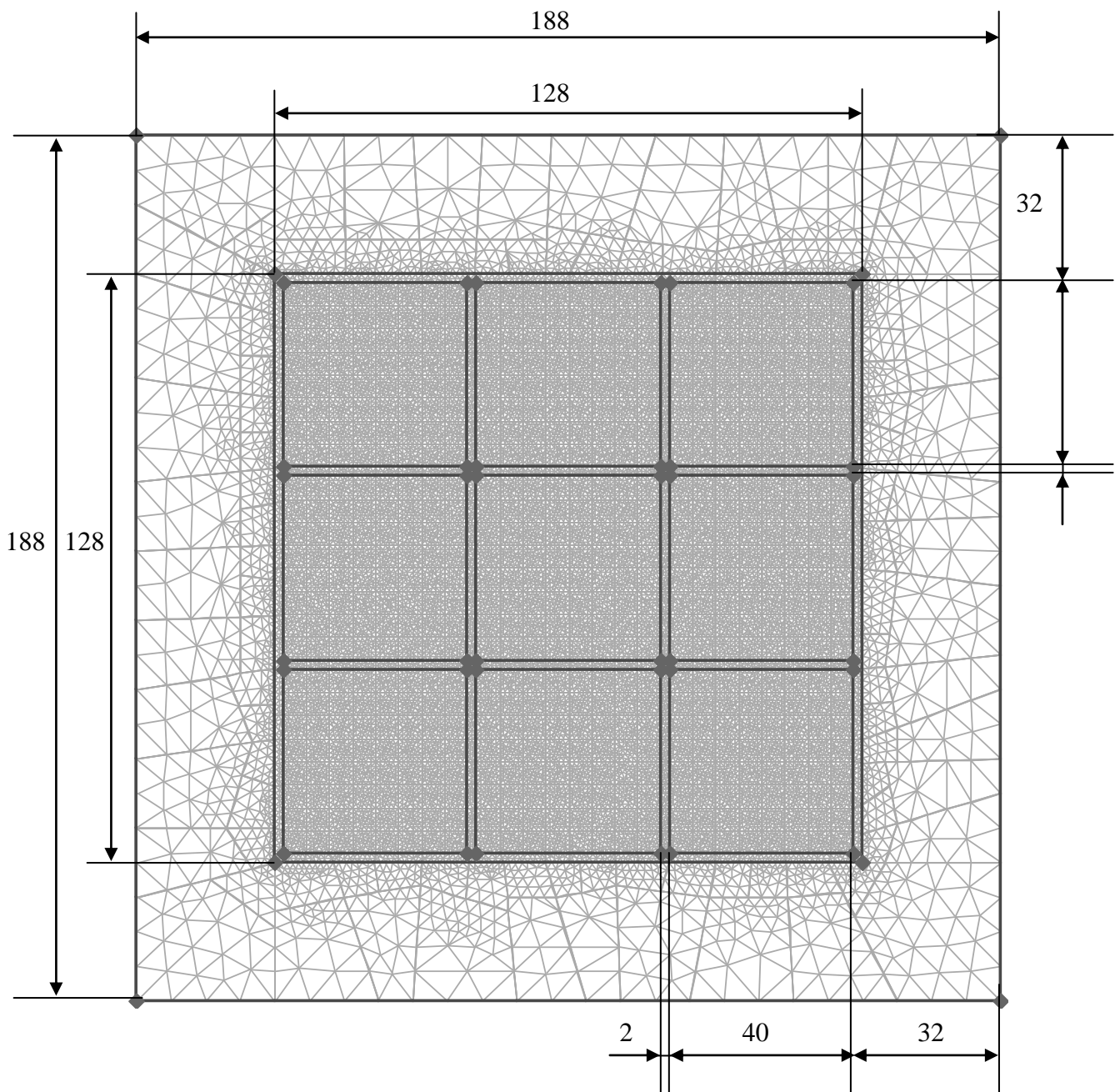


Рисунок 4.6 - Модель блока системы ТЭУ – биологический объект с конечноэлементной сеткой и размерами

На рисунках 4.7 и 4.9 представлены двумерные температурные поля биологического объекта при воздействии на него ТЭС, работающей в режиме охлаждения и нагрева при тепловом потоке от каждой ТЭБ соответственно  $q_{ТЭБ} = -1600 \text{ Вт/м}^2$   $q_{ТЭБ} = 800 \text{ Вт/м}^2$ . На рисунках 4.8 и 4.10 представлено распределение температуры в системе вдоль ее вертикальной оси при различных величинах холодо- и теплопроизводительности ТЭБ.

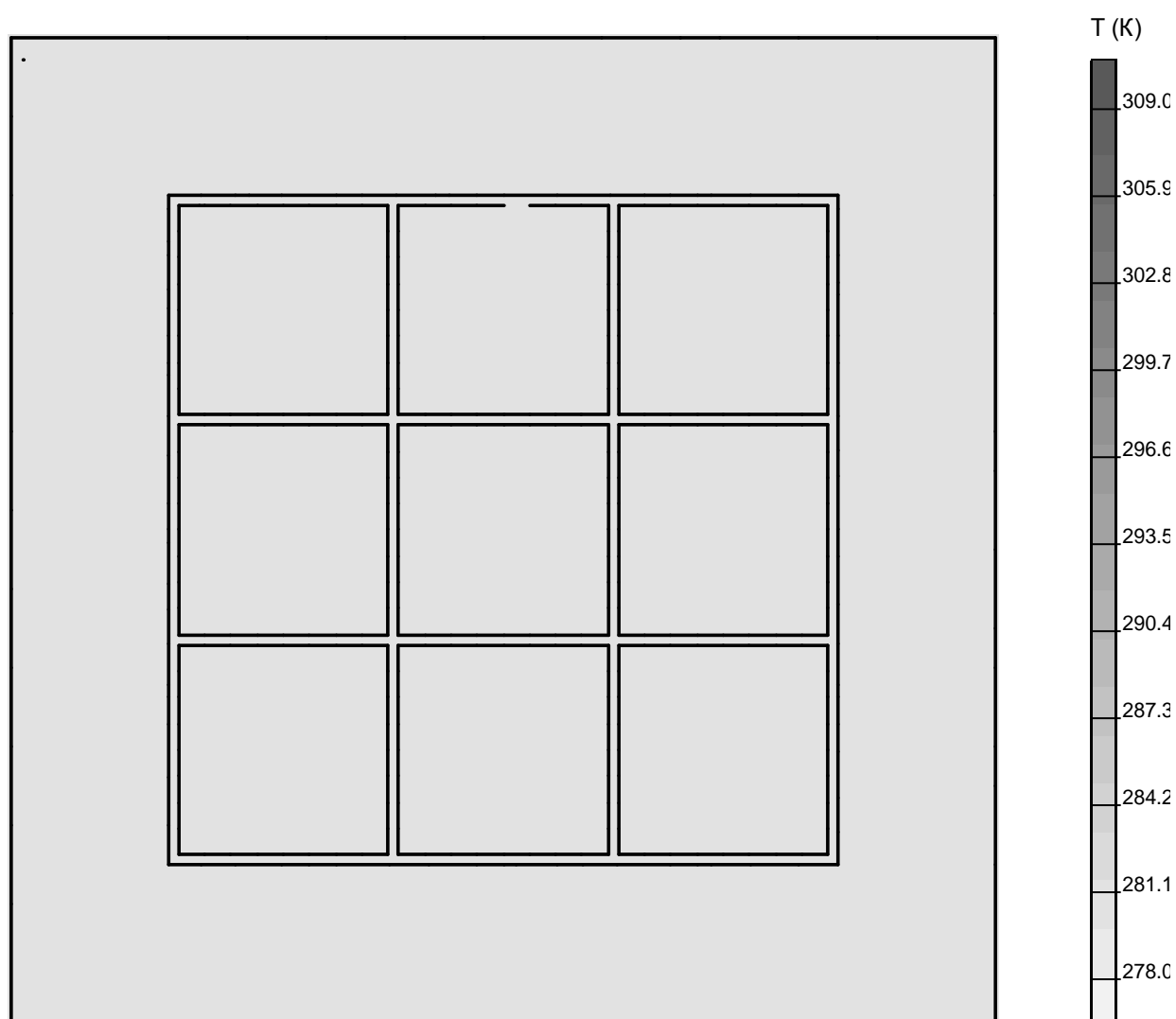


Рисунок 4.7 - Двумерное температурное поле системы ТЭС – биологический объект в стационарном режиме при  $q_{ТЭБ} = -1600 \text{ Вт/м}^2$

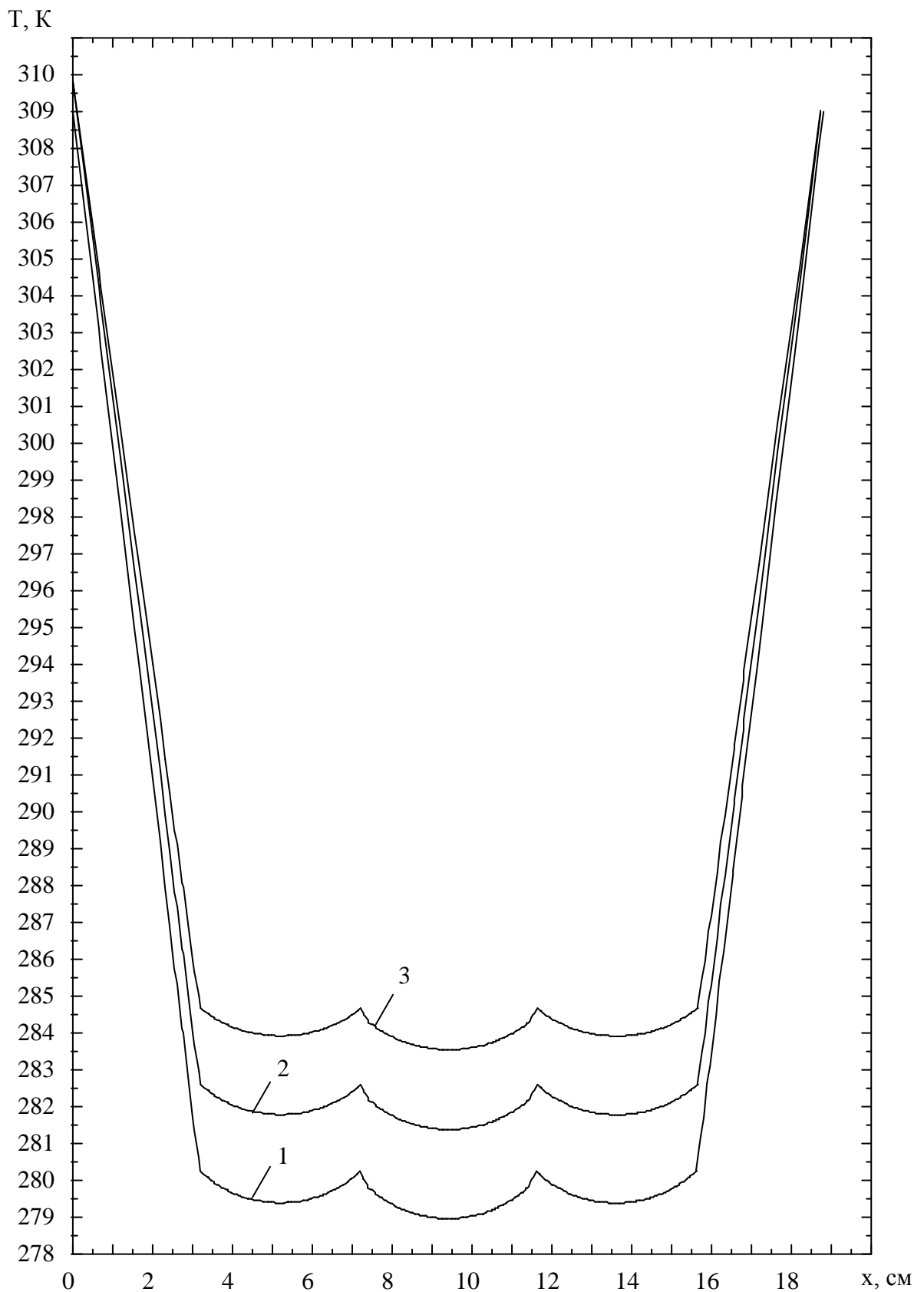


Рисунок 4.8 - Изменение температуры системы ТЭС – биологический объект вдоль вертикальной оси в стационарном режиме при различных величинах холодопроизводительности ТЭБ  
 1 –  $q_{ТЭБ} = -2000 \text{ Вт/м}^2$ ; 2 –  $q_{ТЭБ} = -1600 \text{ Вт/м}^2$ ; 3 –  $q_{ТЭБ} = -1200 \text{ Вт/м}^2$

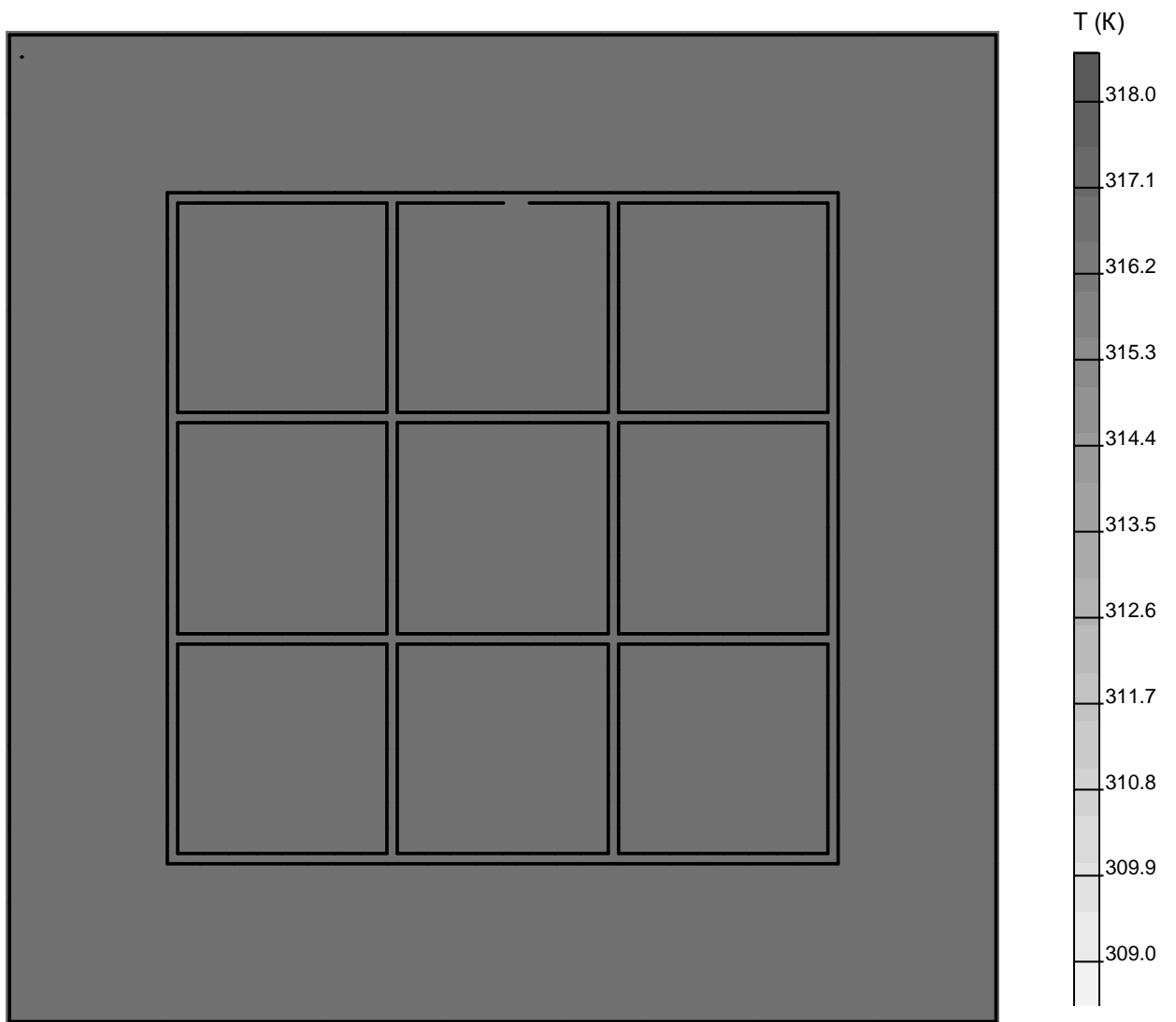


Рисунок 4.9 - Двумерное температурное поле системы ТЭС – биологический объект в стационарном режиме при  $q_{ТЭБ} = 800 \text{ Вт/м}^2$



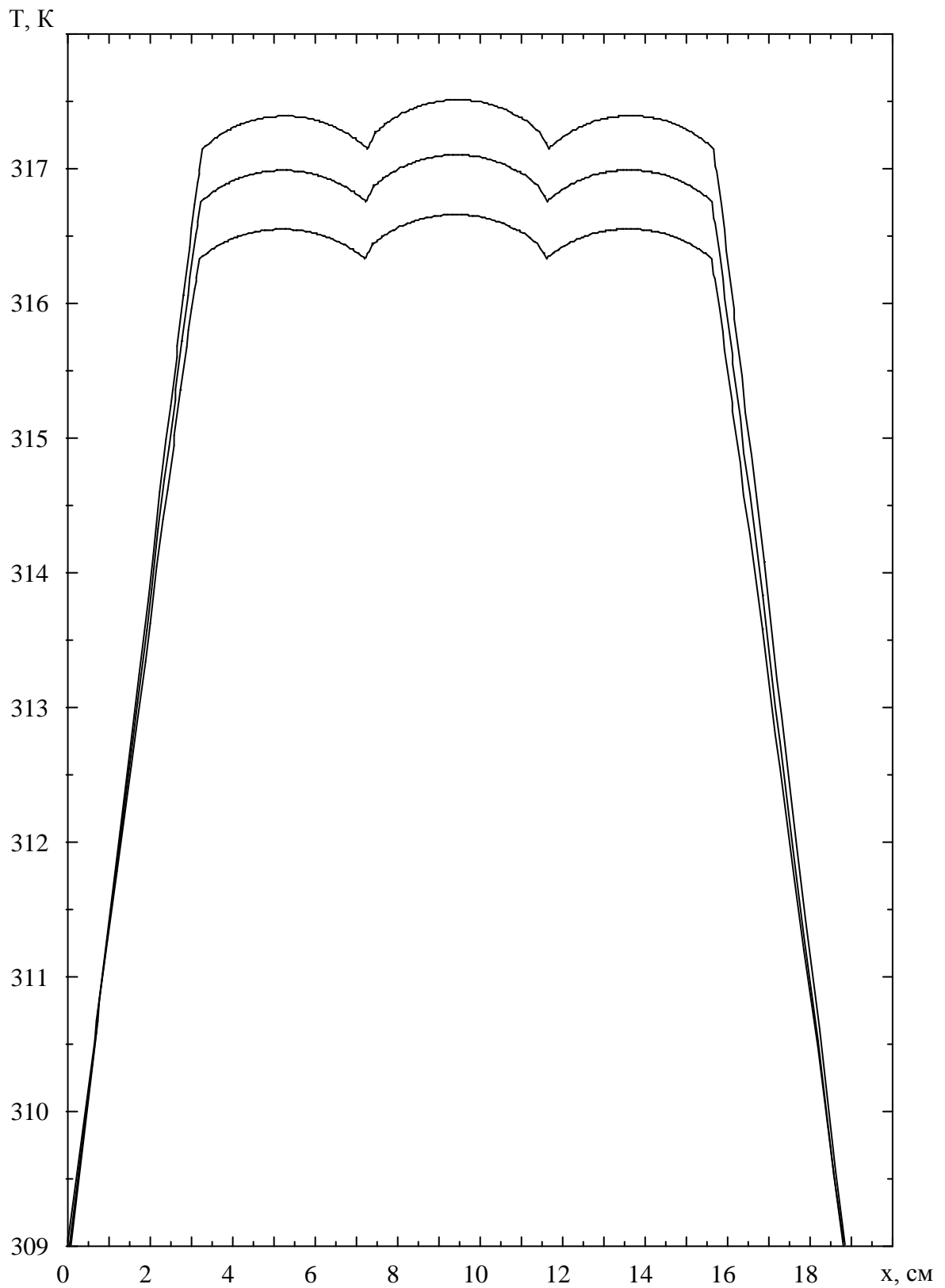


Рисунок 4.10 - Изменение температуры системы ТЭС – биологический объект вдоль вертикальной оси в стационарном режиме при различных величинах холодопроизводительности ТЭБ

1 –  $q_{TЭБ} = 900 \text{ Вт/м}^2$ ; 2 –  $q_{TЭБ} = 800 \text{ Вт/м}^2$ ; 3 –  $q_{TЭБ} = 700 \text{ Вт/м}^2$ ;

Согласно полученным зависимостям единовременная работа всех ТЭБ в одинаковом режиме приводит к общему охлаждению, либо нагреву всей зоны воздействия. При этом с увеличением значения теплового потока имеет место снижение температуры биологического объекта при работе ТЭБ в режиме охлаждения и ее рост при работе ТЭБ в режиме нагрева. Так, в соответствии с рисунками 4.8 и 4.10, увеличение холодопроизводительности термомодулей с  $1200 \text{ Вт/м}^2$  до  $2000 \text{ Вт/м}^2$  снижает температуру области воздействия с  $283,5 \text{ К}$  до  $279 \text{ К}$ , а увеличение их теплопроизводительности с  $700 \text{ Вт/м}^2$  до  $900 \text{ Вт/м}^2$  - увеличивает ее температуру с  $316,6 \text{ К}$  до  $317,6 \text{ К}$ . При этом в соответствии с приведенными зависимостями имеет место незначительное превышение температурного уровня в центральной части области воздействия (соответствует месту расположения центральной ТЭБ) по отношению к остальной ее части. Указанное обстоятельство определяется дополнительным воздействием на эту зону соседних ТЭБ, причем отклонение температуры тем больше, чем выше величина теплового потока при работе ТЭС как в режиме охлаждения, так и нагрева. Так, по данным рисунка 4.8 данное отклонение температуры в центральной области зоны биологического объекта от средней составляет около  $0,5 \text{ К}$ . Ввиду не критичности такого малого отклонения температуры от средней величины при проведении лечебных процедур целесообразность применения ТЭС на практике следует признать целесообразным.

Помимо единовременного охлаждения и нагрева областей поверхности тела человека при оздоровительных процедурах представляет интерес контрастное тепловое воздействие, когда одновременно в биологическом объекте производится снижение температуры одних его областей и повышение других.

Для случая реализации ТЭС, как это показано на рисунке 4.6 исследованы варианты шахматного и коридорного расположения холодных и горячих зон.

На рисунке 4.11 показано двумерное температурное поле объекта воздействия. Также получены одномерные зависимости вдоль вертикальной и

горизонтальной оси системы: прибор - биологический объект при шахматном чередовании холодных и горячих зон в стационарном режиме. В соответствии с результатами расчета для формирования зон с температурами 283,5 К и 312 К могут быть использованы ТЭБ с холодопроизводительностью 1600 Вт/м<sup>2</sup> и теплопроизводительностью 600 Вт/м<sup>2</sup>. Однако, в отличие от ранее рассмотренных случаев, в указанных условиях на величину температуры в центральной зоне объекта воздействия существенное влияние будут оказывать соседние ТЭБ, формирующие тепловой поток обратного знака. Согласно полученным данным разность температур нагретых зон по бокам и в центре устройства составляет примерно 7 К. Данное обстоятельство во многих случаях недопустимо при проведении лечебных процедур, рассчитанных на одинаковые температурные уровни областей зоны воздействия. В этих условиях для формирования необходимого температурного уровня в центре зоны воздействия на биологический объект необходимо использование более мощной ТЭБ, при одинаковой величине тока питания с другими батареями, входящими в состав ТЭС, имеющей большую холодо- или теплопроизводительность. Другим возможным вариантом решения указанной проблемы является использование двух режимов работы ТЭБ в ТЭС. Например, ТЭБ, размещаемые по бокам могут работать в режиме максимального холодильного коэффициента, характеризующегося большей экономичностью, но меньшей вырабатываемой мощностью, а ТЭБ, находящиеся в центре устройства, работать в режиме максимальной холодопроизводительности, менее экономичном, но дающем возможность получить большие значения теплового потока. При использовании указанного способа выравнивания температурного уровня в зонах воздействия биологического объекта необходимо предусмотреть в устройстве более высокую величину тока питания центральных ТЭБ по сравнению с остальными батареями. Этого можно добиться, например, за счет смешанного соединения ТЭБ в системе, а также применения двухканального источника электрической энергии, через один канал которого осуществляется питание центральных ТЭБ, а через другой – всех остальных. Для численного эксперимента, условия которого соответствуют ри-

сунку 4.11, необходимое увеличение теплового потока центральной ТЭБ составило порядка  $400 \text{ Вт/м}^2$ .

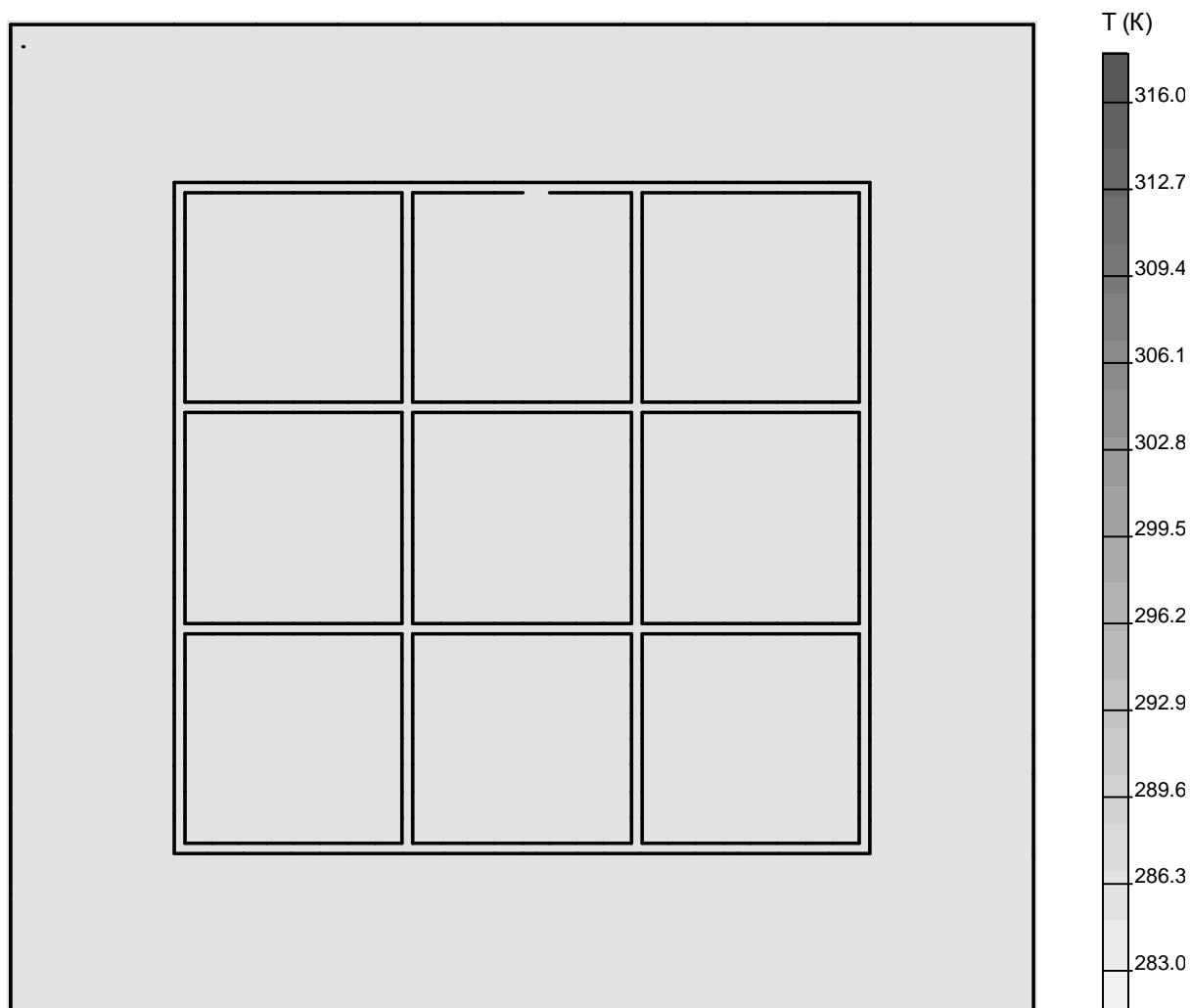


Рисунок 4.11 - Двумерное температурное поле системы ТЭС – биологический объект в стационарном режиме при шахматном расположении холодных и горячих зон

$$q_{\text{ТЭБх}} = -1600 \text{ Вт/м}^2; q_{\text{ТЭБг}} = 600 \text{ Вт/м}^2$$

На рисунке 4.12 представлено двумерное температурное поле в системе при коридорном расположении холодных и горячих зон и величине  $q_{\text{ТЭБх}} = -2000 \text{ Вт/м}^2$  и  $q_{\text{ТЭБг}} = 1000 \text{ Вт/м}^2$ . При таком режиме работы устройства также наблюдается отличие в температурных уровнях центральной и боковых однознаковых областей зоны теплового воздействия. Однако в данном случае, в отличие от распределения температуры при шахматном чередовании хо-

лодных и горячих областей, температура в центральной области по уровню ниже, чем в боковых. Поэтому для успешного проведения косметологических процедур необходимо уменьшить величину формируемого теплового потока центрального модуля. Этого можно добиться по аналогии с предыдущим случаем либо применением менее мощной ТЭБ, либо использованием двух различных режимов работы ТЭБ. В соответствии с расчетами тепловой поток центрального модуля для получения одинакового температурного уровня во всех областях зоны воздействия должен быть уменьшен примерно на  $650 \text{ Вт/м}^2$ .

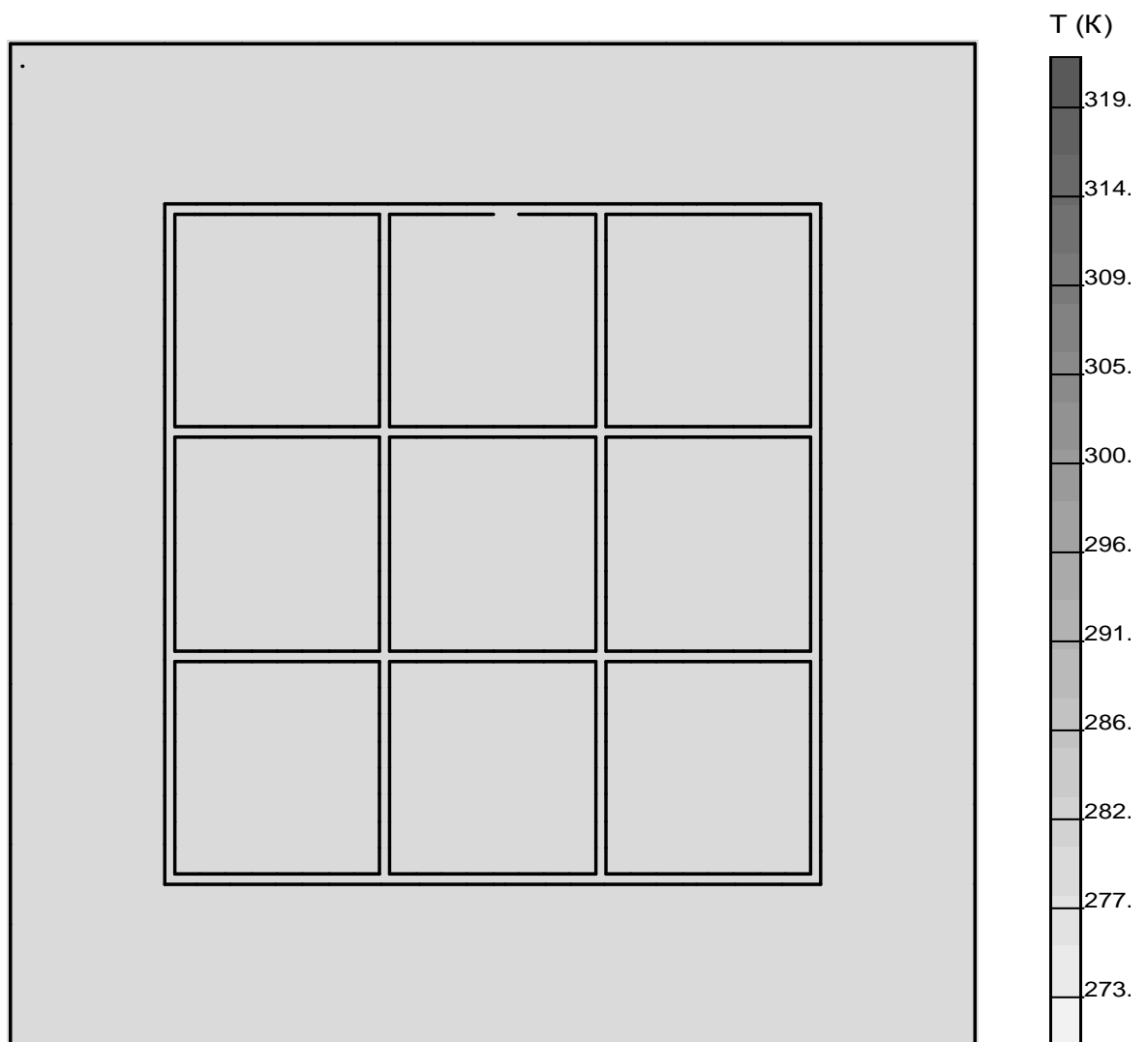


Рисунок 4.12 - Двумерное температурное поле системы ТЭС – биологический объект в стационарном режиме при коридорном расположении холодных и горячих зон

$$q_{\text{ТЭБх}} = -2000 \text{ Вт/м}^2; q_{\text{ТЭБг}} = 1000 \text{ Вт/м}^2$$

Для исследования временных параметров исследуемой ТЭС в работе получены графики изменения температуры отдельных точек области биологического объекта, подвергаемой тепловому воздействию, во времени. Они представлены на рисунках 4.13-4.15. Для случая, представленного на рисунке 4.13 биологический объект охлаждается, 4.14 – нагревается, рисунок 4.15 – производится контрастное тепловое действие. Согласно расчетным данным продолжительность выхода системы на установившийся режим невелика. Так, время, необходимое для термостабилизации биологического объекта, находится в пределах 7-8 мин. Однако, более эффективным будет вариант, когда система будет включаться до проведения процедур для вывода ее на рабочий режим и уже затем будут осуществляться оздоровительные процедуры.

На основе анализа полученных значений теплового потока, формируемых ТЭС, эквивалентных величине холодо- и теплопроизводительности ТЭМ, может быть произведен расчет характеристик последних. Искомыми величинами в данном случае являются геометрические размеры ТЭ, входящих в состав ТЭБ, величина питающего электрического тока, потребляемая электрическая энергия. Подробное описание методики расчета данных характеристик ТЭБ приведено в [5]. При этом в большинстве случаев в ТЭС могут быть использованы ТЭБ стандартного типа, подбор которых может быть произведен с использованием специальных пакетов прикладных программ. Для исследуемого варианта ТЭС, например, могут быть использованы стандартные ТЭМ типа ДН D-127-14-04 (производитель ООО НПО Кристалл, г. Королев), либо ТВ-199-1,4-0,6 (производитель ООО Криотерм, г. Санкт-Петербург), в полной мере реализующие требуемые режимы проведения терапевтических процедур. Для их подбора может быть использован пакет прикладных программ Thermoelectric system calculation [189]. Данное программное обеспечение позволяет получить зависимости изменения таких параметров ТЭБ, как холодопроизводительность, холодильный коэффициент от его токовых характеристик.

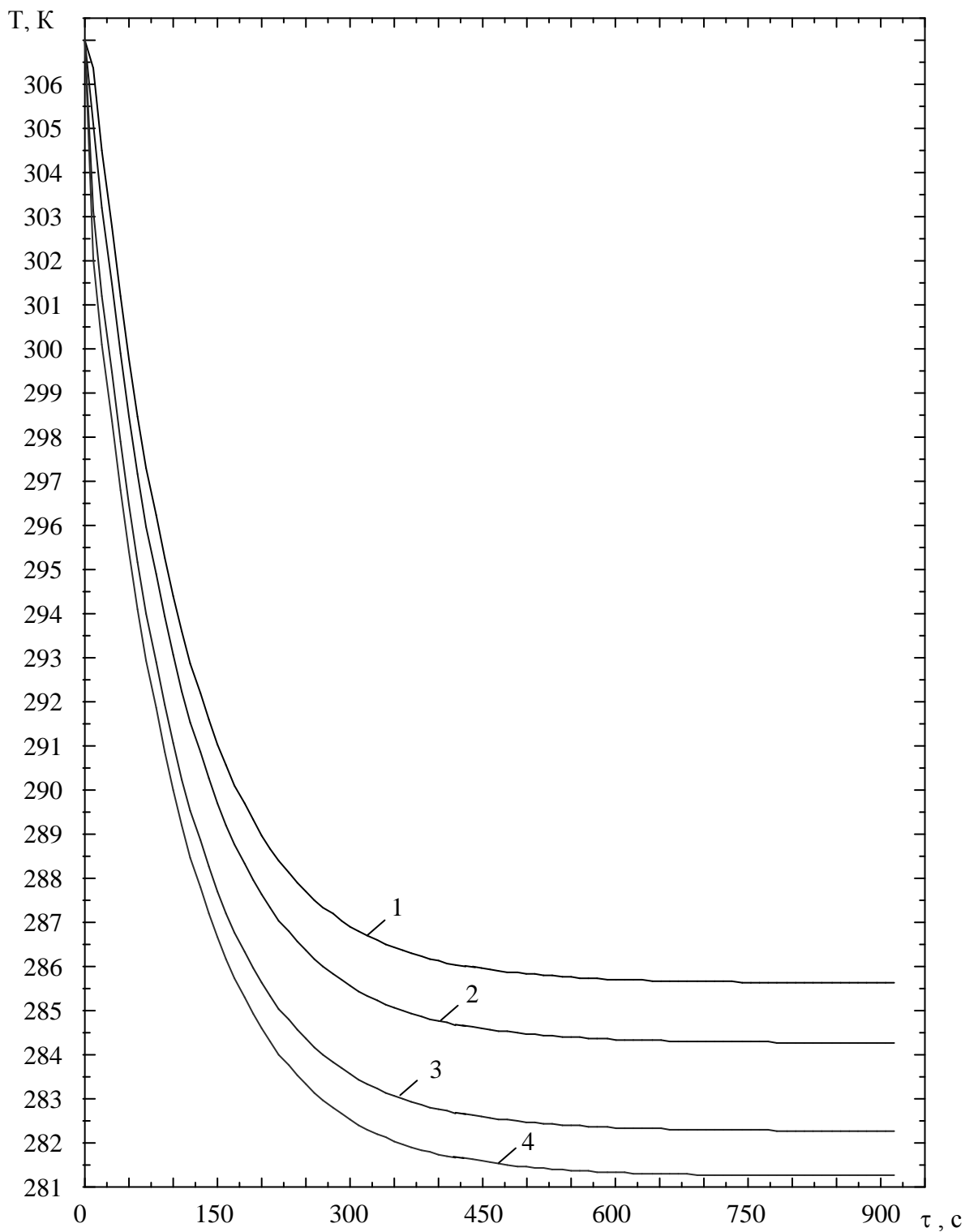


Рисунок 4.13 - Изменение температуры холодной зоны биологического объекта во времени при различных значениях холодопроизводительности ТЭБ

1 –  $q_{\text{ТЭБ}} = -1100 \text{ Вт/м}^2$ ; 2 –  $q_{\text{ТЭБ}} = -1300 \text{ Вт/м}^2$ ; 3 –  $q_{\text{ТЭБ}} = -1500 \text{ Вт/м}^2$ ;  
 4 –  $q_{\text{ТЭБ}} = -1700 \text{ Вт/м}^2$

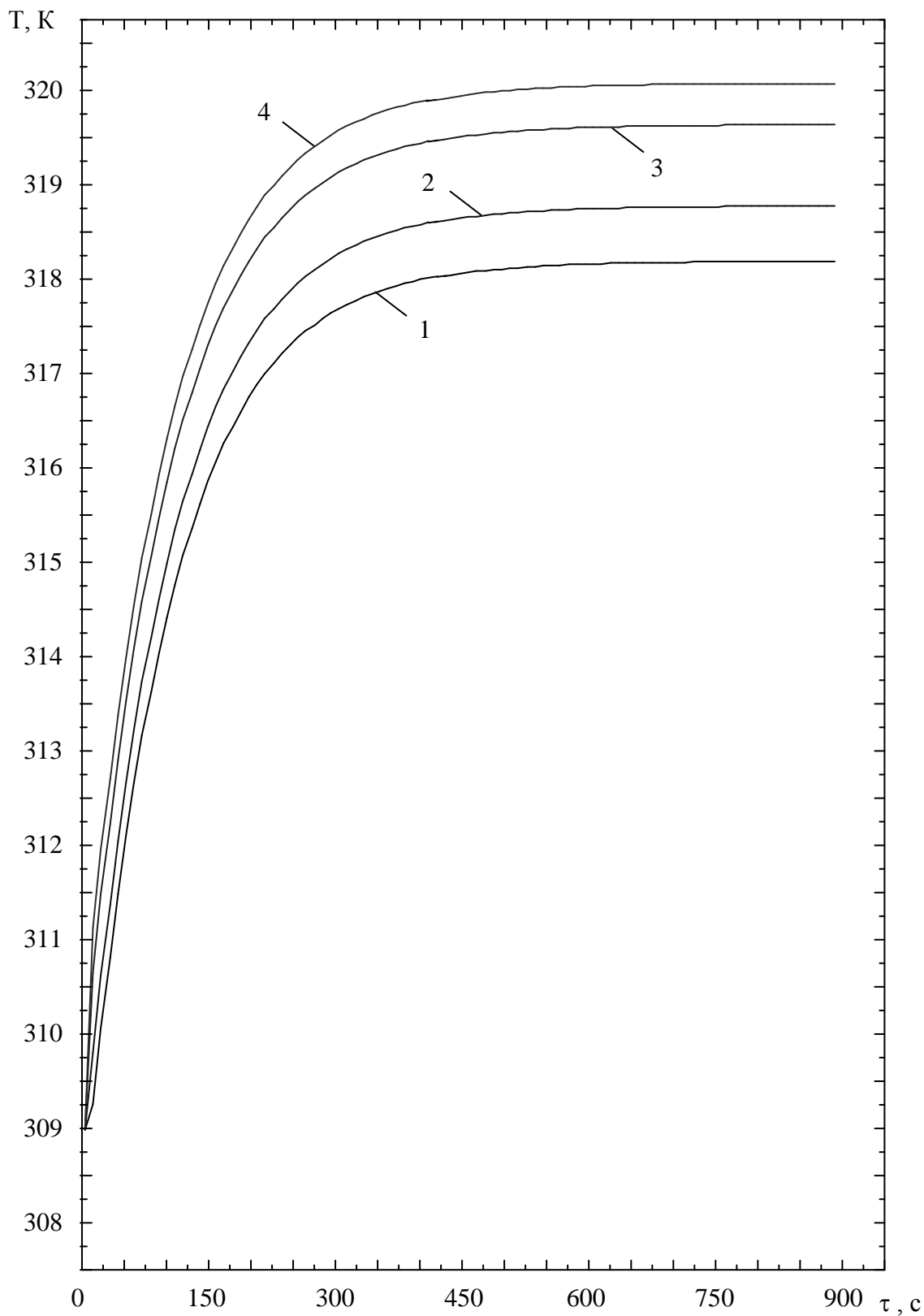


Рисунок 4.14 - Изменение температуры горячей зоны биологического объекта во времени при различных значениях теплопроизводительности ТЭБ

1 –  $q_{TЭБ} = 1000 \text{ Вт/м}^2$ ; 2 –  $q_{TЭБ} = 1100 \text{ Вт/м}^2$ ; 3 –  $q_{TЭБ} = 1250 \text{ Вт/м}^2$ ;  
 4 –  $q_{TЭБ} = 1350 \text{ Вт/м}^2$



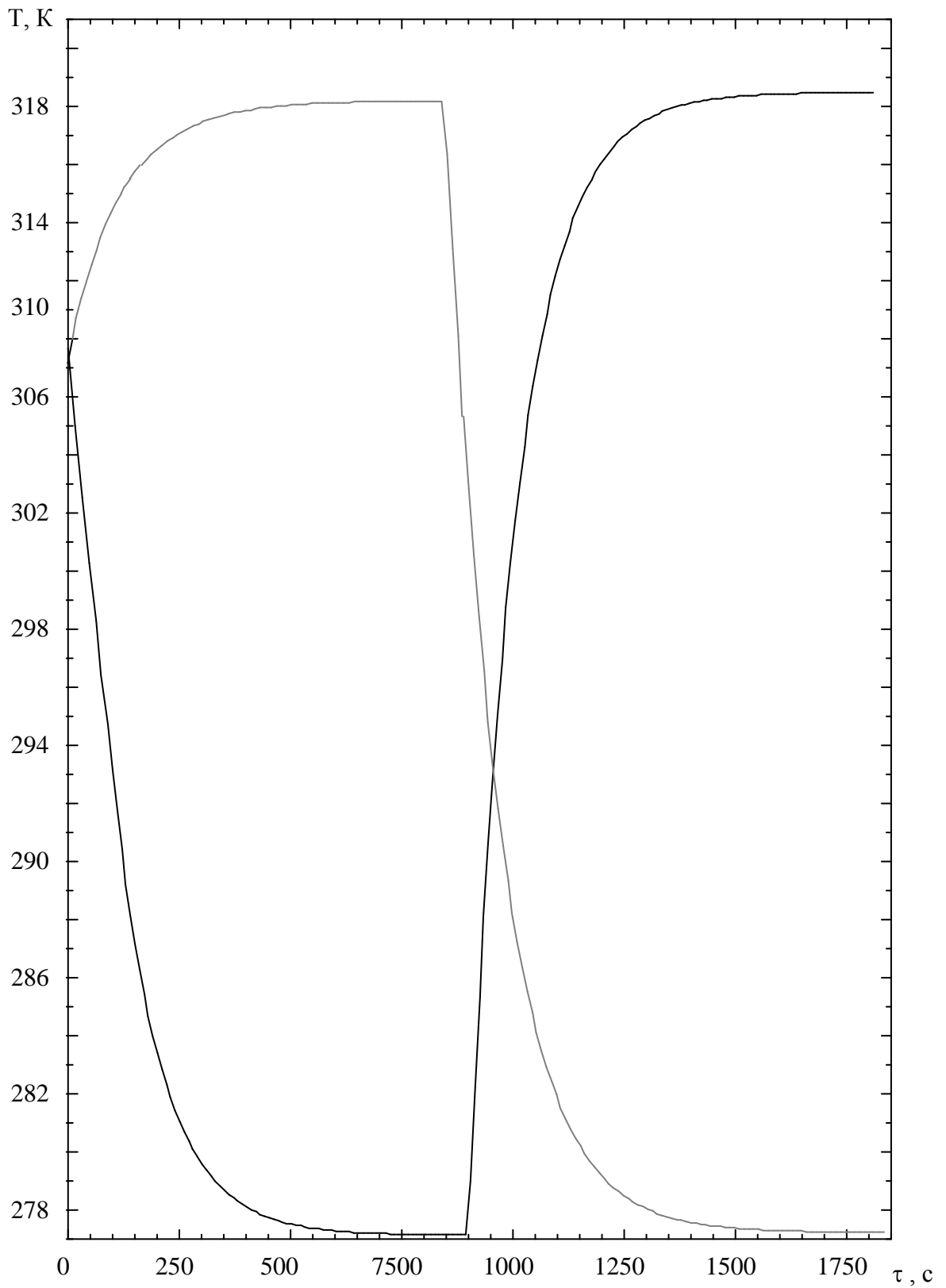


Рисунок 4.15 - Изменение температуры холодной и горячей зон биологического объекта во времени при контрастном динамическом тепловом воздействии

$$q_{\text{ТЭБх}} = -1850 \text{ Вт/м}^2; q_{\text{ТЭБг}} = 1100 \text{ Вт/м}^2$$

### **4.3 Математическая модель и теоретические исследования термоэлектрической системы для внутриполостного теплового воздействия**

В настоящее время в медицинской практике широко применяются различные виды немедикаментозных методик проведения лечебных процедур. Среди них следует выделить локальное охлаждение и нагрев внутренних полостей, которые активно применяют в оториноларингологии, гинекологии, проктологии, урологии, косметологии [23, 30, 182, 198, 200].

ТЭС для внутриполостного теплового воздействия должна учитывать определенные ограничения, связанные со следующими специфическими условиями ее эксплуатации:

- труднодоступность объекта воздействия;
- высокая влажность рабочей среды;
- высокая степень локализации воздействия и точности дозировки теплоты;
- наличие значительных теплопритоков к объекту воздействия из окружающей среды.

В системе должны быть реализованы все перечисленные условия. Ее исполнение возможно в различных конструктивных вариантах, из которых выделим следующие:

- ТЭБ является самостоятельным (автономным) узлом, а охлаждение осуществляется посредством передачи тепла за счет использования высокотеплопроводного протяженного материала (например, медного или алюминиевого теплопровода), либо за жидкого или газообразного счет хладагента;
- ТЭБ имеет непосредственный тепловой контакт с объектом воздействия через воздействующий наконечник специальной конфигурации;
- реализован совмещенный вариант, в случае которого используются две ТЭБ, основная, представляющая собой автономный узел и дополнительная, непосредственно сопрягаемая с биологическим объектом.

Анализ возможностей каждой из перечисленных схем, а также режимов проведения лечебных процедур, дает возможность сделать вывод о том, что наиболее приемлем на практике третий вариант, который дает возможность получить высокие тепловые мощности (в отличие от второго варианта, когда может быть использована только маломощная и малогабаритная ТЭБ) и снизить тепловые потери по длине теплопровода для сопряжения основной ТЭБ и объекта воздействия.

При анализе работы ТЭУ представляет интерес не только знание закономерностей протекания стационарных теплофизических процессов в приборе, но и исследование переходного процесса при проведении медицинских процедур в различных режимах. Это необходимо для оценки такого важного параметра прибора, как длительность его выхода на требуемый режим работы, а также расчета динамических характеристик устройства. Для определения данных показателей разработана квазистационарная модель ТЭС для внутрисполостного теплового воздействия, в которой сама система рассматривается как совокупность взаимосвязанных элементов: основной и дополнительной ТЭБ, теплообменных средств, теплоизоляции, воздействующего наконечника, реализующих необходимые режимы охлаждения биологического объекта.

Тепловая модель ТЭС для внутрисполостного теплового воздействия представлена на рисунке 4.16. В ней ТЭБ 1 через наконечник из высоко-теплопроводного материала с теплоемкостью  $c_n$  и тепловой проводимостью  $\sigma_n$  первыми спаями сопряжена с биологической тканью, имеющей соответственно теплоемкость  $c_t$  и тепловую проводимость  $\sigma_t$ . Вторые спаи ТЭБ 1 сопряжены с торцевой поверхностью теплопровода, имеющего теплоемкость  $c_{тп}$  и тепловую проводимость  $\sigma_{тп}$ , вторая торцевая поверхность которого приведена в тепловой контакт с первыми спаями второй ТЭБ 2. Вторые спаи ТЭБ 2 сопряжены с теплообменным аппаратом с теплоемкостью  $c_p$  и тепловой проводимостью  $\sigma_p$  и имеют температуру  $T_p$ . Температура теплообменного аппарата поддерживается равной  $T_{та}$ . Через ТЭБ 1 и ТЭБ 2 протекает ток

плотностью соответственно  $j_1$  и  $j_2$ . Кроме того, предполагается, что теплообмен между тканью и кровью происходит в любой точке рассматриваемого биологического объекта и характеризуется удельной мощностью объемных источников теплоты  $Q_{\text{вн}}$ .

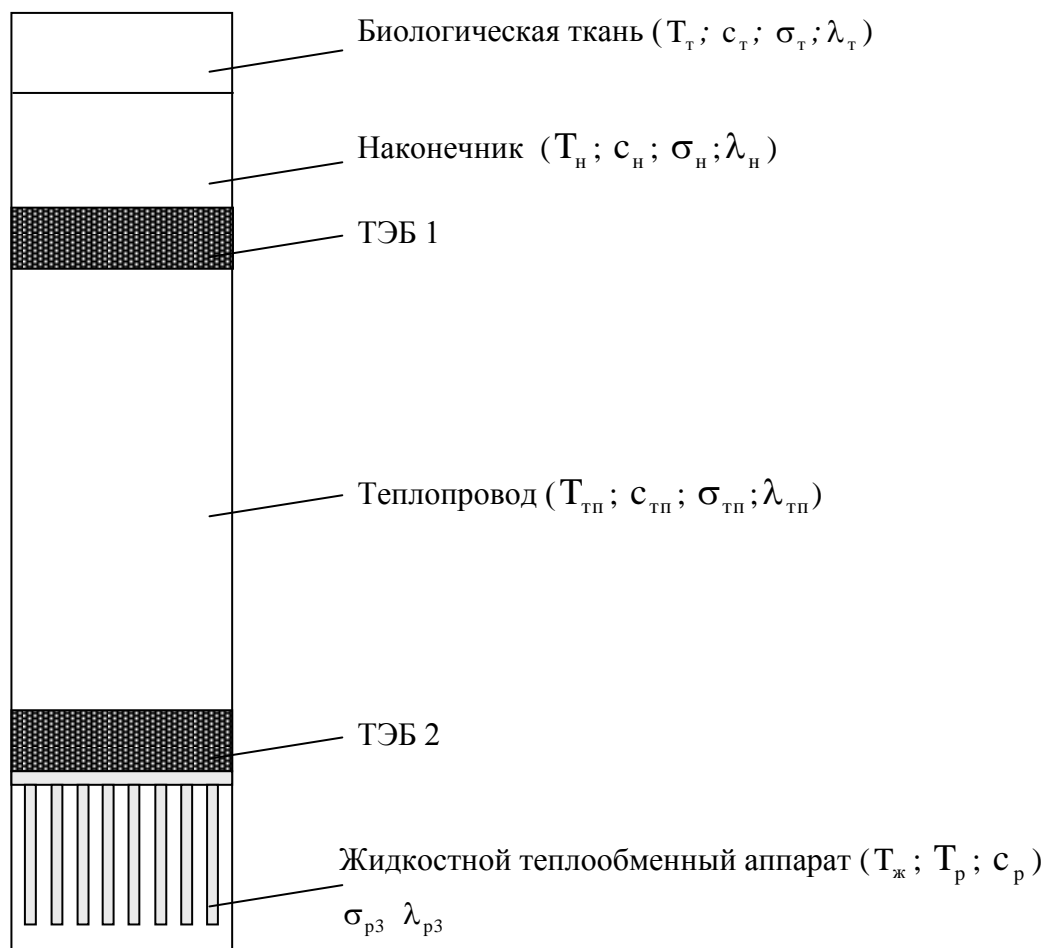


Рисунок 4.16 - Расчетная схема ТЭС для внутрисполостного теплового воздействия

Тепловая модель описывается следующей системой уравнений: [68]:

$$\left. \begin{aligned}
\frac{dT_t}{d\tau} &= \frac{1}{m_t c_t} \left[ \sigma_t (T_H - T_t) + Q_{\text{вн}} + k_{\text{cp}} (T_{\text{cp}} - T_t) \right] \\
\frac{dT_H}{d\tau} &= \frac{1}{m_H c_H} \left[ n_1 S_1 \left[ -\alpha_1 j_1 T_H + \frac{1}{2} j_1^2 \rho_1 h_1 + \frac{\lambda_1}{h_1} (T_{\text{тп}} - T_H) \right] - k_{\text{cp}} (T_{\text{cp}} - T_H) \right] \\
\frac{dT_{\text{тп}}}{d\tau} &= \frac{1}{m_{\text{тп}} c_{\text{тп}}} \left[ n_2 S_2 \left[ -\alpha_2 j_2 T_{\text{тп}} + \frac{1}{2} j_2^2 \rho_2 h_2 + \frac{\lambda_2}{h_2} (T_p - T_{\text{тп}}) \right] + n_1 S_1 \left[ e_1 j_1 T_H + \frac{1}{2} j_1^2 \rho_1 h_1 + \frac{\lambda_1}{h_1} (T_{\text{тп}} - T_H) \right] - k_{\text{cp}} (T_{\text{cp}} - T_H) \right] \\
\frac{dT_p}{d\tau} &= \frac{1}{m_p c_p} \left[ n_2 S_2 \left[ \alpha_2 j_2 T_{\text{тп}} + \frac{1}{2} j_2^2 \rho_2 h_2 - \frac{\lambda_2}{h_2} (T_p - T_{\text{тп}}) \right] - \sigma_p (T_p - T_{\text{ж}}) \right]
\end{aligned} \right\} \quad (4.14)$$

где  $T_t$  – температура биологической ткани;  $T_H$  – температура наконечника устройства, имеющего тепловой контакт с биологическим объектом;  $T_{\text{тп}}$  – температура теплопровода;  $m_t$  – средняя масса ткани;  $m_{\text{H,тп,p}}$  – масса наконечника, теплопровода и радиатора ТЭБ 2;  $\alpha$  – коэффициент термо-э.д.с. ТЭ;  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление ТЭБ;  $h$  – высота ТЭ;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала ТЭ; индекс 1 соответствует основной ТЭБ, 2 – дополнительной ТЭБ;  $T_{\text{cp}}$  – температура окружающей среды,  $k_{\text{cp}}$  – коэффициент теплообмена с окружающей средой.

Начальные условия для системы уравнений (4.14) задаются при условии работы ТЭС в режиме холостого хода (контакт прибора с биологическим объектом отсутствует), исходя из предположения, что в начальный момент времени все элементы системы имеют температуру, равную температуре окружающей среды. При этом расчетные выражения имеют вид:

$$\left. \begin{aligned}
\frac{dT_H}{d\tau} &= \frac{1}{m_H c_H} \left[ n_1 S_1 \left[ -e_1 j_1 T_H + \frac{1}{2} j_1^2 \rho_1 h_1 + \frac{\lambda_1}{h_1} (T_{\text{тп}} - T_H) \right] - k_{\text{cp}} (T_{\text{cp}} - T_H) \right] \\
\frac{dT_{\text{тп}}}{d\tau} &= \frac{1}{m_{\text{тп}} c_{\text{тп}}} \left[ n_2 S_2 \left[ -e_2 j_2 T_{\text{тп}} + \frac{1}{2} j_2^2 \rho_2 h_2 + \frac{\lambda_2}{h_2} (T_p - T_{\text{тп}}) \right] + n_1 S_1 \left[ e_1 j_1 T_H + \frac{1}{2} j_1^2 \rho_1 h_1 + \frac{\lambda_1}{h_1} (T_{\text{тп}} - T_H) \right] - k_{\text{cp}} (T_{\text{cp}} - T_H) \right] \\
\frac{dT_p}{d\tau} &= \frac{1}{m_p c_p} \left[ n_2 S_2 \left[ e_2 j_2 T_{\text{тп}} + \frac{1}{2} j_2^2 \rho_2 h_2 - \frac{\lambda_2}{h_2} (T_p - T_{\text{тп}}) \right] - \sigma_p (T_p - T_{\text{ж}}) \right]
\end{aligned} \right\} \quad (4.15)$$

Для оценки длительности тепловой процедуры начальными являются условия, полученные из (4.15), а объект воздействия имеет температуру, рав-

ную 309 К. Также считается, что температуры наконечника, теплопровода и теплообменного аппарата равны температурам холодных и горячих спаев ТЭБ. Данное допущение несколько завышает продолжительность выхода устройства на режим, при этом полученные впоследствии результаты будут являться оценкой сверху. Также предполагаем, что температурные поля объекта воздействия, наконечника, теплопровода и теплообменного аппарата однородны.

Решение системы (4.14) и (4.15) осуществлено численным образом в пакете прикладных программ MATCAD методом конечных элементов. Расчет производился при следующих исходных данных:  $\alpha_{1,2} = 350 \cdot 10^{-6}$  В/К;  $h_{1,2} = 0,002$  м;  $\lambda = 3$  Вт/м·К;  $\rho = 0,0001$  Ом·м;  $c_{н,тп,р} = 380$  Дж/кг·К;  $c_{т} = 3458$  Дж/кг·К.

При этом выражения для определения тепловых проводимостей следующие :

$$\sigma_{н} = \frac{\lambda_{н} \cdot S_{н}}{\delta_{н}}, \quad \sigma_{тп} = \frac{\lambda_{тп} \cdot S_{тп}}{\delta_{тп}}, \quad \sigma_{р} = \frac{\lambda_{р} \cdot S_{р}}{\delta_{р}}, \quad \sigma_{т} = \frac{\lambda_{т} \cdot S_{т}}{\delta_{т}}, \quad (4.16)$$

где  $\lambda_{н}, \lambda_{тп}, \lambda_{р}, \lambda_{т}$  – коэффициенты теплопроводности наконечника, теплопровода, теплообменного аппарата, биологической ткани соответственно;  $S_{т,н,тп,р,т}$  – площадь поверхностей соприкосновения наконечника и биологического объекта, наконечника и ТЭБ 1, теплопровода и ТЭБ 2, ТЭБ 2 и теплообменного аппарата соответственно;  $\delta_{н}, \delta_{тп}, \delta_{р}, \delta_{т}$  – толщина соответственно наконечника, теплопровода, радиатора, биологического объекта. Исходные величины в выражениях (4.16) следующие:  $\lambda_{н} = 389$  Вт/м·К;  $\lambda_{тп} = 389$  Вт/м·К;  $\lambda_{р} = 389$  Вт/м·К;  $\lambda_{т} = 0,2$  Вт/м·К;  $S_{н} = 25 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>;  $S_{тп} = 10^{-4}$  м<sup>2</sup>;  $S_{р} = 36 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>;  $\delta_{н} = 0,01$  м;  $\delta_{тп} = 0,13$  м;  $\delta_{р} = 0,02$  м;  $\delta_{т} = 0,01$  м,  $k_{ср} = 10$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) .

На рисунках 4.17-4.22 приведены результаты расчета изменения температуры различных частей ТЭС во времени при  $T_{ср} = 298$  К для случая работы прибора в режиме холостого хода (рисунки 4.17-4.19) и при наличии тепловой нагрузки (рисунки 4.20-4.22). Рассмотрено изменение во времени температуры объекта воздействия, наконечника, теплопровода и жидкостного теплообменного аппарата при различных токах питания ТЭБ, а также для различных значений  $T_{ж}$ .

Как следует из расчетных данных, зависимости носят монотонный убывающий характер. Без тепловой нагрузки температура наконечника выходит в стационарный режим приблизительно через 4-4,5 минуты (рисунки 4.17-4.19). Данное обстоятельство необходимо учитывать при проведении медицинских процедур, то есть целесообразным является включение прибора до проведения процедур с целью вывода его на рабочий режим и уже затем воздействие на пациента.

При этом повышение силы тока, протекающего через ТЭБ вплоть до оптимального снижает температуру наконечника. Так, в соответствии с рисунком 4.19, увеличение силы тока дополнительной ТЭБ с 5 до 15 А при токе питания основной ТЭБ 50 А снижает значение  $T_n$  с 235 К до 220 К. Дальнейшее увеличение силы тока вызывает превалирование теплоты Джоуля над теплотой Пельтье, увеличивающее температуру объекта воздействия. Таким образом, при фиксированной температуре  $T_ж$  предельное снижение температуры воздействующего наконечника ограничено величиной оптимального для данного типа ТЭБ тока питания.

Получены зависимости, представленные на рисунке 4.20, отражающие временной ход температур охлаждаемого объекта, наконечника и теплопровода. Согласно расчету при токе питания основной и дополнительной ТЭБ соответственно равном 25 и 10 А температура биологического объекта достигает 273 К через 2 мин. Снизить это время можно увеличив силу питающего тока ТЭБ. Так, для рассматриваемого случая увеличение силы тока с 20 до 50 А даст возможность сократить это время с 4 до 1,5 мин.

Из результатов анализа полученных данных (рисунок 4.21) следует, что при увеличении силы тока питания основной ТЭБ с 20 А до своего оптимального значения, при котором имеет место максимальное уменьшение температуры на холодном спае ТЭ (для рассмотренного типа ТЭБ - 50 А), отношение изменения температуры к изменению силы тока снижается. Так, для данного случая при промежутке времени, необходимом для достижения стационарного режима 10 мин, при увеличении силы тока питания с 20 А до 35 А температура биологического объекта понижается с 257 К до 242 К, а увеличение силы тока с 35 А до 50 А снижает температуру уже с 238 К до 230 К.

Дальнейшее повышение силы тока приводит к преобладанию теплоты Джоуля, увеличивающей температуру ткани. Еще больше уменьшить температуру биологического объекта можно, снизив значение  $T_{ж}$ . Данное обстоятельство иллюстрирует рисунок 4.22, где изображено изменение температуры биологического объекта во времени для различных величин  $T_{ж}$  (ток питания основной ТЭБ – 30 А, дополнительной ТЭБ - 15 А). Из анализа представленных зависимостей следует, что для уменьшения температуры биологической ткани до 250 К при  $T_{ж}=288$  К требуется примерно на 2 мин. меньше, чем в случае, когда  $T_{ж}=298$  К.

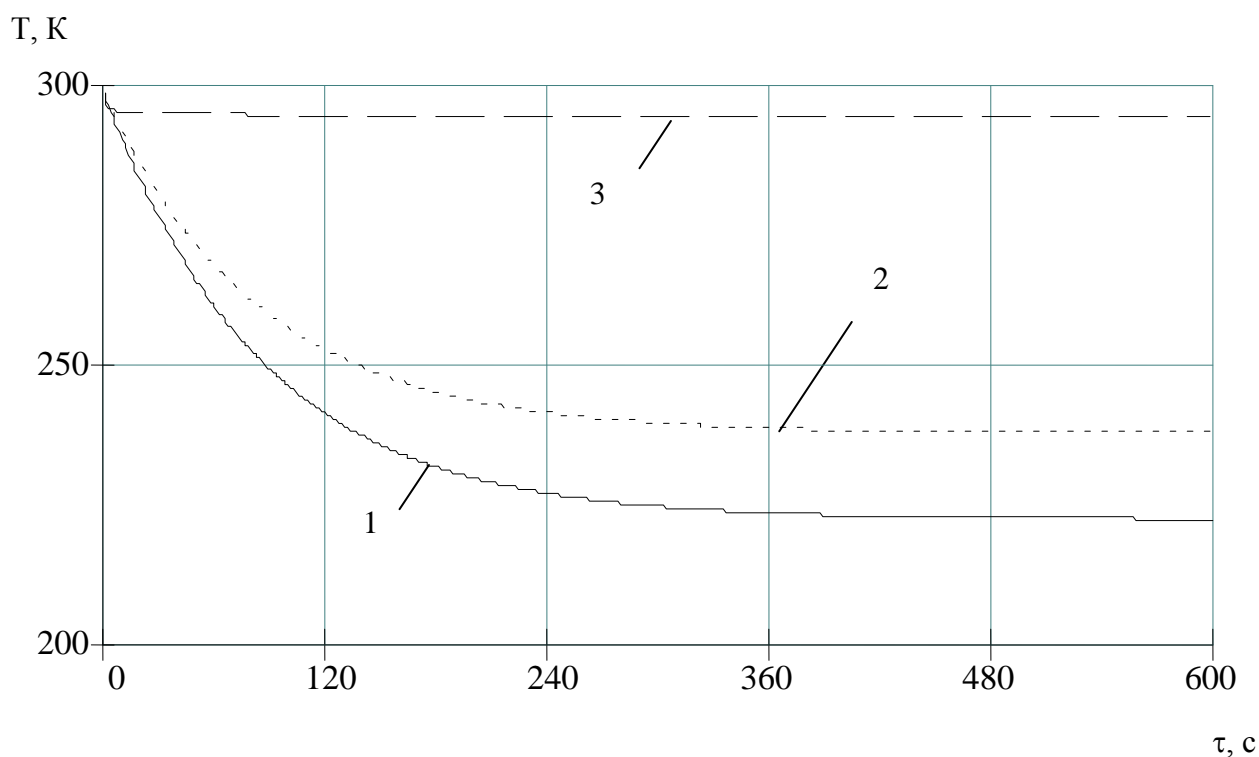


Рисунок 4.17 - Изменение температуры отдельных частей ТЭС во времени без тепловой нагрузки

- 1 – температура наконечника
- 2 – температура теплопровода
- 3 – температура жидкостного теплообменного аппарата



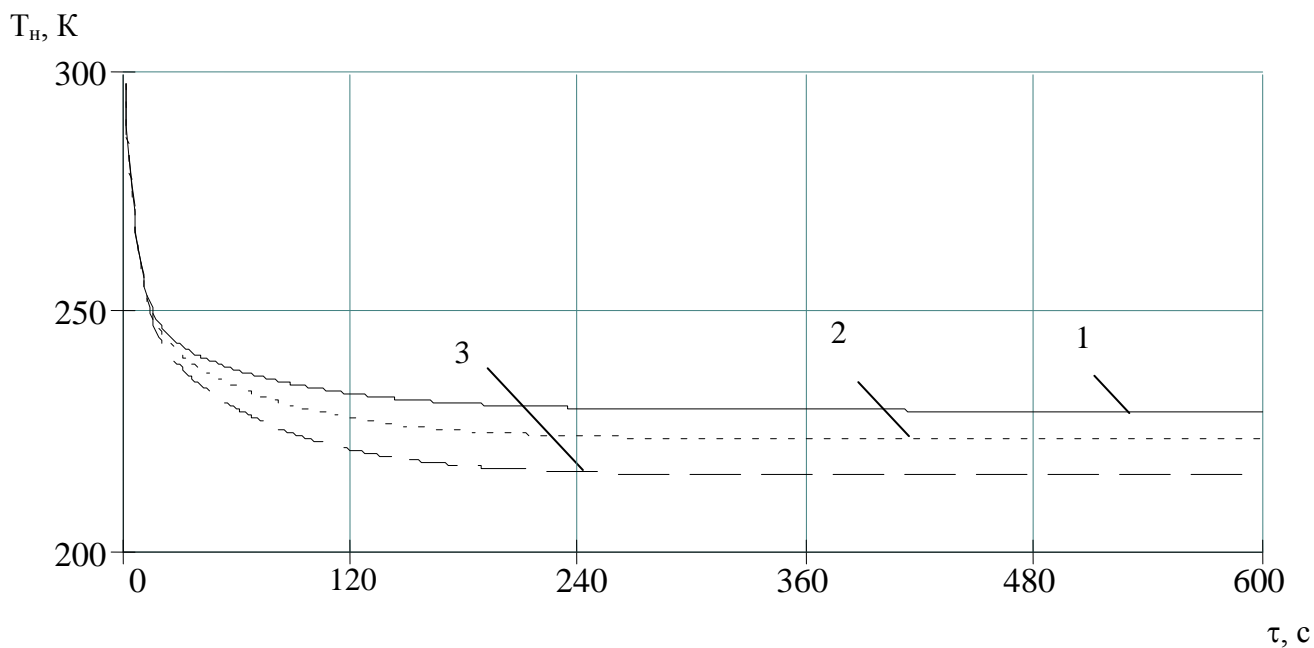


Рисунок 4.18 - Изменение температуры воздействующего наконечника во времени без нагрузки при различных токах питания дополнительной ТЭБ  
1 – 5 А, 2 – 10 А, 3 – 15 А

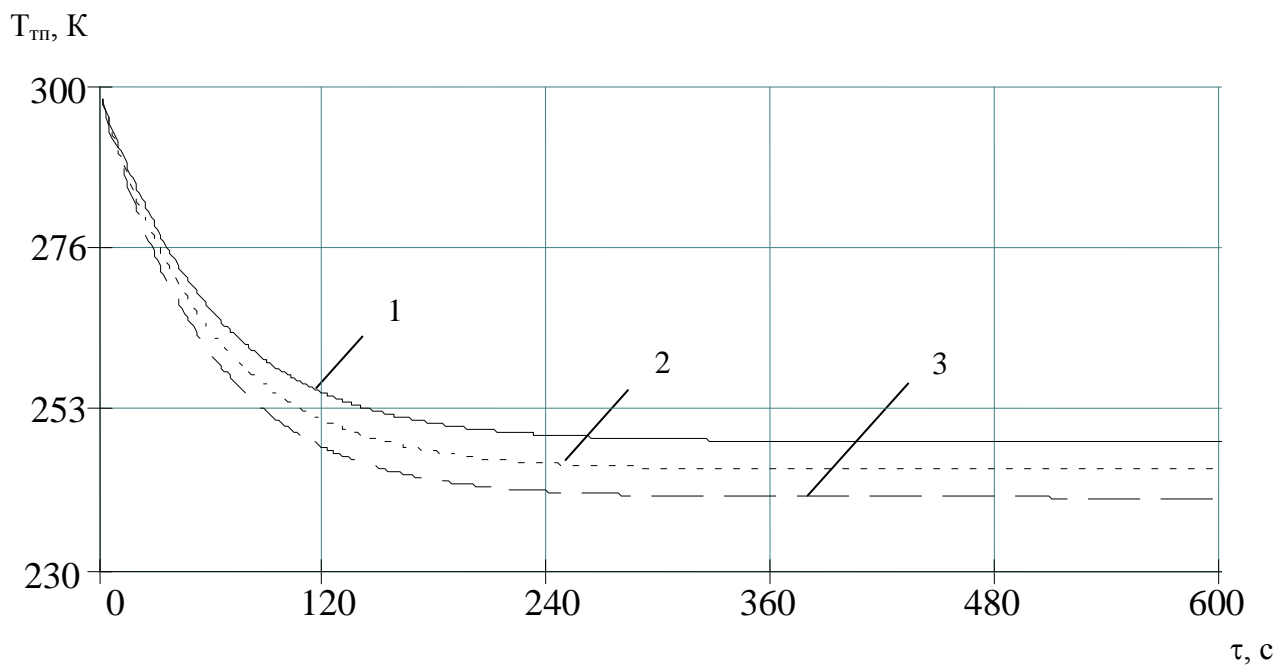


Рисунок 4.19 - Изменение температуры теплового мостика во времени без нагрузки при различных токах питания дополнительной ТЭБ  
1 – 5 А, 2 – 10 А, 3 – 15 А

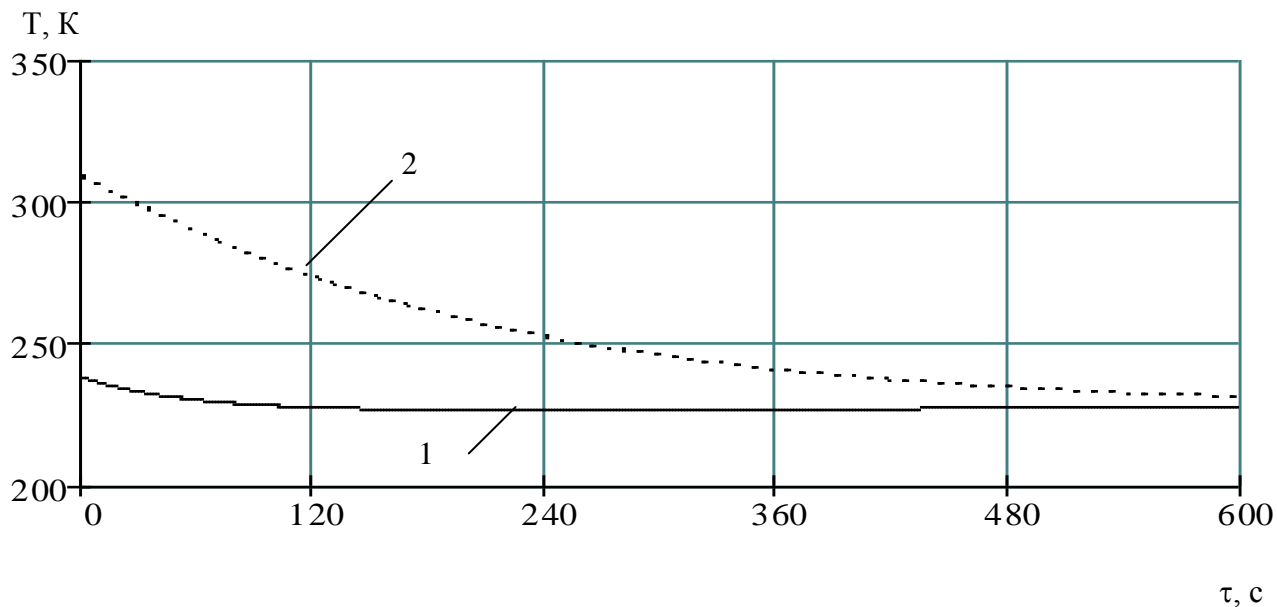


Рисунок 4.20 - Изменение температуры ТЭС - объект воздействия во времени  
 1 – температура воздействующего наконечника  
 2 – температура объекта воздействия

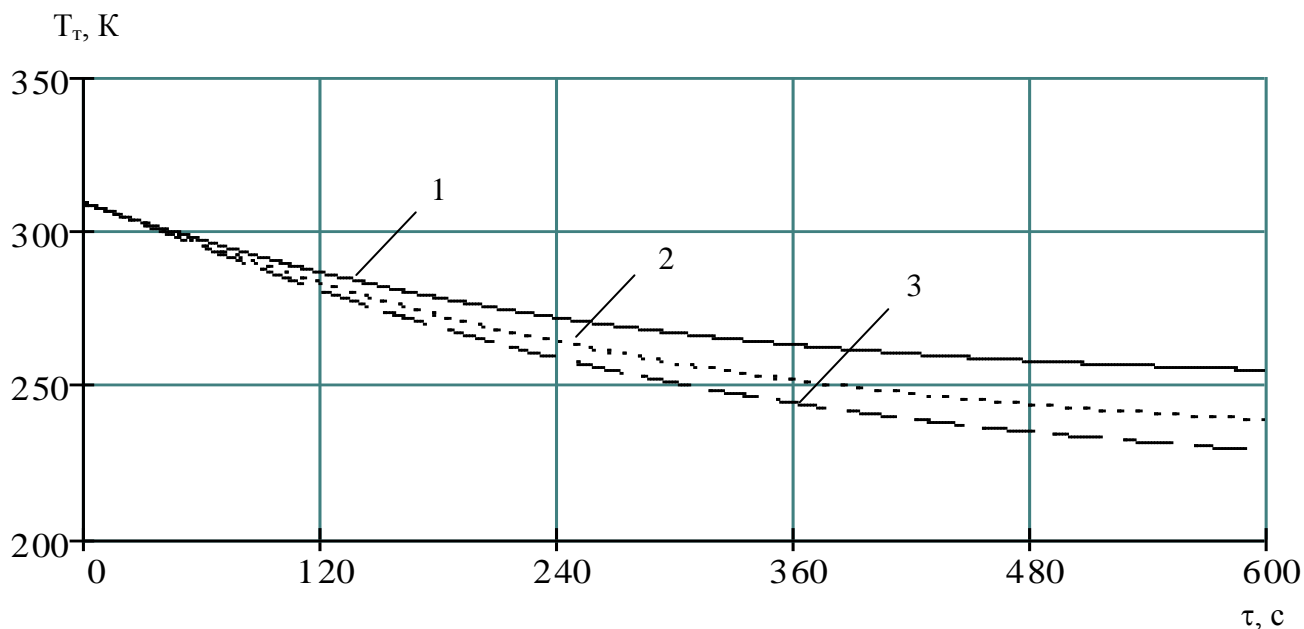


Рисунок 4.21 - Изменение температуры объекта воздействия во времени при различных токах питания основной ТЭБ  
 1 – 20 А, 2 – 35 А, 3 – 50 А

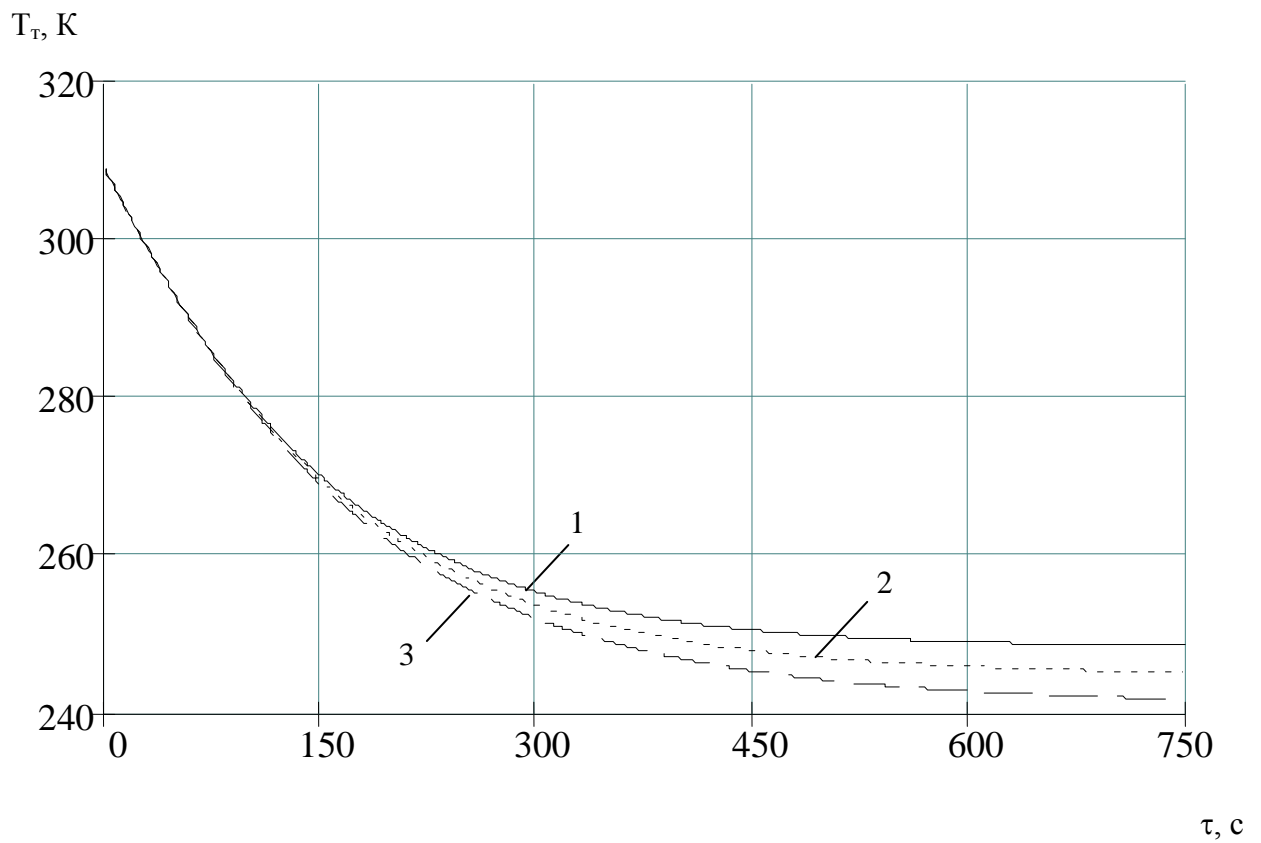


Рисунок 4.22 - Изменение температуры объекта воздействия во времени при различных температурах жидкости в теплообменном аппарате  
1 – 298 К, 2 – 293 К, 3 – 288 К

## **ГЛАВА 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ НА ОСНОВЕ СИЛЬНОТОЧНЫХ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ**

### **5.1 Экспериментальные исследования системы охлаждения элементов радиоэлектронной аппаратуры в режиме повторно-кратковременных тепловыделений**

Натурные испытания системы охлаждения элементов РЭА, работающих в режиме повторно-кратковременных тепловых нагрузок с применением плавящихся рабочих веществ проводились на экспериментальном стенде, структура которого представлена на рисунке 5.1, а внешний вид изображен на рисунке 5.3 [66].

Исследование ТЭС выполнялось на опытном образце, конструкция которого с соответствующими геометрическими размерами показана на рисунке 5.2. Опытный образец системы представляет собой емкость 1, имеющую цилиндрическую форму, боковая поверхность которой изготовлена из фторопласта, а основания – из латунных пластин. Емкость заполнена рабочим веществом 2 - парафином.

При исследовании процесса плавления рабочего вещества (рисунок 5.1, *а*) на верхнем основании устанавливался тепловыделяющий элемент 3 - плоский нагреватель, питаемый энергией от источника электрического тока 4. Отводные трубки 5 применялись для компенсации изменения объема рабочего вещества при его плавлении.

Исследование затвердевания рабочего агента проводилось в соответствии со схемой, изображенной на рисунке 5.1, *б*. Согласно нее емкость соприкасалась с ТЭБ 6, теплосъем с горячих спаев которой осуществлялся жидкостным теплообменным аппаратом 7. ТЭБ питалась от регулируемого источника постоянного тока 8. Ток, проходящий через ТЭБ, и напряжение на ней контролировались встроенными в источник питания приборами.

Для измерения температуры источника тепловыделений, спаев ТЭБ, радиатора использовались медь-константановые термопары 9, опорные спаи

которых находились в сосуде Дьюара 10. Выходные сигналы с термопар регистрировались измерительным комплексом ИРТМ 11, подключаемым к персональной ЭВМ 12, фиксирующей его показания через заданные промежутки времени.

В соответствии с методикой измерений после проверки исправности и надежности тепловых и электрических контактов, на питающей аппаратуре выставлялось определенное значение мощности тепловыделяющего элемента, имитирующего РЭА, (при исследовании плавления вещества) и питающего ТЭБ тока (при исследовании затвердевания вещества), устанавливался определенный промежуток времени для регистрации температуры.

В результате эксперимента измерялись ток и напряжение на плоском электронагревателе и ТЭБ; температура опытного образца ТЭС, холодных и горячих спаях ТЭБ, жидкостного теплообменного аппарата.

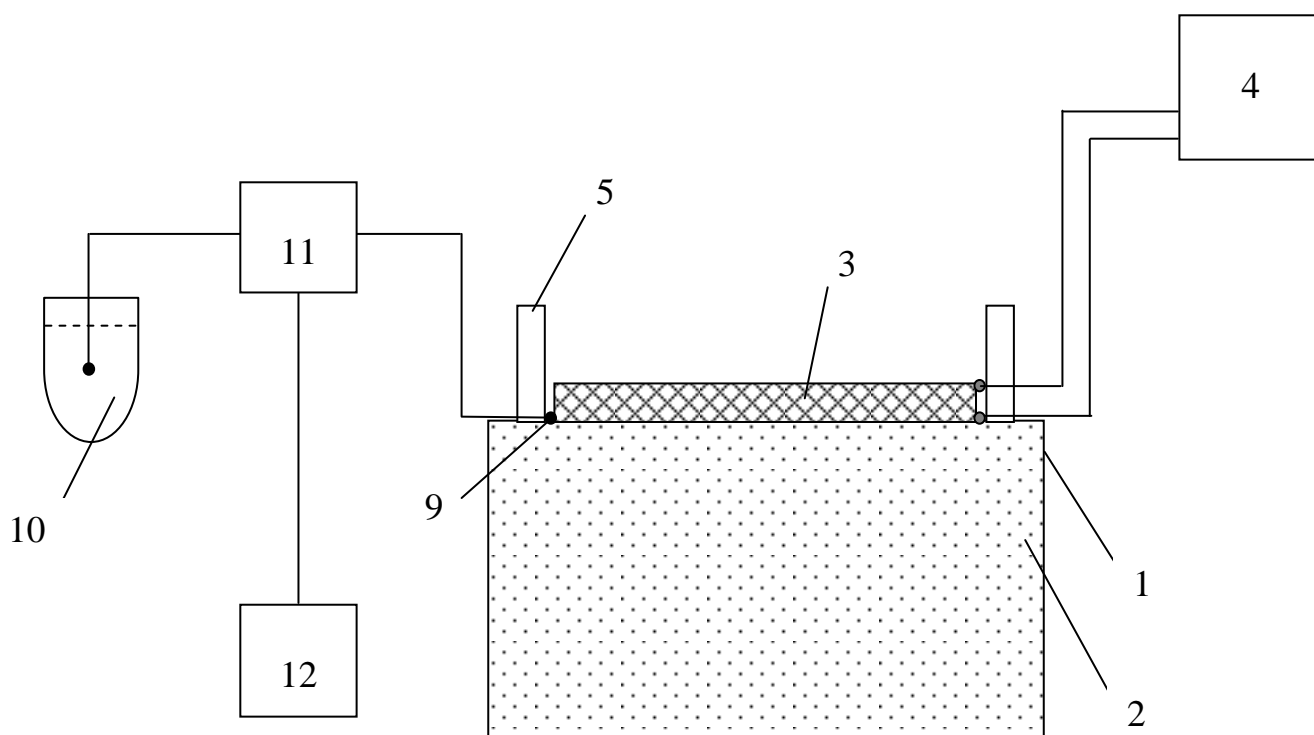


Рисунок 5.1, а - Схема экспериментального стенда при исследовании процессов плавления рабочих наполнителей

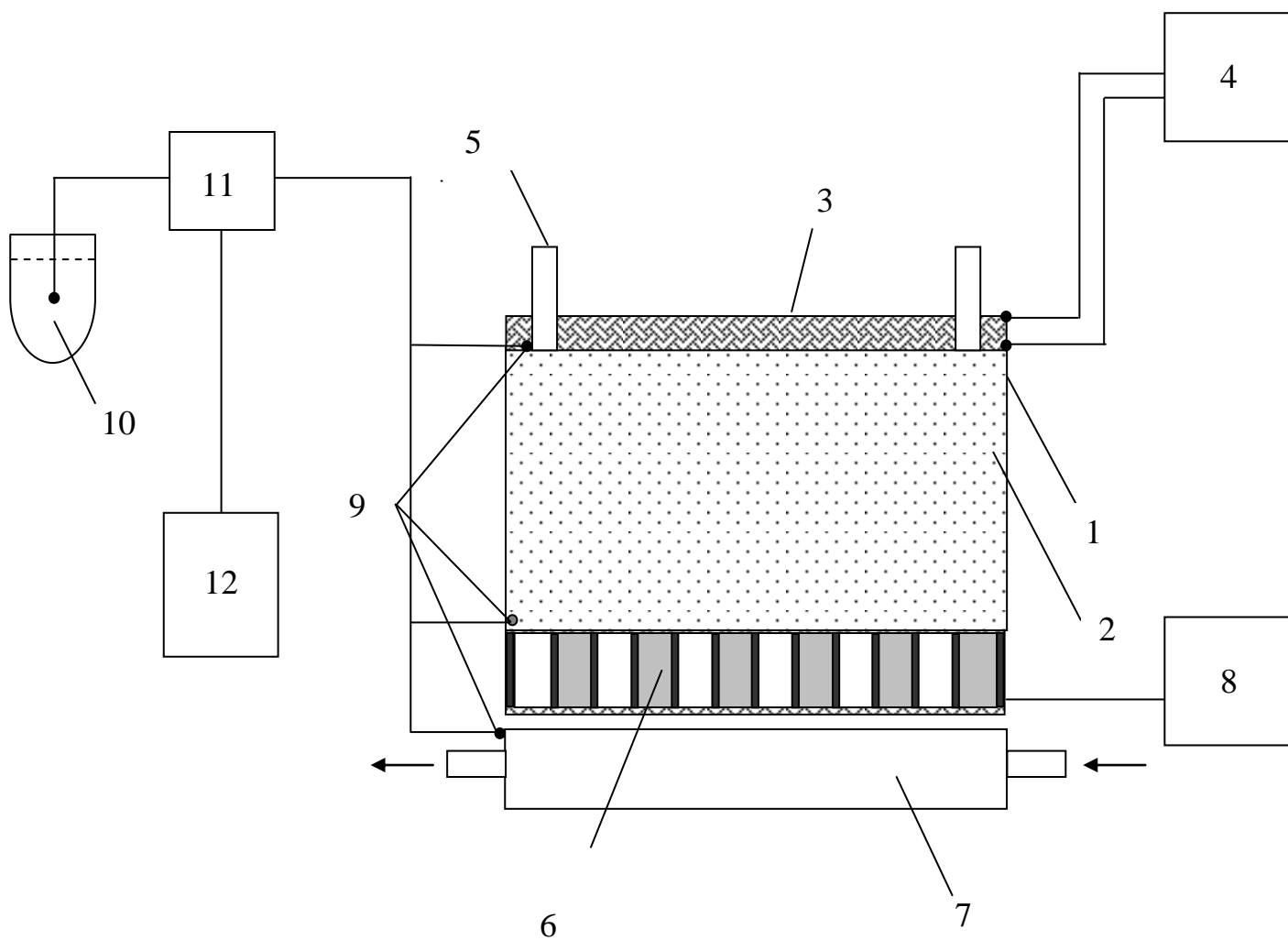
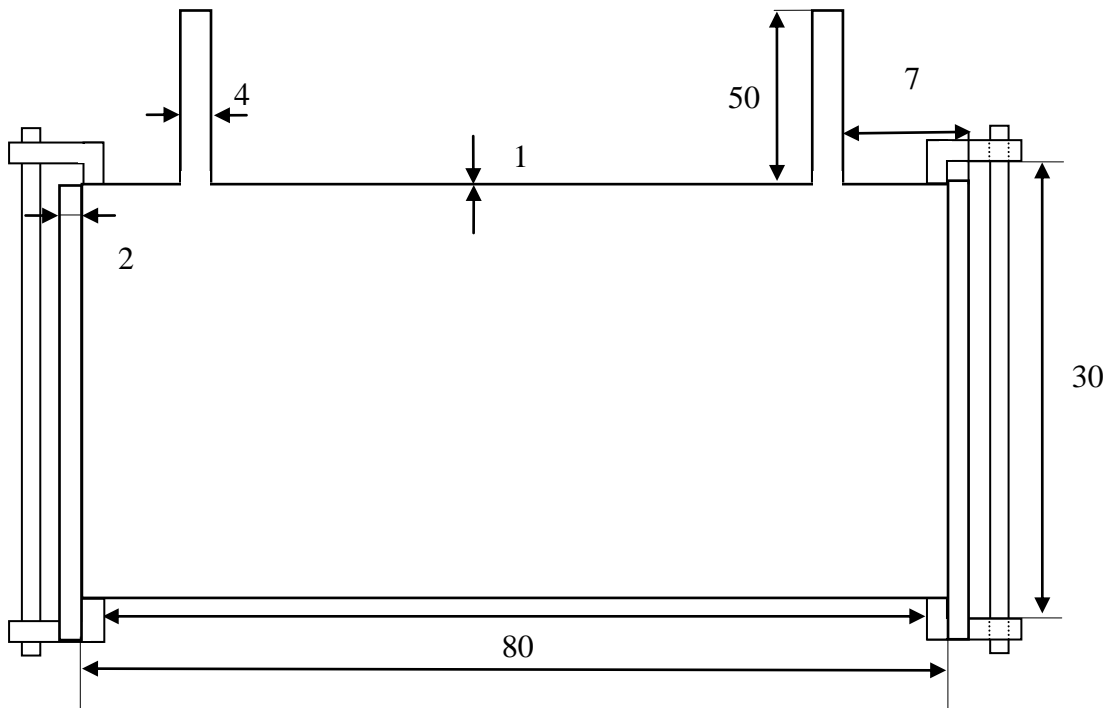
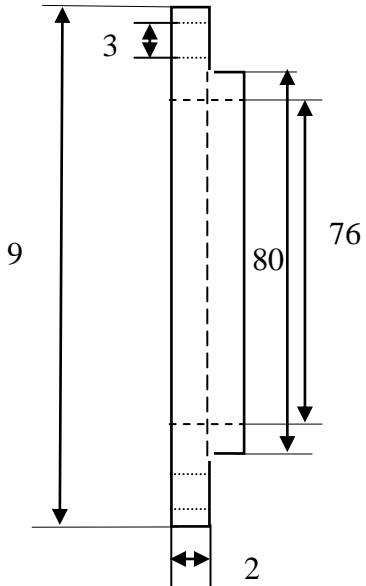


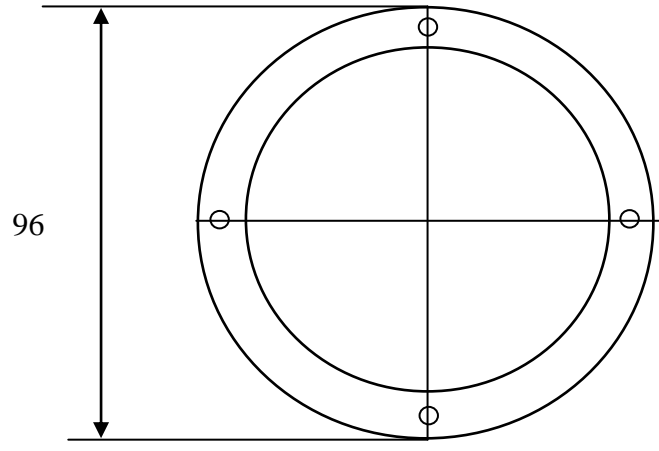
Рисунок 5.1, б - Схема экспериментального стенда при исследовании процессов затвердевания рабочего вещества



Верхнее и нижнее прижимные кольца



а – вид с боку



Внешний вид прижимного кольца

б – вид с верху

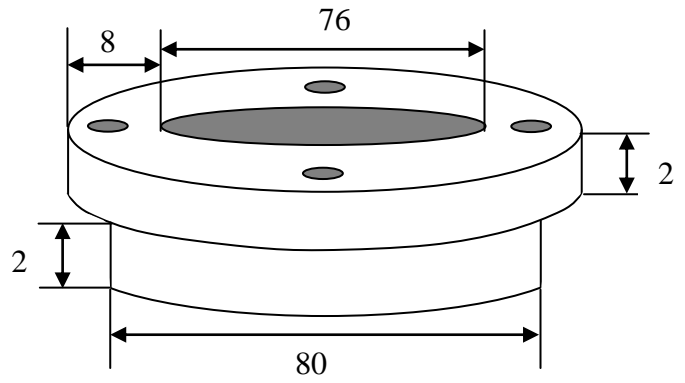


Рисунок 5.2 - Конструкция опытного образца охлаждающей системы



Рисунок 5.3 - Общий вид экспериментального стенда

Результаты измерений после обработки представлены в виде зависимостей изменения температуры опытного образца ТЭС во времени при изменении фазового состояния рабочего вещества, а также длительности его полного проплавления (затвердевания) при различных значениях мощности тепловыделяющего элемента и холодопроизводительности ТЭБ.

На рисунках 5.4-5.5 изображены графики зависимости изменения температуры опытного образца ТЭС (температуры оболочки) от времени при плавлении и затвердевании вещества.

Согласно приведенным графикам скорость протекания процессов плавления и затвердевания рабочего агента сильно зависит от подводимой и



отводимой теплоты. Так, увеличение теплового потока при плавлении с  $2500 \text{ Вт/м}^2$  до  $5000 \text{ Вт/м}^2$  (мощности нагревателя с 25 до 50 Вт) снижает время плавления на 0,25 – 0,3 ч. На практике это может привести к тому, что при определенных тепловых нагрузках может нарушиться нормальный режим работы элементов РЭА. Поэтому указанное обстоятельство следует учитывать при проектировании охлаждающей системы.

Увеличение теплового потока при затвердевании рабочего вещества позволяет существенно снизить время «паузы» в работе элемента РЭА. Зависимость на рисунке 5.5 показывают, что в случае, рассмотренном в опыте, повышение интенсивности отвода теплоты с  $3000 \text{ Вт/м}^2$  до  $7000 \text{ Вт/м}^2$  позволяет снизить температуру исследуемого объекта с 65 до 22 °С соответственно за 0,6 до 0,37 ч.

На рисунке 5.6 для сравнения представлены данные, снятые при остывании и затвердевании рабочего вещества при естественном теплообмене с окружающей средой. Для отвода тепла применялся медный радиатор с принудительным воздушным охлаждением.

Сопоставление графиков на рисунках 5.5-5.6 показывает, что в случае применения для интенсификации процесса затвердевания вещества ТЭБ, имеющей  $q_{\text{ТЭБ}}=7000 \text{ Вт/м}^2$ , длительность снижения температуры тепловыделяющего элемента до температуры окружающей среды более чем в 4 раза меньше, чем при использовании естественного теплообмена. Указанное обстоятельство позволяет снизить ограничения во времени перерыва в работе циклически работающего элемента РЭА.

В ходе эксперимента нами оценивалась целесообразность использования исследуемой системы отвода теплоты в свете ее энергетической эффективности. Для этой цели регистрировались значения потребляемого ТЭБ электрического тока и энергии. На рисунках 5.7-5.8 представлены результаты экспериментальных исследований в виде зависимости времени, необходимого для затвердевания рабочего вещества и охлаждения тепловыделяющего элемента до температуры окружающей среды от

потребляемой ТЭБ электроэнергии и питающего тока. Как следует из зависимостей, значение потребляемой мощности незначительно. Для снижения времени охлаждения тепловыделяющего элемента до 0,3 ч для питания ТЭБ требуется около 120 Вт.

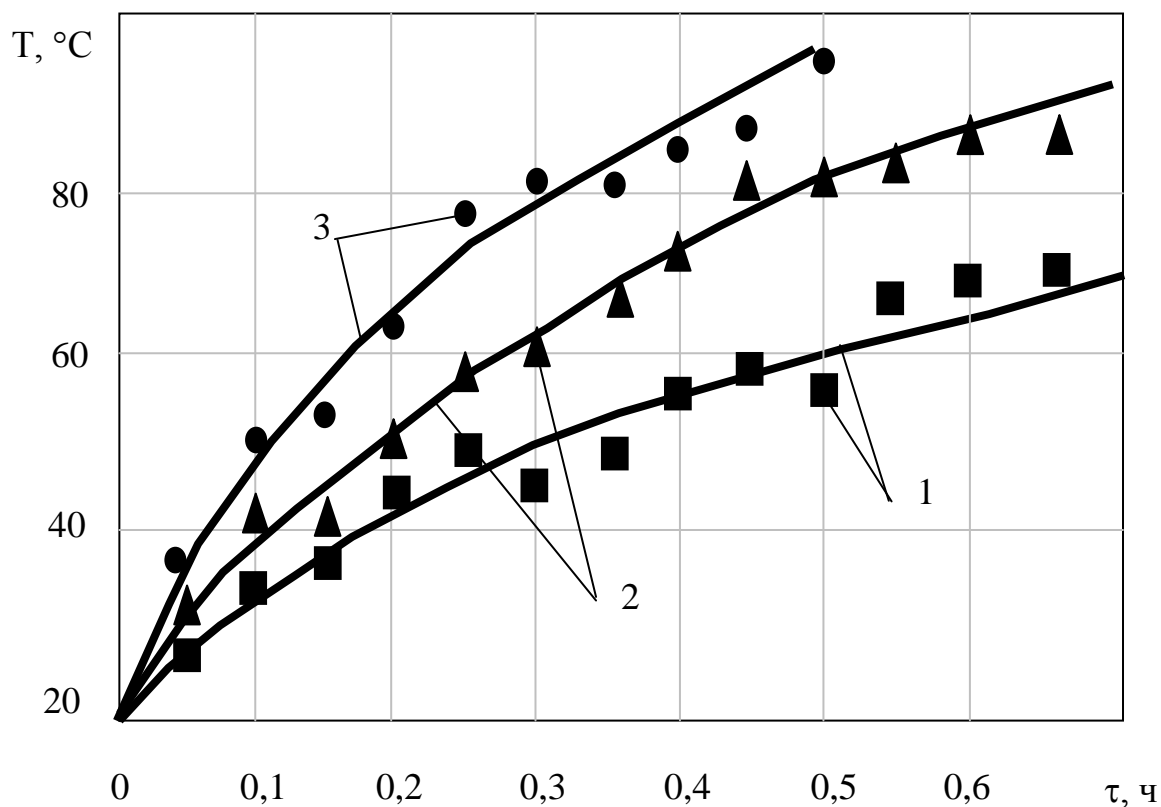


Рисунок 5.4 - Зависимость температуры источника тепловыделений от времени при плавлении рабочего вещества;  $(c\rho\delta)_{ог} = 6,0 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$   
 1 -  $q_{РЭА} = 2500 \text{ Вт}/\text{м}^2$ ; 2 -  $q_{РЭА} = 5000 \text{ Вт}/\text{м}^2$ ;  $q_{РЭА} = 7500 \text{ Вт}/\text{м}^2$

Результаты сравнения расчетных и экспериментальных значений, приведенные на рисунках 5.4-5.8, показывают их достаточную сходимость. Отличие результатов расчета от экспериментальных составляет 7 – 10 %.

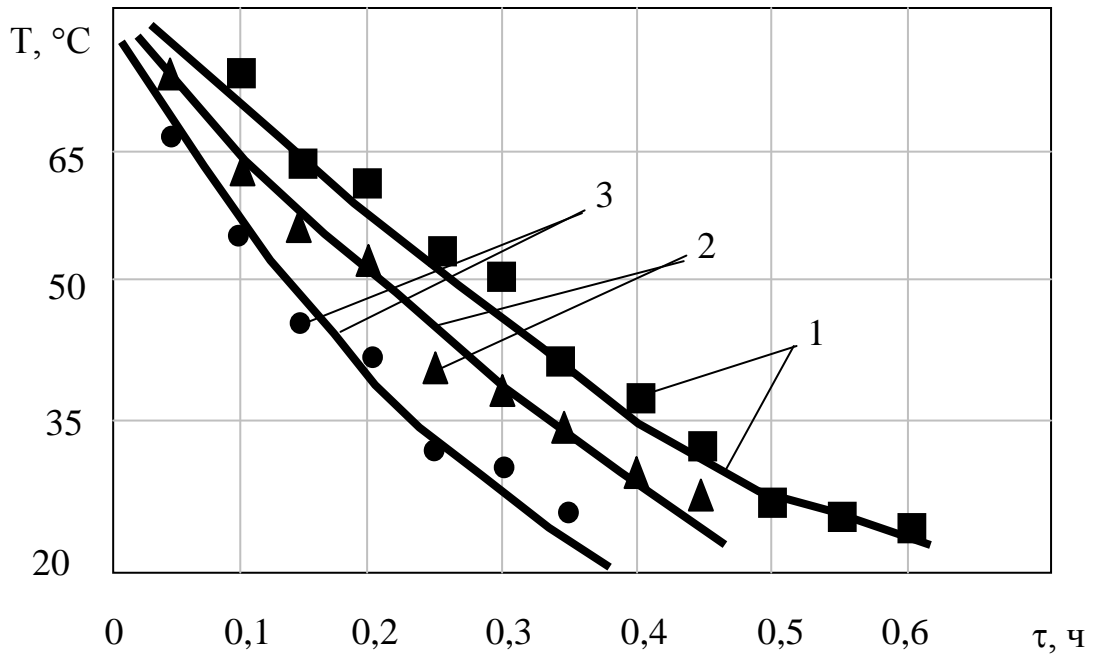


Рисунок 5.5 - Зависимость температуры источника тепловыделений от времени при затвердевании рабочего вещества;  $(\text{ср}\delta)_{06} = 6,0 \cdot 10^3$  Дж/(м<sup>2</sup>·К).  
 1 –  $q_{ТЭБ} = 3000$  Вт/м<sup>2</sup>; 2 –  $q_{ТЭБ} = 5000$  Вт/м<sup>2</sup>; 3 –  $q_{ТЭБ} = 7000$  Вт/м<sup>2</sup>

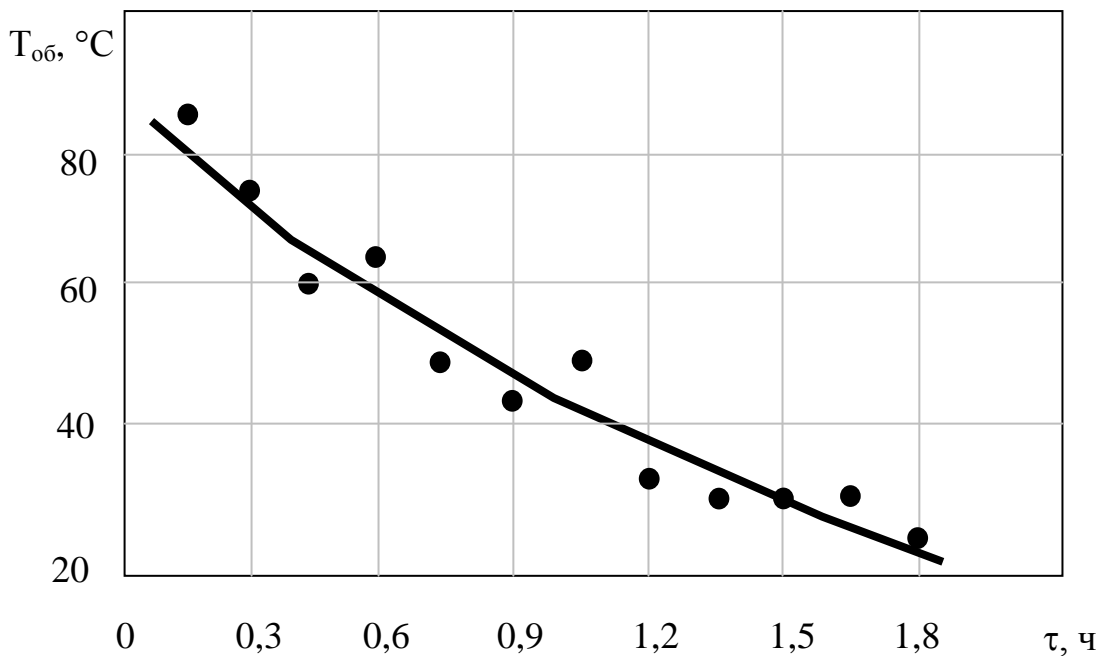


Рисунок 5.6 - Зависимость температуры источника тепловыделений от времени при затвердевании рабочего вещества на основе естественного теплообмена с окружающей средой;  $(\text{ср}\delta)_{06} = 6,0 \cdot 10^3$  Дж/(м<sup>2</sup>·К);  $k_{\text{ср}} = 20$  Вт/(м<sup>2</sup>·К)

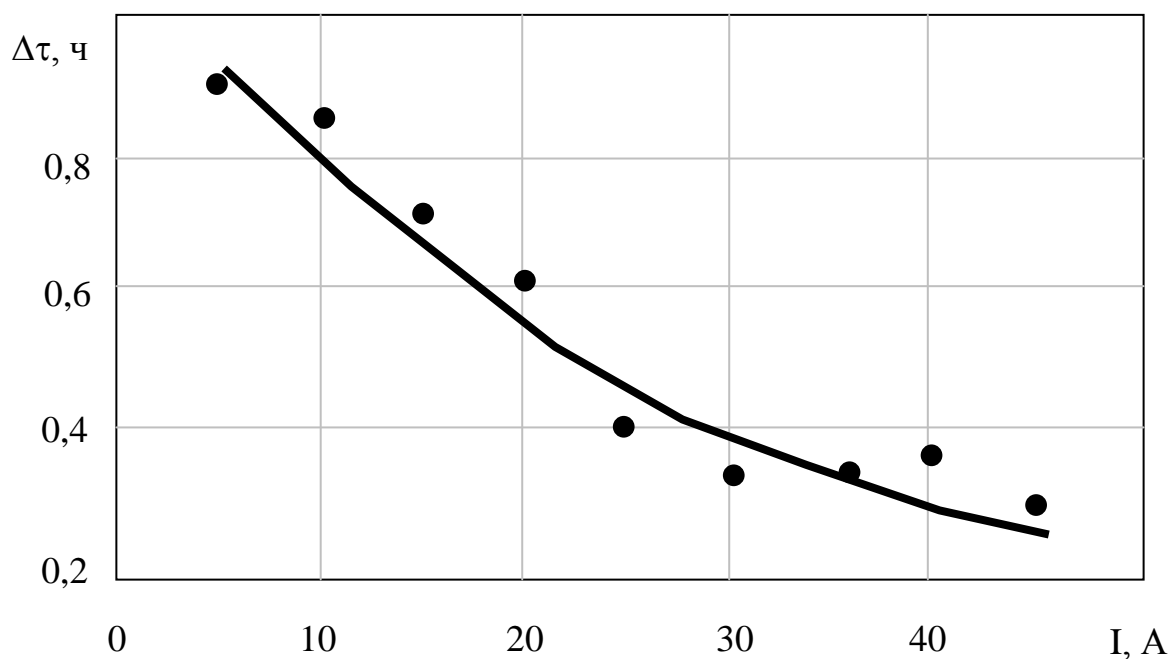


Рисунок 5.7 - Зависимость времени, необходимого для охлаждения тепловыделяющего элемента до температуры окружающей среды от тока, потребляемого ТЭБ;  $(\text{ср}\delta)_{\text{об}} = 6,0 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $T_{\text{нач}} = 65^\circ \text{ C}$ ;  $T_{\text{ср}} = 20^\circ \text{ C}$

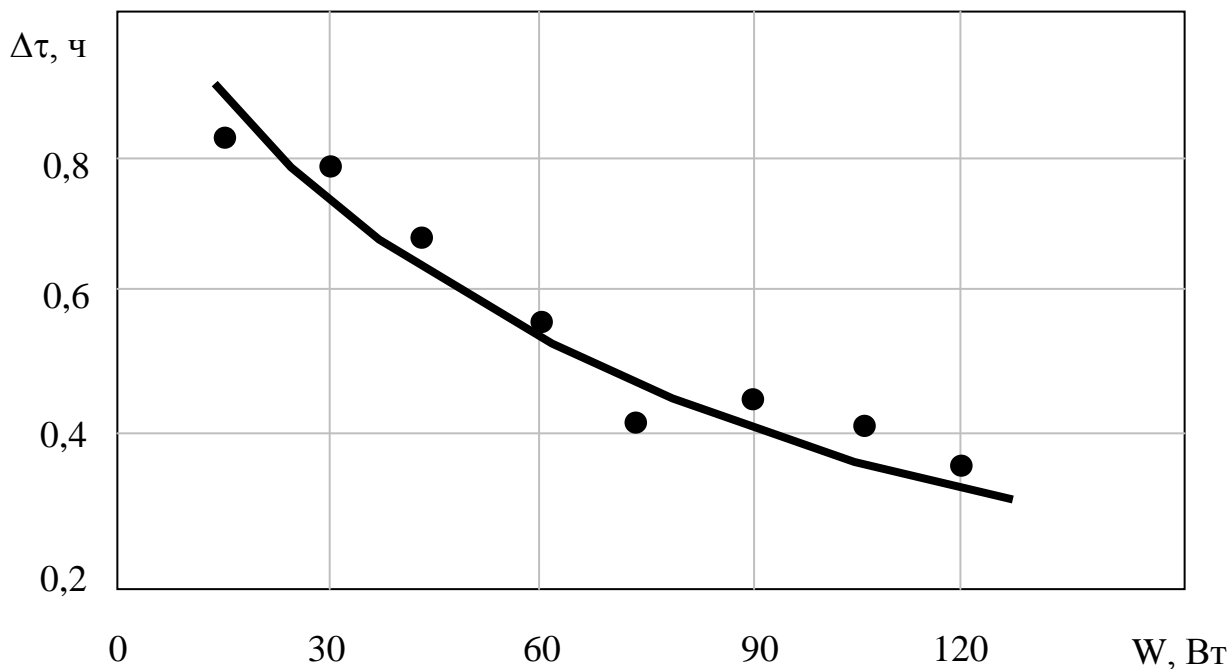


Рисунок 5.8 - Зависимость времени, необходимого для охлаждения тепловыделяющего элемента до температуры окружающей среды от потребляемой ТЭБ электроэнергии;  $(\text{ср}\delta)_{\text{об}} = 6,0 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $T_{\text{нач}} = 65^\circ \text{ C}$ ;  $T_{\text{ср}} = 20^\circ \text{ C}$ .

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- экспериментальные исследования подтверждают адекватность разработанной модели системы охлаждения элементов радиоэлектронной аппаратуры с повторно-кратковременными тепловыделениями с использованием плавящихся рабочих веществ и ТЭБ, максимальное отклонение опытных данных от расчета составляет 7 – 10 %;

- использование ТЭБ для интенсификации процесса теплообмена рабочего вещества с окружающей средой позволяет снизить время охлаждения и затвердевания рабочего вещества, при использовании ТЭБ с  $q_{\text{ТЭБ}} = 7000 \text{ Вт/м}^2$  время охлаждения тепловыделяющего элемента до температуры окружающей среды примерно в 4 раз меньше, чем при использовании естественного теплообмена с  $k_{\text{ср}} = 20 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ ;

- использование ТЭБ в охлаждающей системе не требует значительных затрат электрической энергии, для снижения времени охлаждения тепловыделяющего элемента до  $0,37 \text{ ч}$  с  $65$  до  $22^\circ \text{С}$  для питания ТЭБ требуется примерно  $120 \text{ Вт}$ .

## **5.2 Экспериментальные исследования системы неравномерного охлаждения электронных плат при использовании плавящихся рабочих веществ**

Для проведения экспериментальных исследований системы неравномерного охлаждения электронных плат был собран стенд, на котором исследовался разработанный и изготовленный в лаборатории опытный образец.

Принципиальная схема стенда приведена на рисунке 5.9 [64].

Экспериментальные исследования проводились в теплоизолированной климатической камере 1, термостатируемый рабочий объем которой составляет  $120 \text{ л}$ . Камера обеспечивает поддержание температуры в

пределах от 283 до 343 К с точностью 0,2° С и относительной влажности от 30% до 98%. Заданная температура и относительная влажность в камере регулируется блоком управления 2, связанным с датчиком температуры и влажности 3, показания которого регистрируются цифровым табло 4.

Объектом экспериментальных исследований являлся опытный образец системы охлаждения, представляющий емкость 5, заполненную рабочим веществом – парафином. Верхняя поверхность емкости выполнена профилированной с образованием двух пазов, в которых размещены ТЭБ типа ДН Д-127-14-04 (производство ООО НПО Кристалл, г. Королев). Место расположения пазов соответствует размещению на имитаторе электронной платы 7 тепловыделяющих элементов 8, в качестве которых применялись плоские нихромовые электронагреватели. Имитатор соответствует проектируемой электронной плате ОАО «Избербашский радиозавод им. П.С. Плешакова», упрощенная тепловая модель которой рассмотрена на рисунке 3.22. Для определения основных параметров исследуемого опытного образца при испытаниях замерялись следующие величины: напряжение и ток на ТЭБ; температуры на их спаях; напряжение и ток на нагревателях, температуры в контрольных точках имитатора электронной платы, включая нагреватели, оболочки емкости с рабочим веществом.

Температуры на горячей и холодной сторонах ТЭБ, а также в контрольных точках имитатора электронной платы измерялись медь-константановыми термопарами 9, опорные спаи которых находились в сосуде Дьюара 10. Выходные сигналы с термопар через многоканальный переключатель 11 поступали на измерительный комплекс ИРТМ 12, к выходу которого подключалась персональная ЭВМ 13, регистрирующая показания измеряемых температур через заданный промежуток времени. Питание ТЭМ осуществлялось регулируемым источником постоянного тока 14. Ток, проходящий через ТЭМ, и напряжение на нем контролировались встроенными в блок питания приборами. Для питания имитаторов тепловой нагрузки (электронагревателей) использовался аналогичный источник

постоянного тока 15. Опытный образец помещали в камеру на специальную подставку, проверяли надежность электрических и тепловых контактов, задавали определенные значения температуры и влажности, которые сохранялись в течение всего эксперимента.

На основе экспериментального стенда был проведен ряд опытов в соответствии с методикой, отраженной в [22], позволяющих судить о приемлемости развитой в настоящей работе системы охлаждения на практике.

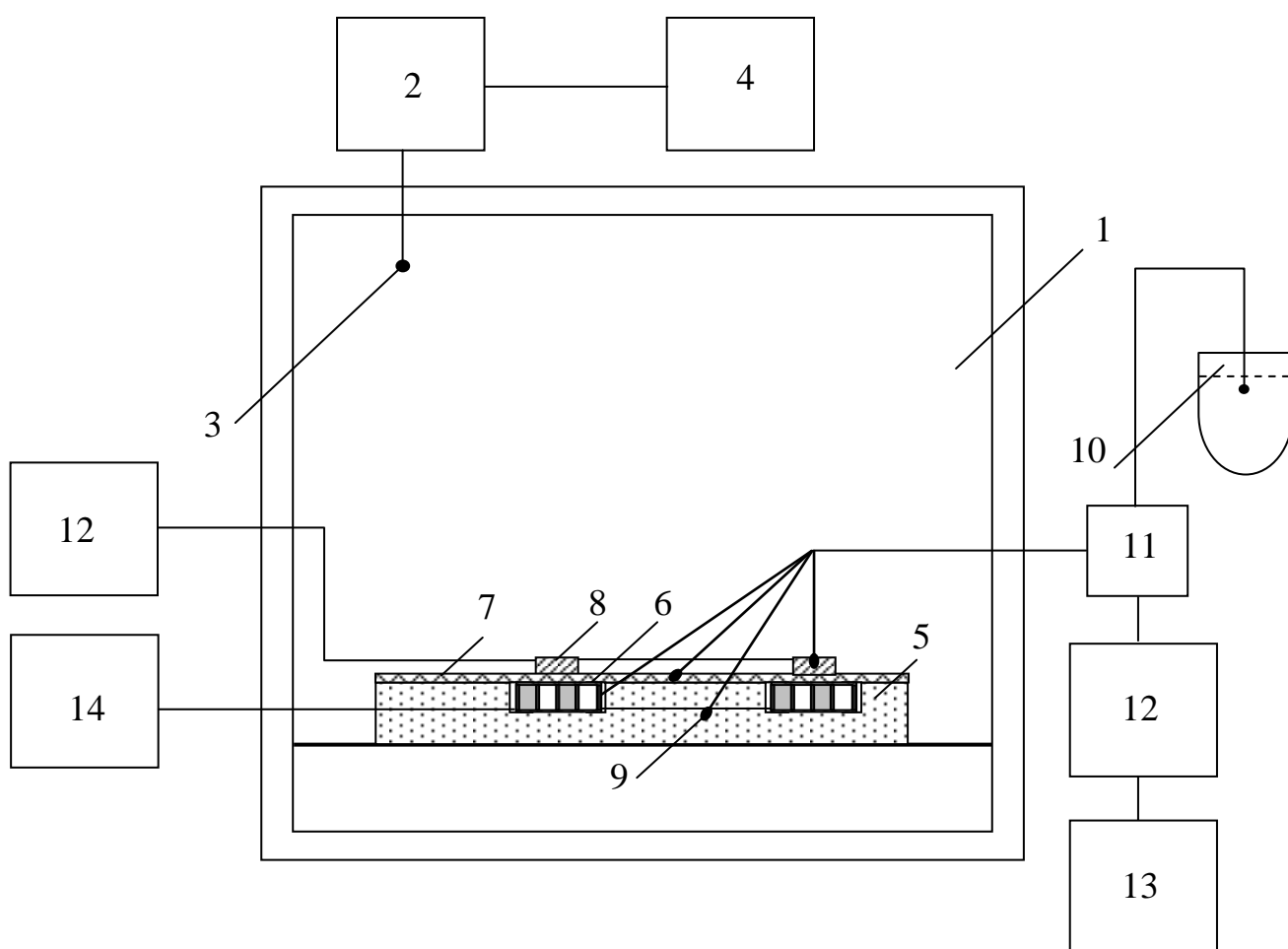


Рисунок 5.9 - Принципиальная схема экспериментального стенда

Основной задачей, стоящей при проведении экспериментальных исследований, являлось определение температурных зависимостей тепловыделяющих элементов имитатора электронной платы при их

неравномерном охлаждении от параметров ТЭБ и рабочего вещества, а также изменение во времени температуры оболочки емкости с рабочим агентом. Важным являлось сравнение полученных экспериментальных данных с теоретическими с целью проверки адекватности математической модели. На рисунках 5.10-5.11 представлены экспериментальные зависимости изменения температуры в контрольных точках имитатора электронной платы во времени без системы охлаждения при различных мощностях. Для сравнения там же приведены теоретические графики, полученные на основе разработанной математической модели. Согласно представленным данным температура тепловыделяющих элементов значительно повышается. Так, для источника теплоты 1 (см. рисунок 3.22) в стационарном режиме ее значение составляет 428 К при мощности тепловыделений 120 Вт и 410 при мощности тепловыделений 100 Вт (те же значения температуры и для тепловыделяющего элемента 2), а для источника теплоты 3 соответственно – 396 К и 382 К. При этом та же велика температура в областях имитатора электронной платы, близлежащих к источникам теплоты. На рисунках 5.10-5.11 ее значение составляет 415 К и 403 К, что говорит о наличии значительного температурного фона, который может сказаться на работе элементов электронной платы – служить причиной выхода их из строя.

На рисунках 5.12-5.13 изображены графики изменения температуры в контрольных точках имитатора электронной платы во времени при использовании опытного образца системы охлаждения. Согласно представленным данным применение охлаждающей системы уменьшает температуру тепловыделяющих элементов до приемлемых значений. Для случая, соответствующего рисунку 3.12, температура источников теплоты снижается до 345 К и 344 К, а для рисунка 3.13 до 334 К и 333 К. При этом также снижается температурный фон, создаваемый тепловыделяющими элементами в близлежащих к ним областях имитатора электронной платы.



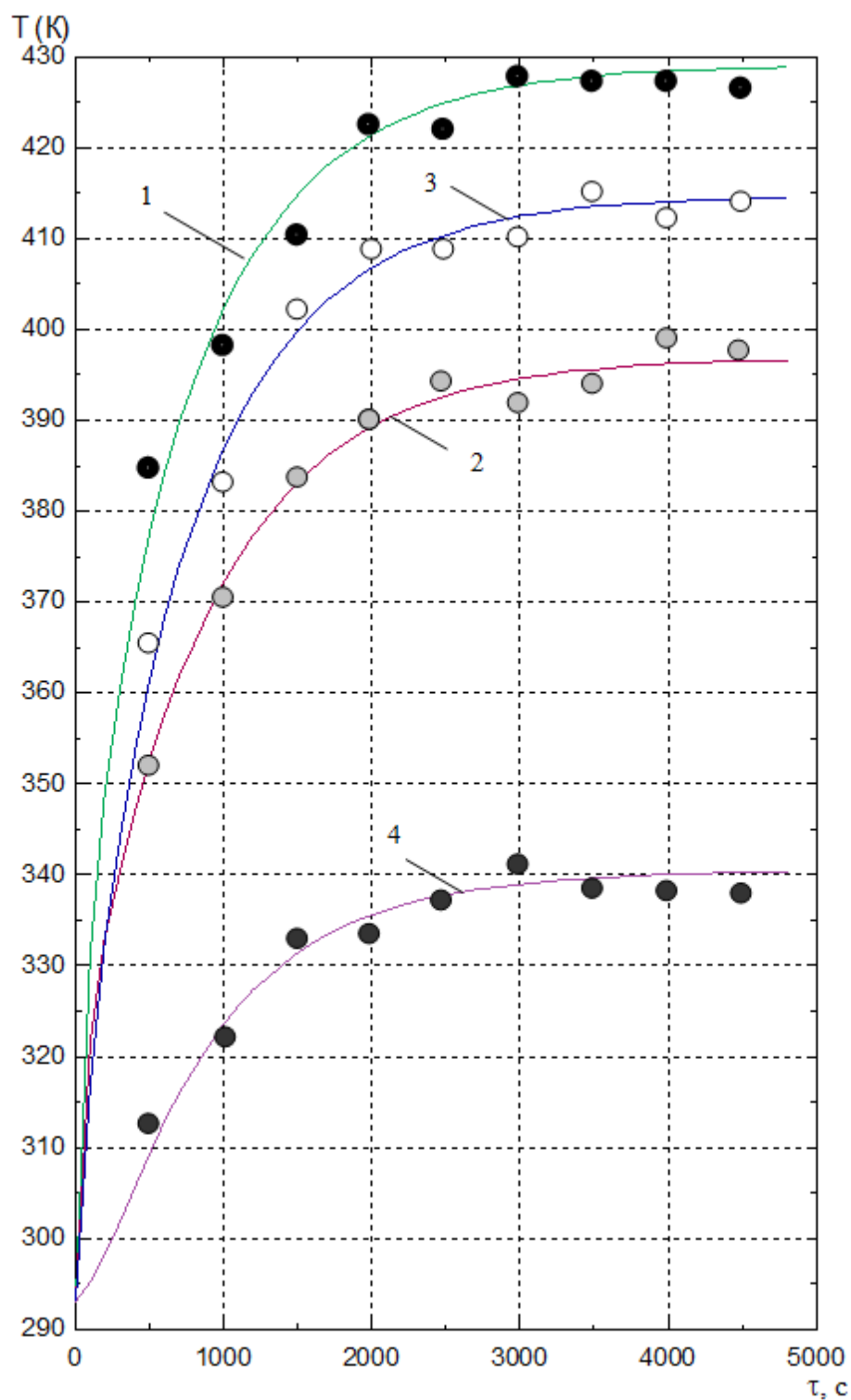


Рисунок 5.10 - Изменение температуры различных точек электронной платы во времени при мощности тепловыделяющих элементов 120 Вт

- 1 – температура источника теплоты 1
- 2 – температура источника теплоты 3
- 3 – температура при  $x=125$  мм,  $y=47,5$  мм
- 4 – температура при  $x=17$  мм,  $y=14$  мм

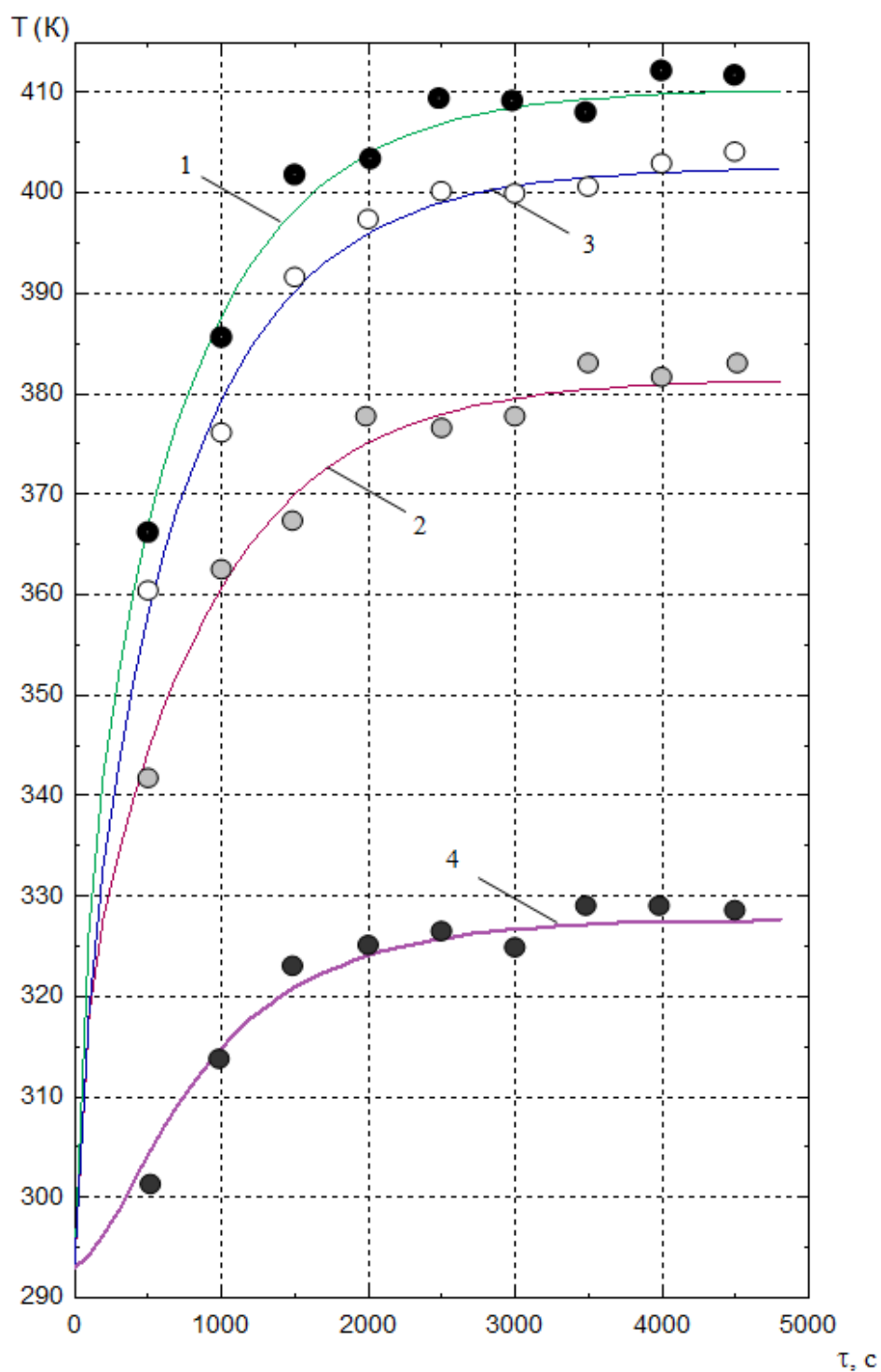


Рисунок 5.11 - Изменение температуры различных точек электронной платы во времени при мощности тепловыделяющих элементов 100 Вт

- 1 – температура источника теплоты 1
- 2 – температура источника теплоты 3
- 3 – температура при  $x=125$  мм,  $y=47,5$  мм
- 4 – температура при  $x=17$  мм,  $y=14$  мм

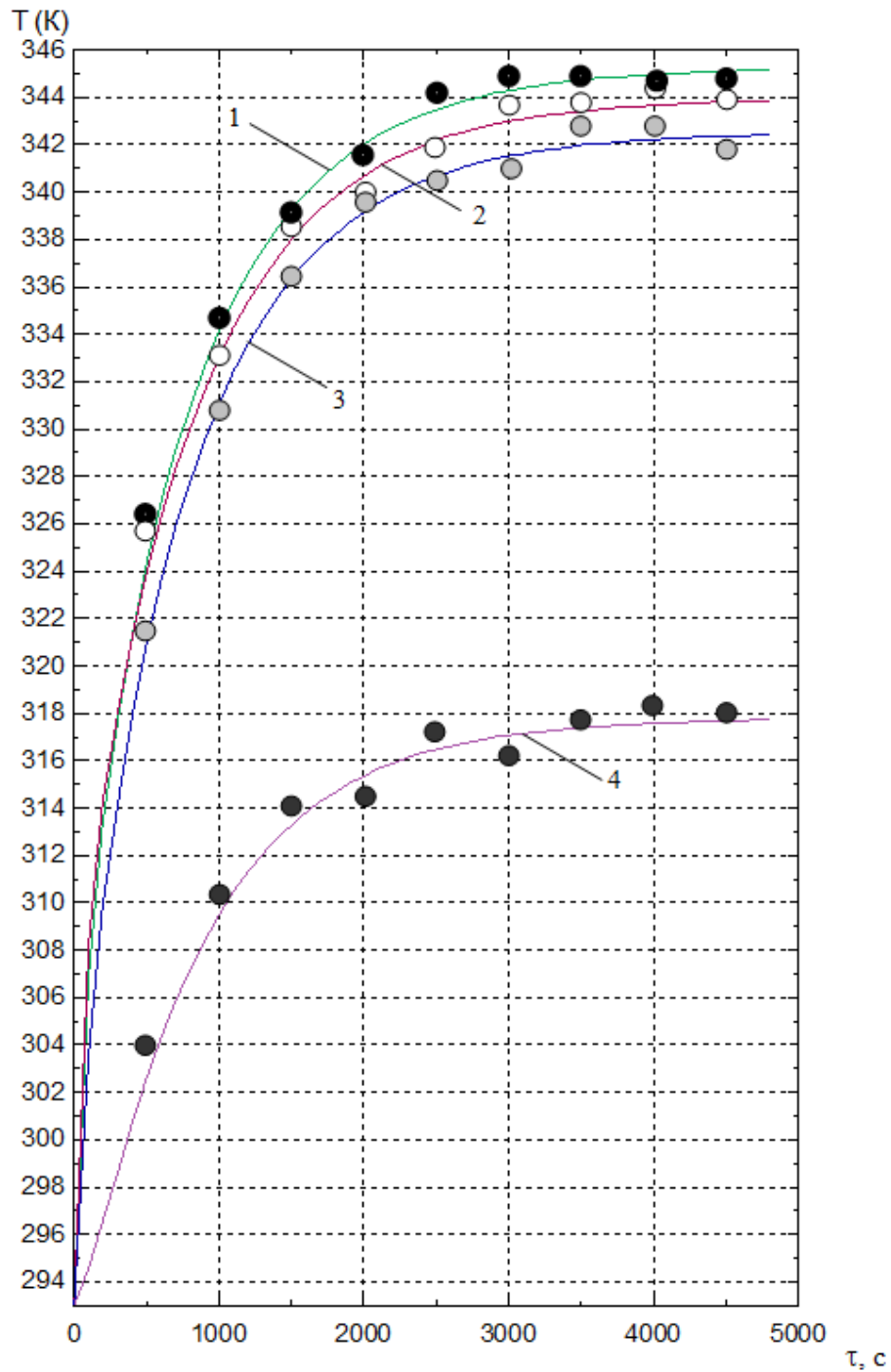


Рисунок 5.12 - Изменение температуры различных точек электронной платы во времени при мощности тепловыделяющих элементов 120 Вт и токе питания ТЭБ 19 А

- 1 – температура источника теплоты 1
- 2 – температура источника теплоты 3
- 3 – температура при  $x=125$  мм,  $y=47,5$  мм
- 4 – температура при  $x=17$  мм,  $y=14$  мм

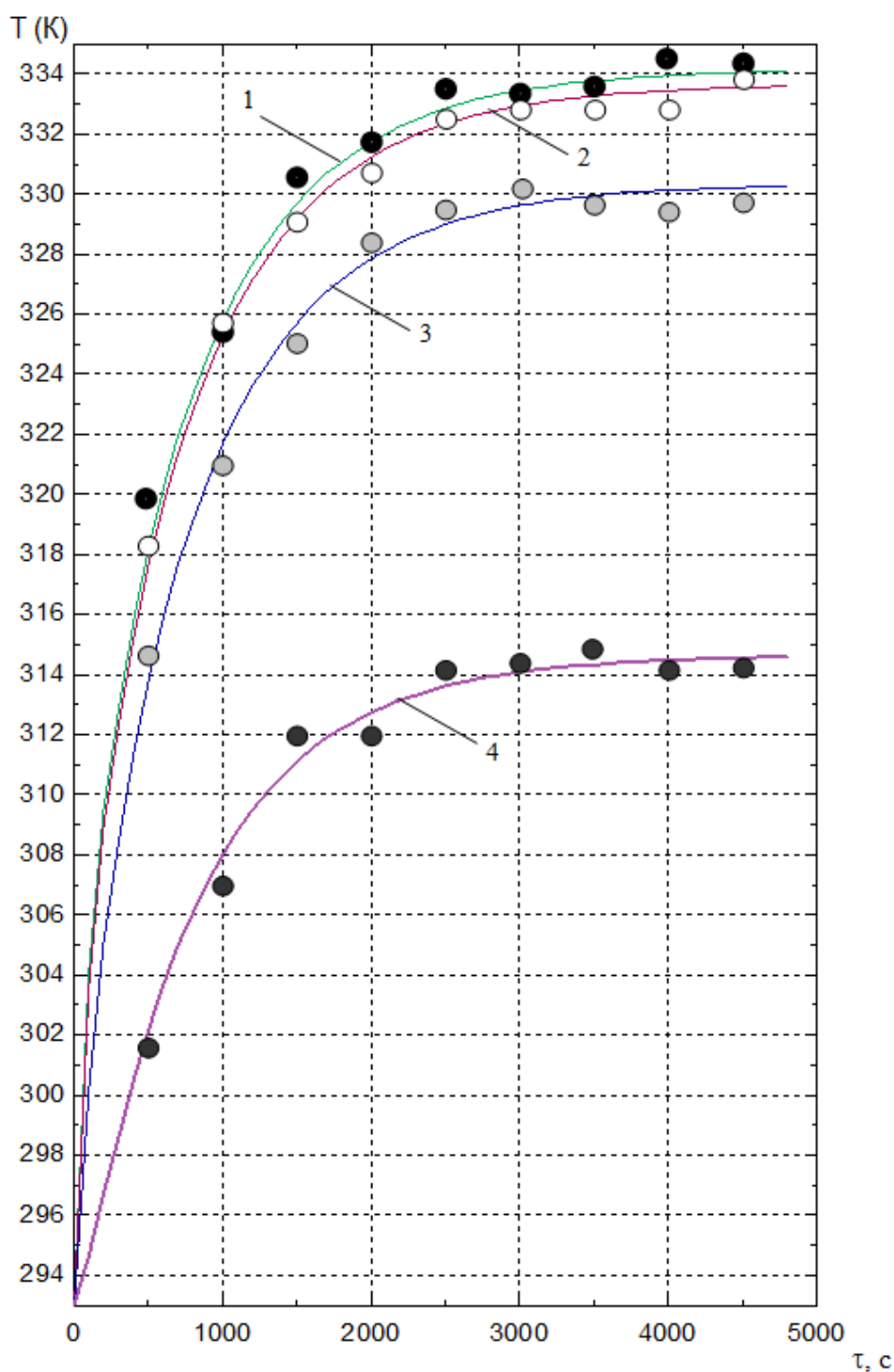


Рисунок 5.13 - Изменение температуры различных точек электронной платы во времени при мощности тепловыделяющих элементов 100 Вт и токе питания ТЭБ 19 А

- 1 – температура источника теплоты 1
- 2 – температура источника теплоты 3
- 3 – температура при  $x=125 \text{ мм}, y=47,5 \text{ мм}$
- 4 – температура при  $x=17 \text{ мм}, y=14 \text{ мм}$

Для анализа энергетических характеристик системы охлаждения на рисунке 5.14 приведены изменения температуры контрольных точек имитатора электронной платы от потребляемой ТЭБ электрической энергии. В соответствии с полученными данными с увеличением силы тока, протекающего через ТЭБ, температура всех контрольных точек уменьшается. При этом ее наименьшее значение для данного случая при мощности источников теплоты 120 Вт составляет 344 К, что соответствует току питания ТЭБ 19 А. Очевидно, что дальнейшее увеличение электрического тока вплоть до оптимального для данного типа ТЭМ значения даст дальнейшее снижение температуры контрольных точек. Соответственно с ростом тока питания ТЭБ увеличивается потребляемая ею электрическая мощность. Для случая, соответствующего рисунку 5.14 току 19 А соответствует потребляемая мощность 360 Вт.

На рисунке 5.15 приведены данные об изменении температуры контрольных точек имитатора электронной платы при отводе теплоты в рабочее вещество без использования ТЭБ. Согласно приведенным результатам подобное охлаждение не обеспечивает необходимый температурный режим элементов имитатора электронной платы. Так, температура тепловыделяющих элементов снижается лишь до значений 383 К и 385 К, что является недостаточным для обеспечения их температурного режима работы.

На рисунке 5.16 изображены экспериментальные зависимости температуры оболочки в зависимости от времени при плавлении рабочего вещества для различных значений тока питания ТЭБ. Согласно приведенным графикам с ростом тока питания увеличивается количество теплоты, подводимого к поверхности емкости в единицу времени (тепловой мощности), что повышает температуру оболочки. Так, при использовании в качестве рабочего агента парафина увеличение тока питания ТЭБ с 14 до 23 А повышает температуру оболочки примерно на 28-30 К через 1,5 ч. Соответственно повышается и скорость плавления вещества и снижается

время полного плавления рабочих агентов. Данное обстоятельство следует учитывать при проектировании охлаждающей системы.

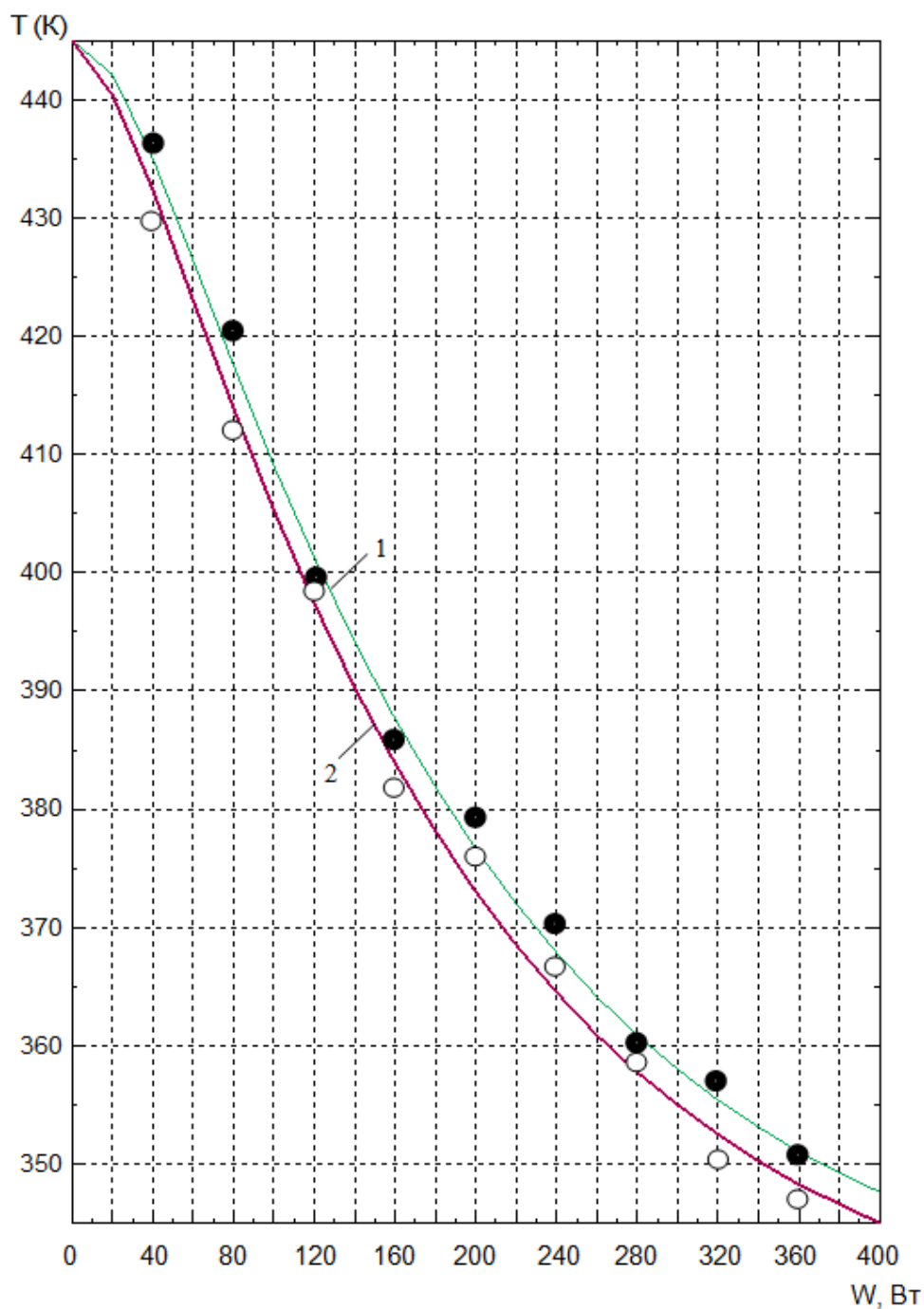


Рисунок 5.14 - Изменение температуры различных точек электронной платы от потребляемой ТЭБ электрической мощности в стационарном режиме при мощности тепловыделяющих элементов 120 Вт

- 1 – температура источника теплоты 1
- 2 – температура источника теплоты 3

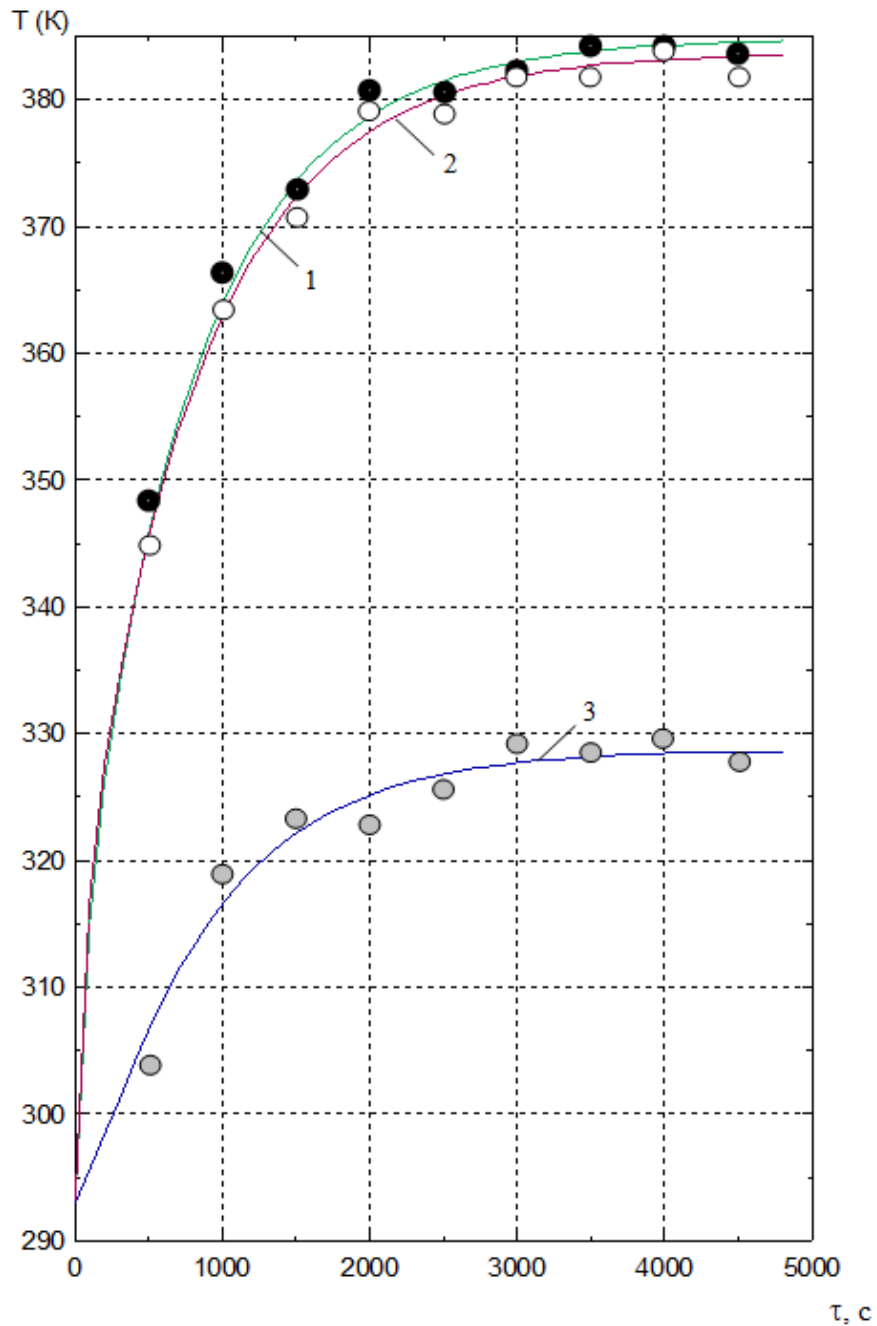


Рисунок 5.15 - Изменение температуры различных точек электронной платы во времени при мощности тепловыделяющих элементов 120 Вт и отводом теплоты в плавящееся рабочее вещество без ТЭБ

- 1 – температура источника теплоты 1
- 2 – температура источника теплоты 3
- 3 – температура при  $x=17$  мм,  $y=14$  мм

По результатам экспериментов проведено сопоставление расчетных и экспериментальных данных. Как было отмечено выше, на рисунках 5.10-5.16

кроме экспериментальных приведены также расчетные данные. Данные представлены на рисунках в виде сплошных кривых.

Полученные результаты определяют приемлемую точность математической модели, предложенной в диссертационной работе. Максимальное расхождение расчетных и экспериментальных данных не превышает 10 %. Наибольшее отклонение расчетных данных и опыта наблюдается при измерении температуры оболочки емкости с рабочим веществом, что объясняется наличием в расчетной модели ряда допущений, снижающих точность расчета.

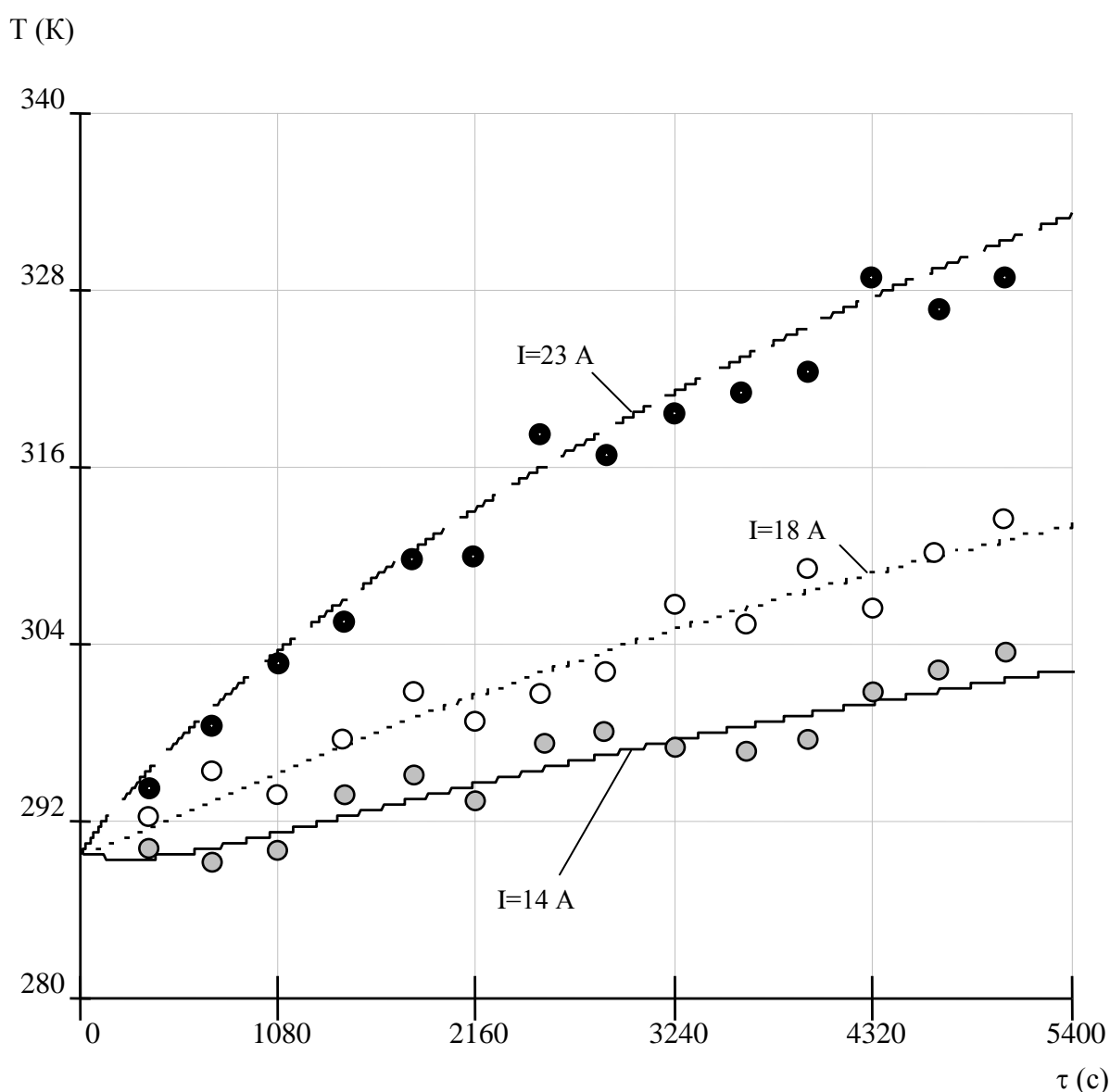


Рисунок 5.16 - Зависимость температуры оболочки емкости с рабочим веществом от времени при различных токах питания ТЭБ



### **5.3 Экспериментальные исследования теплового воздействия на биологически активные точки**

В качестве объекта натуральных испытаний выступал опытный образец ТЭС для теплового воздействия на биологически активные точки, содержащий ТЭБ 1, холодными спаями сопряженную с наконечником 2, а горячими с теплоотводом 3, представляющим собой полый цилиндрический контейнер, во время эксперимента заполняемый льдом. В качестве имитатора биологического объекта выступал слой желатина толщиной 30 мм.

Опытный образец системы размещался в теплоизолированной климатической камере 4, в которой температура и относительная влажность регулировалась блоком управления 5, подключенным к датчику температуры и влажности 6, показания которого высвечивались на цифровом экране 7.

Источником холода являлся стандартный ТЭМ типа ДН D-127-14-04. Его питание электрическим током осуществлялось источником электрической энергии 8. Измерения проводились встроенными в источник электрической энергии амперметром и вольтметром, а также многоканальным измерителем температуры ИРТМ 2402/МЗ 9, связанным с медь-константановыми термопарами 11, опорные спаи которых размещались в сосуде Дьюара 12, сигналы с которого поступали на ЭВМ 10.

Термопары размещались на спаях ТЭМ, наконечнике, теплоотводе, имитаторе биологического объекта, в окружающей среде.

Измерения проводились при холостой работе ТЭС (без имитатора биологического объекта), с тепловой нагрузкой, при различной толщине наконечника.

Принципиальная схема экспериментального стенда изображена на рисунке 5.17.

При измерениях определялись температуры в контрольных точках прибора, а также регистрировалось их изменение во времени при различных токах питания ТЭБ.



значения при силе электрического тока 20 А. При этом требуемая температура достигается достаточно быстро. Если учитывать, что температурный диапазон проведения температур составляет порядка 10 К, то при данных условиях продолжительность выхода на рабочий режим прибора при токе питания 20 А не превышает 80 с.

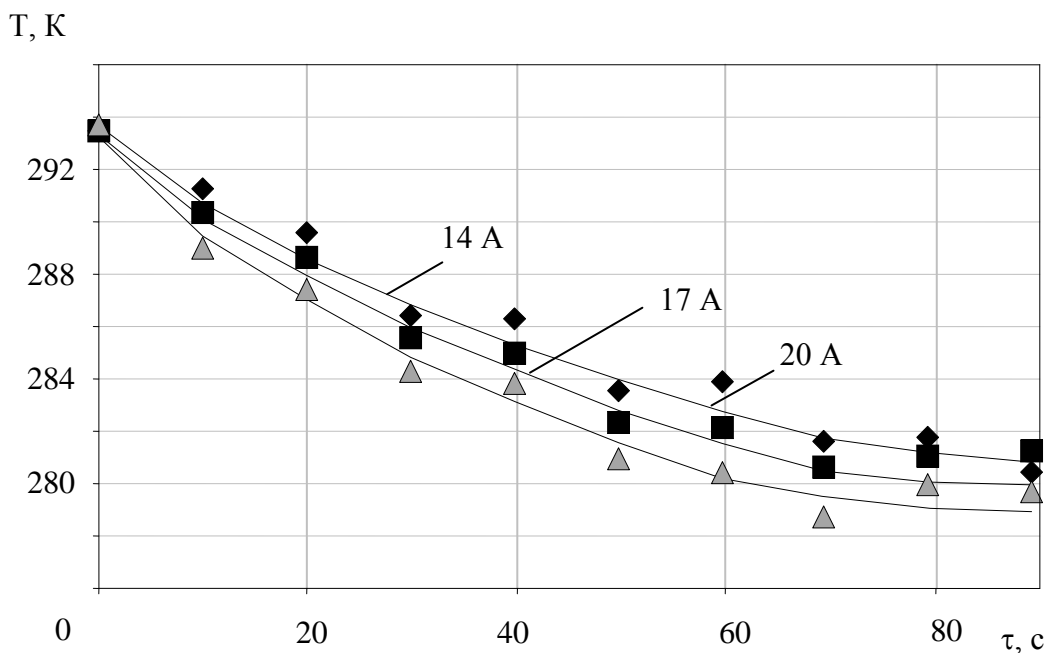


Рисунок 5.18 - Изменение температуры наконечника во времени при различных токах питания ТЭМ

Для анализа потерь температуры по длине наконечника проводились измерения температуры непосредственно на холодных спаях ТЭМ. Полученные зависимости изображены на рисунке 5.19.

Согласно полученным данным разброс в значениях температуры составляет в предельном случае 1,5 К. Такое расхождение значений температуры по толщине наконечника объясняется конечной величиной коэффициента теплопроводности его материала, различными условиями теплообмена на его поверхности, а также условиями сопряжения наконечника и ТЭМ.

Был исследован режим контрастного теплового воздействия на биологически активные точки, сочетающий в себе их чередующееся охлаждение и

нагрев. На рисунке 5.20 представлены данные об изменении во времени температуры холодных спаев ТЭМ, наконечника и имитатора биологического объекта при знакопеременном тепловом воздействии. Анализ зависимостей показывает, что общее время одного цикла при использовании ТЭС составляет порядка 3-3,5 минут, причем режимы охлаждения и нагрева обеспечиваются примерно за одинаковое время. Таким образом, данное обстоятельство определяет достаточно высокие динамические характеристики прибора за счет применения мощного сильноточного ТЭМ.

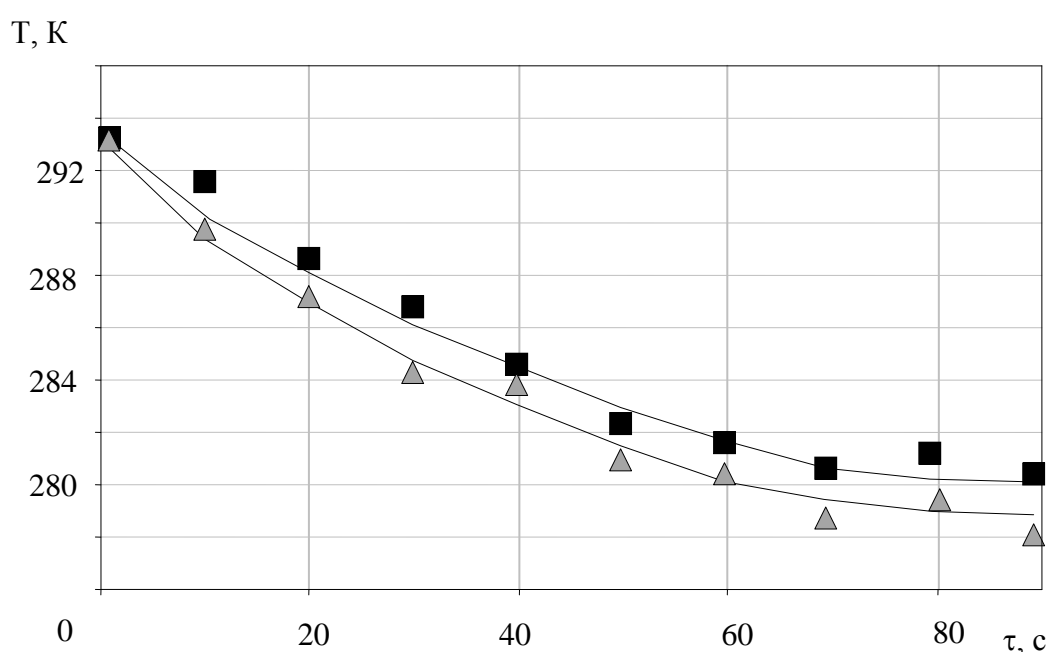


Рисунок 5.19 - Изменение температуры холодных спаев ТЭМ и наконечника во времени при его токе питания 17 А

По результатам экспериментов проведено сопоставление расчетных и экспериментальных данных. Полученные данные определяют приемлемую точность математической модели системы, предложенной в параграфе 4.1. Расхождение расчетных и экспериментальных данных не превышает 7-8 %.

Кроме сопоставления результатов расчета и эксперимента, важным является определение погрешности времени при выходе системы на рабочий режим, что может существенно влиять на эффективность проведения меди-

цинских процедур. Так, при чередующемся тепловом воздействии в этом случае может быть не соблюдена методика физиотерапевтической процедуры. В случае же превышения требуемой мощности ТЭМ при локальном нагреве биологически активной точки может иметь место термический ожог и ее деструкция. Основываясь на перечисленных причинах, при проведении измерений тщательным образом проводилось сопоставление расчетных и экспериментальных временных характеристик устройства. В результате такого сравнения установлено, что на всем диапазоне измерений, лежащем в пределах от 283 до 318 К, отклонение теоретически полученных значений этого параметра от эксперимента для режима охлаждения и нагрева составило примерно 15 с.

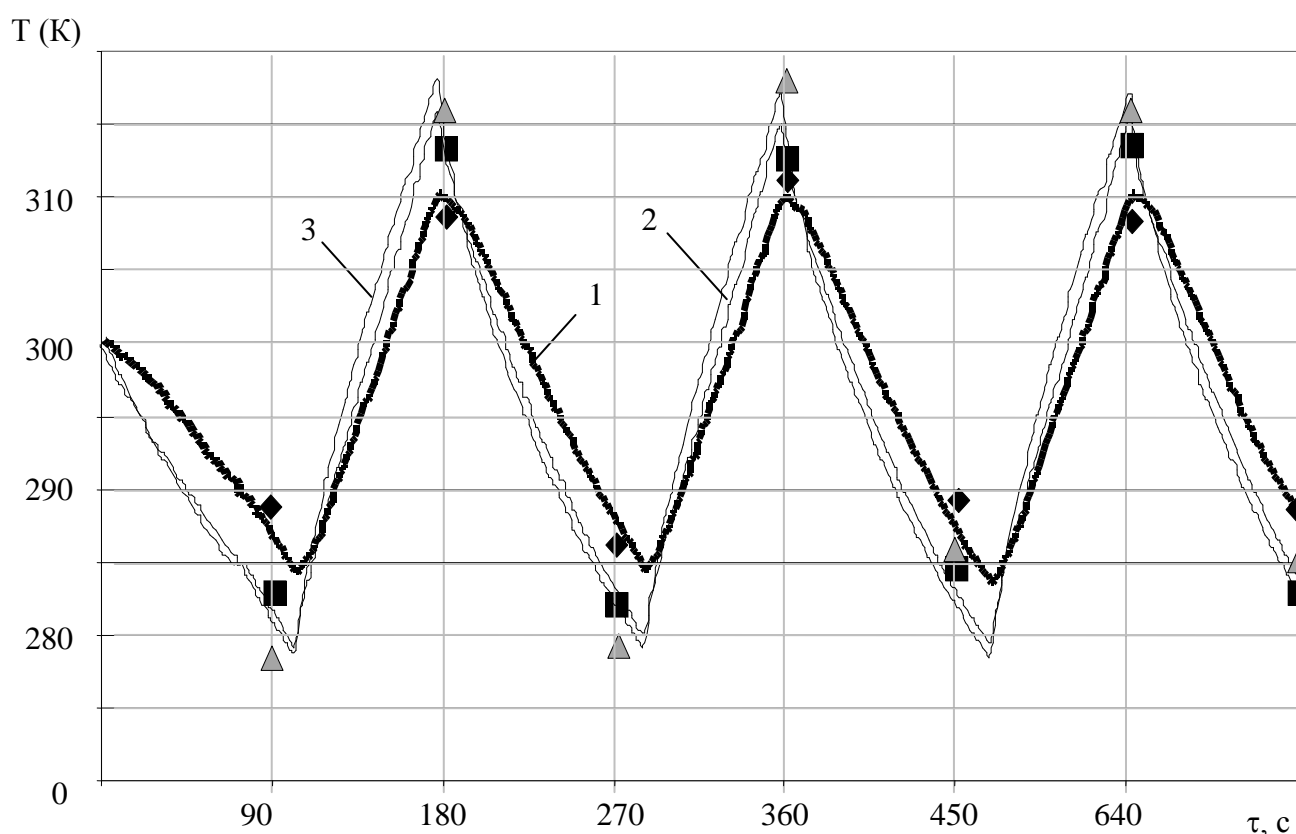


Рисунок 5.20 - Изменение температуры различных точек системы во времени при контрастном тепловом воздействии  
 1 – имитатор биологического объекта 2 – температура наконечника, 3 – температура холодных спаев ТЭБ

#### **5.4 Экспериментальные исследования термоэлектрической системы для местного теплового воздействия на отдельные зоны организма человека**

Для проведения экспериментальных исследований ТЭС для теплового воздействия на отдельные зоны поверхности тела человека был собран стенд [70], принципиальная схема которого приведена на рисунке 5.21.

Объектом экспериментальных исследований являлся опытный образец ТЭС, состоящий из оснований 1 с закрепленными на них с помощью крепежных приспособлений 2 в два ряда шести стандартным ТЭМ 3. ТЭМ 3 своими противоположными поверхностями приведены в хороший тепловой контакт с имитатором биологического объекта, выполненным в виде силиконовой пластины 4, толщиной 2 мм. Геометрические размеры основных составляющих частей опытного образца в миллиметрах приведены на рисунке 5.22. В качестве ТЭМ в натуральных испытаниях опытного образца системы использованы стандартные ТЭМ типа ТВ-199-1,4-0,6.

При проведении эксперимента опытный образец ТЭС помещался в климатическую камеру 5. Задаваемая температура и относительная влажность регулировалась блоком управления 6, связанным с датчиками температуры и влажности 7, показания которых выводятся на соответствующее цифровое табло 8.

Питание ТЭМ осуществлялось источником электрической энергии 9. Для снятия температурных характеристик использовался многоканальный измеритель температуры ИРТМ 2402/ М310, подключенный к ПЭВМ 11.

В ходе эксперимента определялись ток и напряжение на ТЭМ, температуры в контрольных точках опытного образца ТЭС, температура окружающей среды. Измерения температуры проводились посредством медь-константановых термопар 12, опорные спаи которых помещались в сосуд Дьюара, а сигнал снимался измерителем ИРТМ 2402/ М3 и выводился на монитор ПЭВМ.

Термопары устанавливались на опорных и рабочих сляях ТЭМ, в контрольных точках поверхности основания и в окружающей среде.

В процессе эксперимента выходные сигналы с термопар регистрировались измерителем ИРТМ 2402/МЗ, предназначенным для многоканального измерения температуры, а также других неэлектрических величин.

Перед проведением эксперимента проверялась надежность контактов. Измерения проводились сериями по четыре раза в идентичных условиях.

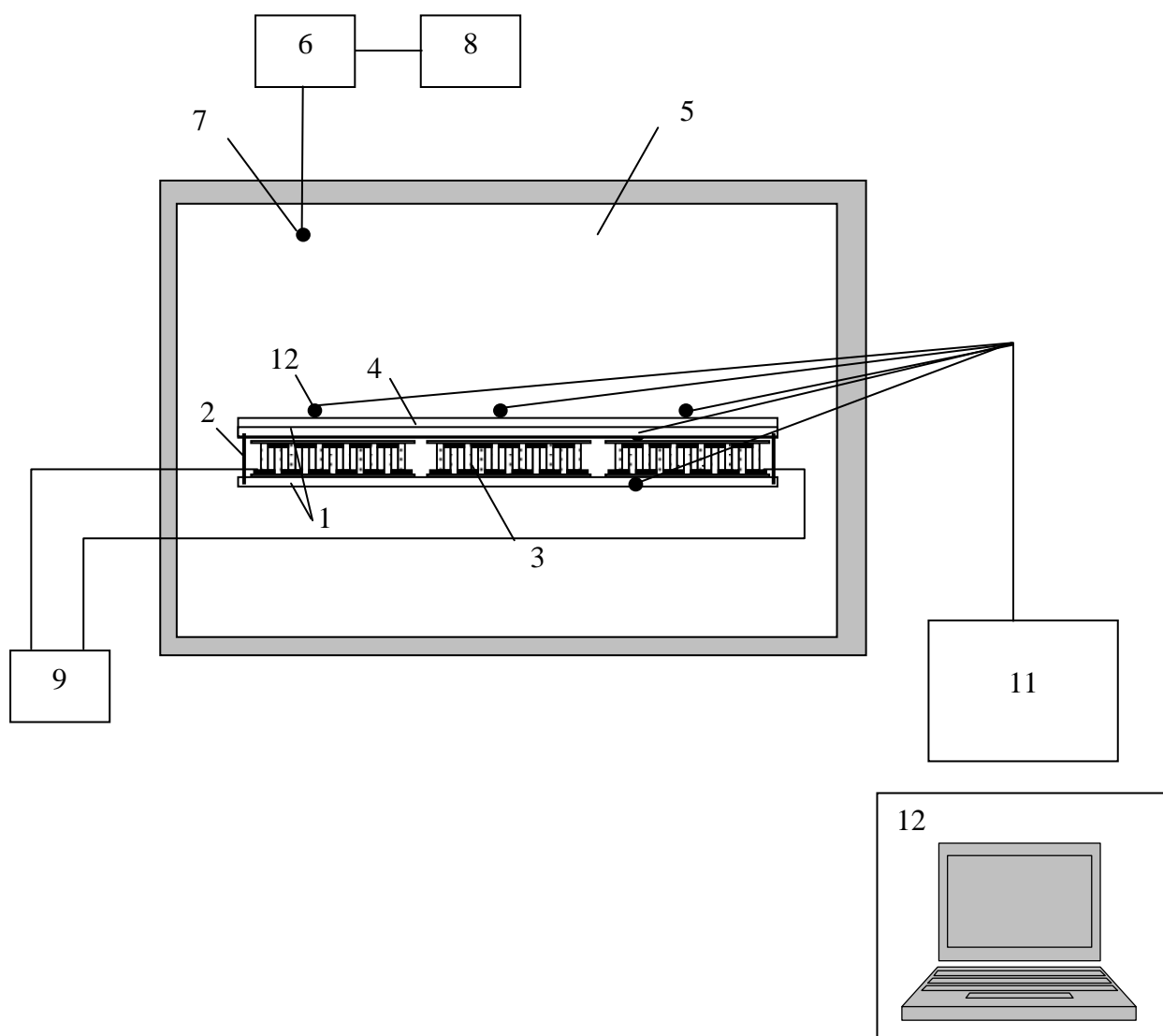
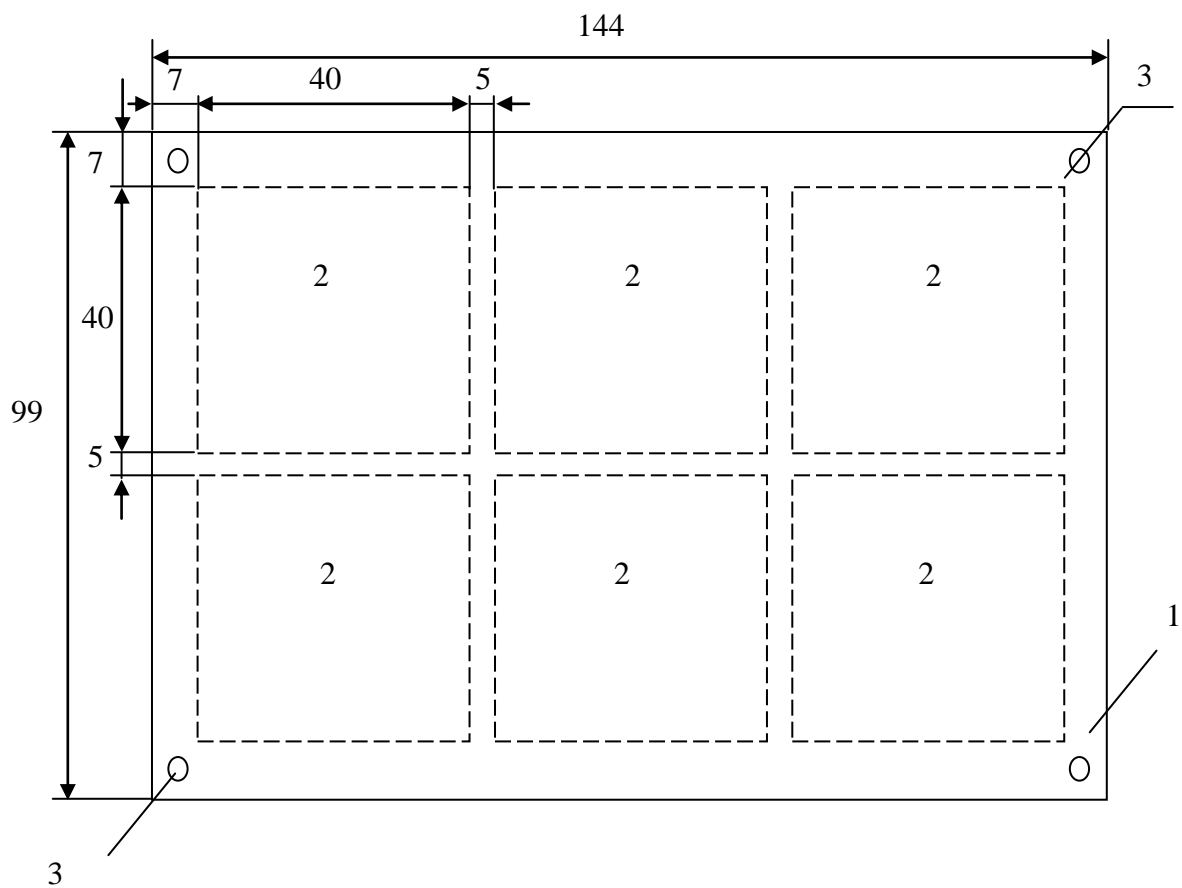
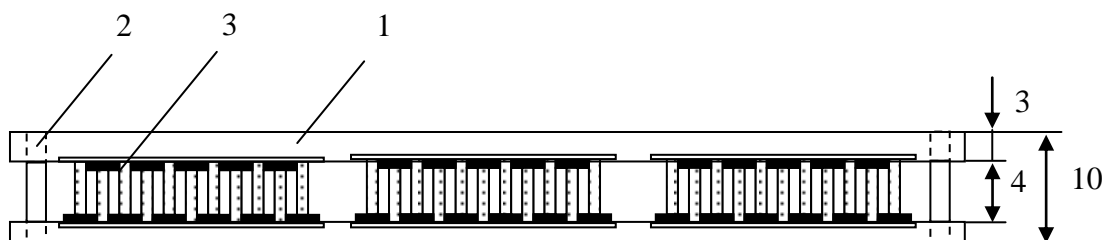


Рисунок 5.21 - Принципиальная схема экспериментального стенда



Вид сверху



Вид сбоку

Рисунок 5.22 - Эскизный рисунок опытного образца ТЭС с основными геометрическими размерами



Основной задачей при проведении измерений являлось определение зависимости изменения температуры в различных точках исследуемой ТЭС во времени при различных значениях тока питания ТЭМ. Важным являлось сравнение полученных результатов натуральных испытаний опытного образца прибора с расчетом.

В процессе проведения натуральных испытаний ТЭС задавались следующие исходные данные:

- температурный диапазон – 275-318 К;
- температура окружающей среды – 295 К;
- точность термостатирования – 0,5 К;
- возможность динамического чередования режимов охлаждения и нагрева;
- возможность задания коридорного и шахматного расположения нагретых и охлажденных зон.

На рисунках 5.23-5.24 представлены зависимости изменения во времени температуры имитатора биологического объекта при охлаждающем и нагревающим воздействии для значений тока питания ТЭМ, соответственно равных 7 А, 10 А, 13 А, 15 А и 6 А, 8 А, 10 А, 12 А. Как следует из приведенных зависимостей, продолжительность выхода в стационарный режим системы соответствует полученным ранее теоретическим результатам и составляет для работы прибора в режиме охлаждения порядка 8 мин и для работы прибора в режиме нагрева – 7 мин. При этом увеличение значения питающего ТЭМ тока приводит соответственно к уменьшению температуры биологического объекта при работе ТЭС в режиме охлаждения и увеличению его температуры при работе ТЭС в режиме нагрева, что соответствует увеличению холодо- и теплопроизводительности модулей. Так, увеличение питающего ТЭМ тока с 7 А до 15 А при охлаждении имитатора биологического объекта снижает его температуру с 280 К до 272,2 К, а при нагреве увеличение тока питания ТЭМ с 5 А до 11 А увеличивает температуру объекта воздействия с 317,7 К до 320 К.

Таким образом, как показывает эксперимент, для реализации косметологических процедур, определяемых в первую очередь температурой биологического объекта, применение стандартных сильноточных ТЭМ типа ТВ-199-1,4-0,6 является вполне оправданным.

При анализе характеристик разработанной ТЭС представляет интерес оценка потерь, связанных с конечным значением коэффициента теплопередачи от прибора к биологическому объекту, а также определение значений температуры на опорных нерабочих спаях ТЭМ. С этой целью построены графики изменения во времени температуры в различных точках системы ТЭС – объект воздействия, а именно непосредственно биологического объекта, холодного и горячего спая ТЭМ. Данные зависимости рассмотрены на рисунках 5.25-5.26, где на рисунке 5.25 ТЭС работает в режиме охлаждения при токе питания ТЭМ 7 А, а рисунок 5.26 соответствует режиму нагрева при токе питания также 8 А.

Согласно измеренным данным, как в случае охлаждения имитатора биологического объекта, так и в случае его нагрева, разность температур между рабочими спаями ТЭМ (непосредственно соприкасающимися с объектом воздействия) и биологическим объектом составляет 3,5 К.

Очевидно, данные потери складываются из неплотности контакта объекта воздействия и спая ТЭМ, конечного значения коэффициентов теплопроводности элементов системы, а также наличия теплопритоков из окружающей среды.

Уменьшить перепад температур между биологическим объектом и спаями ТЭМ можно за счет использования специальной теплопроводной пасты, наносимой на поверхность объекта воздействия, а также уменьшением теплопритоков из окружающей среды за счет теплоизоляции участка биологического объекта, подвергающегося воздействию ТЭС.

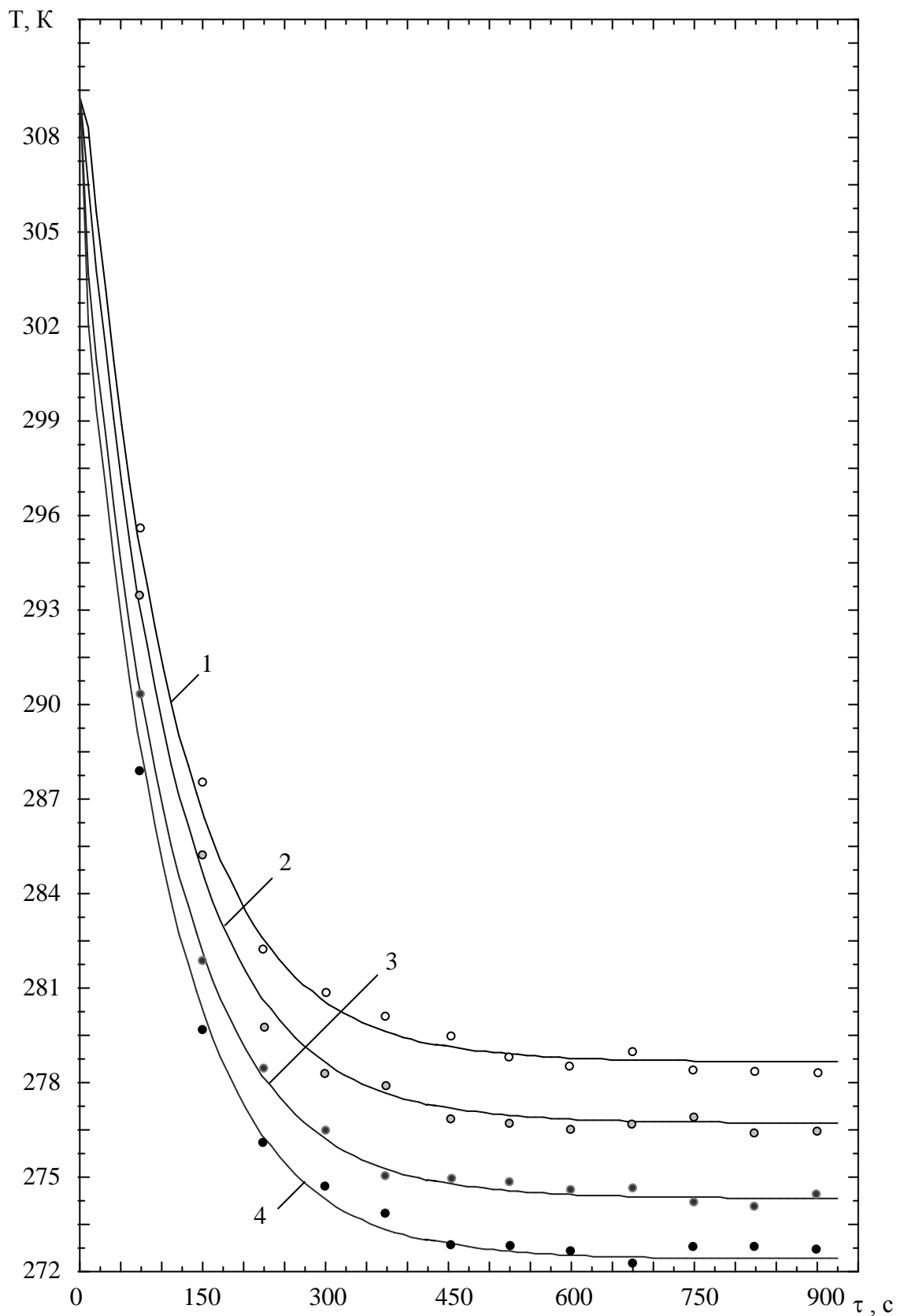


Рисунок 5.23 - Изменение температуры имитатора биологического объекта во времени при охлаждающем воздействии для различных значений тока питания ТЭБ

1 –  $I_{TЭМ} = 7$  А; 2 –  $I_{TЭМ} = 10$  А; 3 –  $I_{TЭМ} = 13$  А; 4 –  $I_{TЭМ} = 15$  А

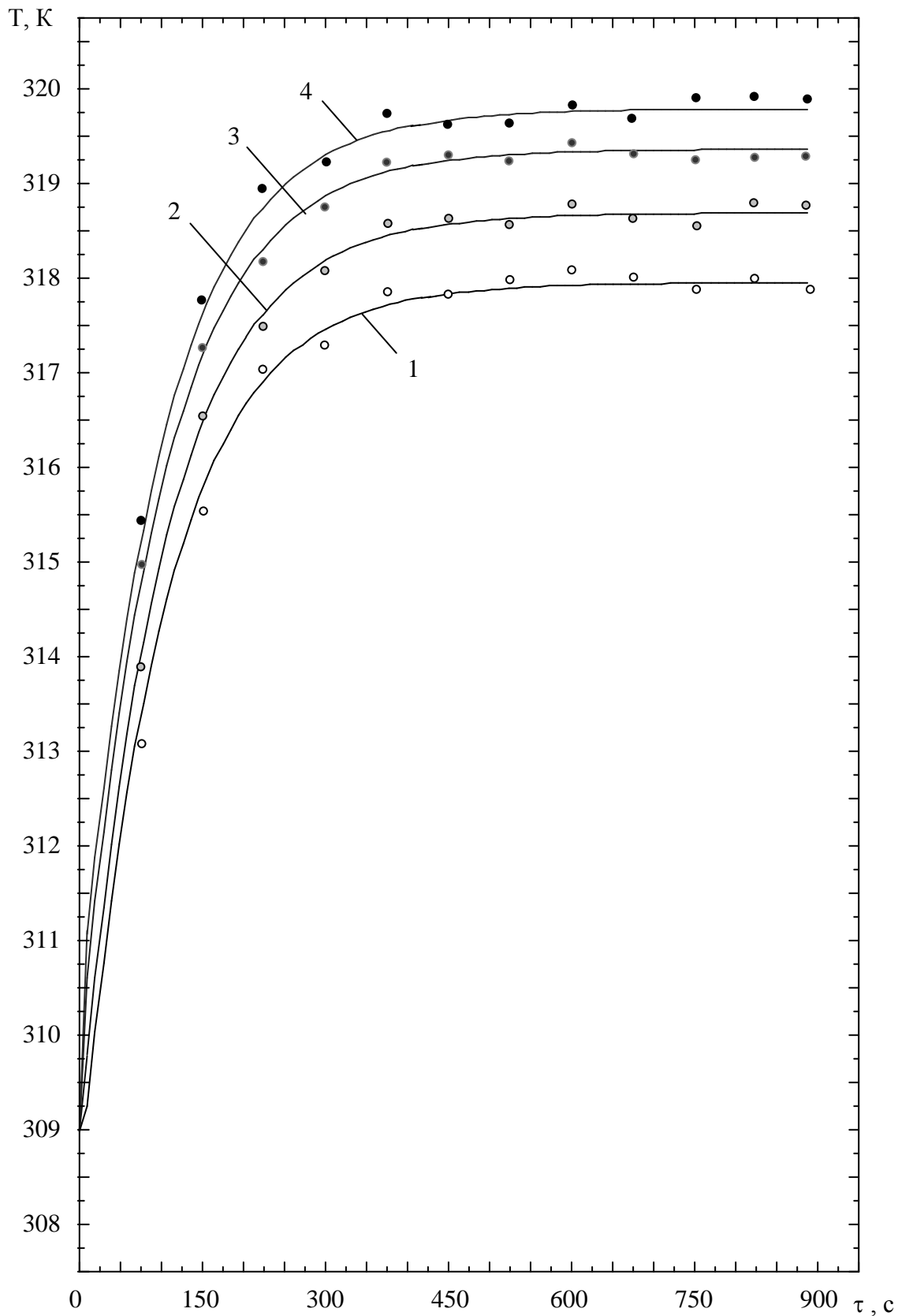


Рисунок 5.24 - Изменение температуры имитатора биологического объекта во времени при нагревающем воздействии для различных значений тока питания ТЭБ

1 –  $I_{\text{ТЭМ}} = 6$  А; 2 –  $I_{\text{ТЭМ}} = 8$  А; 3 –  $I_{\text{ТЭМ}} = 10$  А; 4 –  $I_{\text{ТЭМ}} = 12$  А

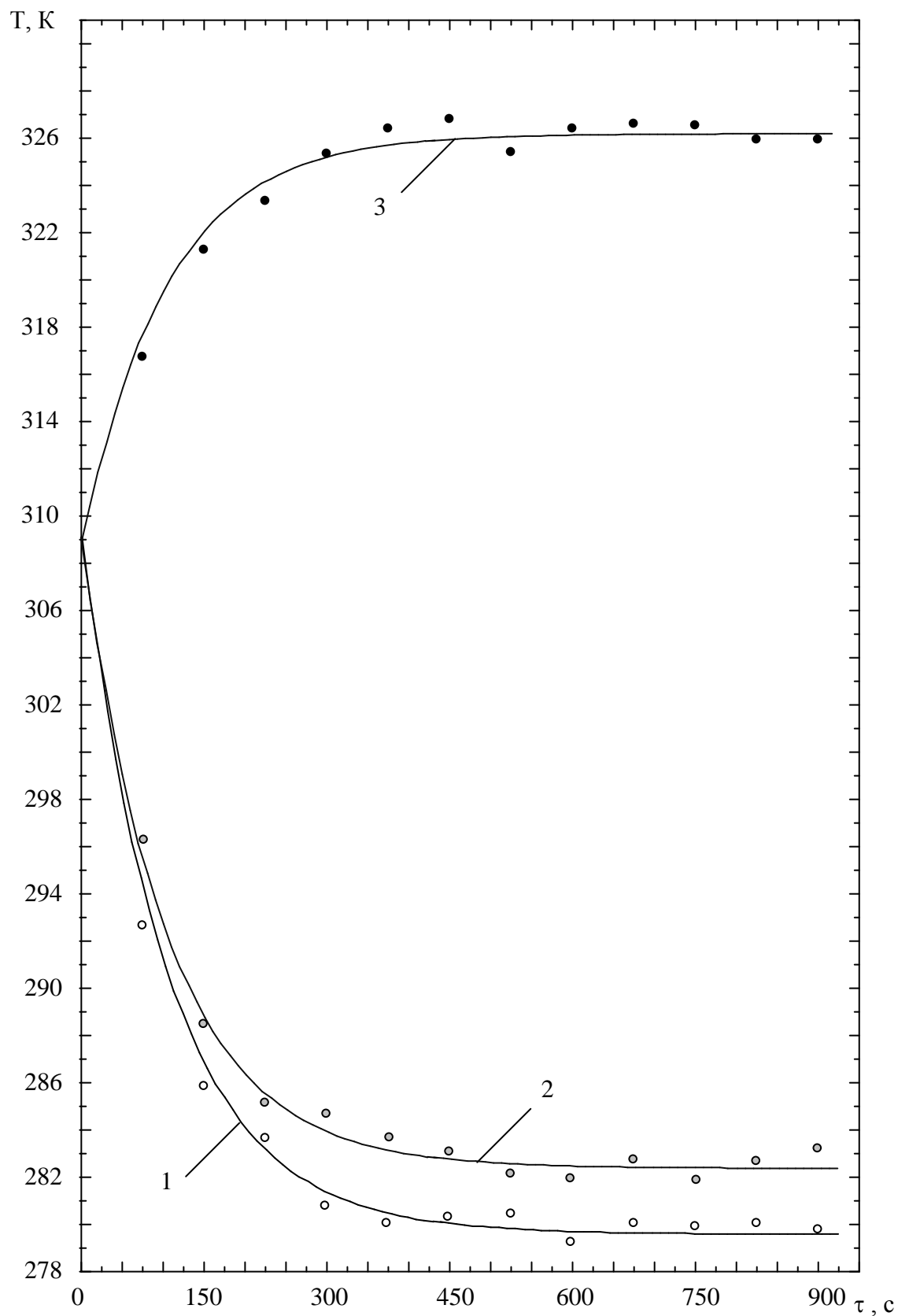


Рисунок 5.25 - Изменение температуры в различных точках системы ТЭС – биологический объект во времени при охлаждающем воздействии для  $I_{ТЭМ} = 7 \text{ A}$

1 – холодный спай ТЭМ, 2 – имитатор биологического объекта, 3 – горячий спай ТЭМ

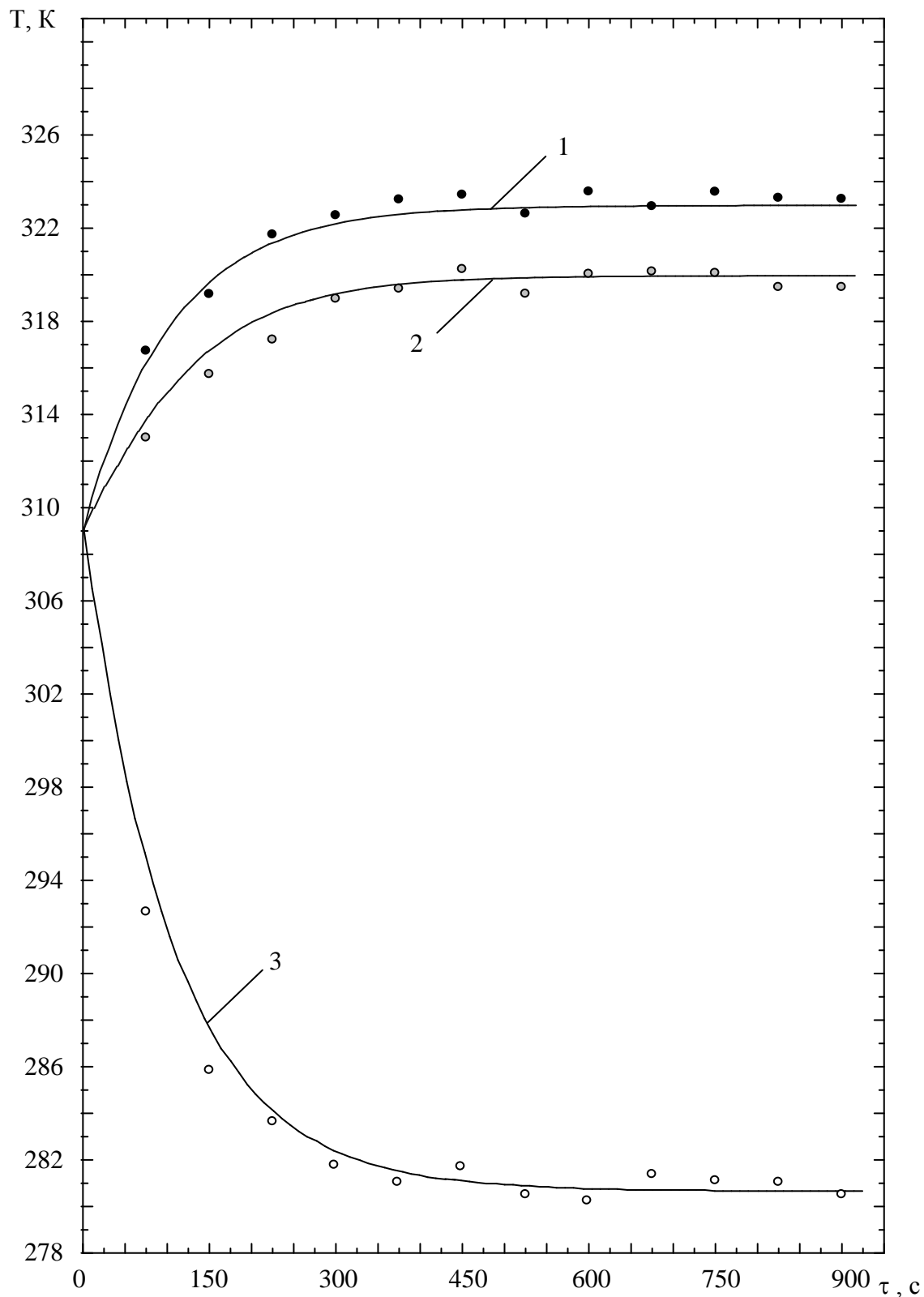


Рисунок 5.26 - Изменение температуры в различных точках системы ТЭС – биологический объект во времени при нагревающем воздействии для  $I_{ТЭМ} = 8$  А

1 – горячий спай ТЭМ, 2 – имитатор биологического объекта, 3 – холодный спай ТЭМ

Для исследования динамических характеристик ТЭС получены зависимости изменения температуры имитатора биологического объекта во времени при смене режимов работы прибора, изображенные на рисунке 5.27. Результаты измерений соответствуют токам питания ТЭБ 5 А, 7 А, 9 А. Полученные экспериментальные данные также соответствуют результатам теоретического исследования ТЭС, проведенным по составленной математической модели прибора.

Согласно результатам измерений продолжительность переходного процесса, соответствующего переходу устройства с режима охлаждения на режим нагрева составляет порядка 8-9 мин, что с приемлемой точностью соответствует теоретическим выкладкам и результатам, полученным на этапе математического моделирования.

Экспериментальные данные определяют приемлемую точность математической модели ТЭС. Отклонение расчетных и экспериментальных данных не превышает 8-9 %.

Наибольшее отклонение расчетных данных от опыта наблюдается на промежутке времени, связанном с выходом прибора на режим, что определяется влиянием окружающей среды и неидеальной тепловой изоляцией системы «прибор-объект воздействия», а также некоторым разбросом параметров ТЭМ и измерительных приборов. При этом в случае охлаждения экспериментальные данные имеют несколько большее значение, чем расчетные, а в случае нагрева – меньшее значение на всем диапазоне измерений. Указанное обстоятельство, в основном, связано с неидеальностью тепловой изоляции, что не удовлетворяет условиям, принятым в математической модели, и соответственно, теплопритоках к системе. Данные обстоятельства следует учитывать при проектировании такой системы, предназначенной для теплового воздействия на отдельные области человеческого организма.

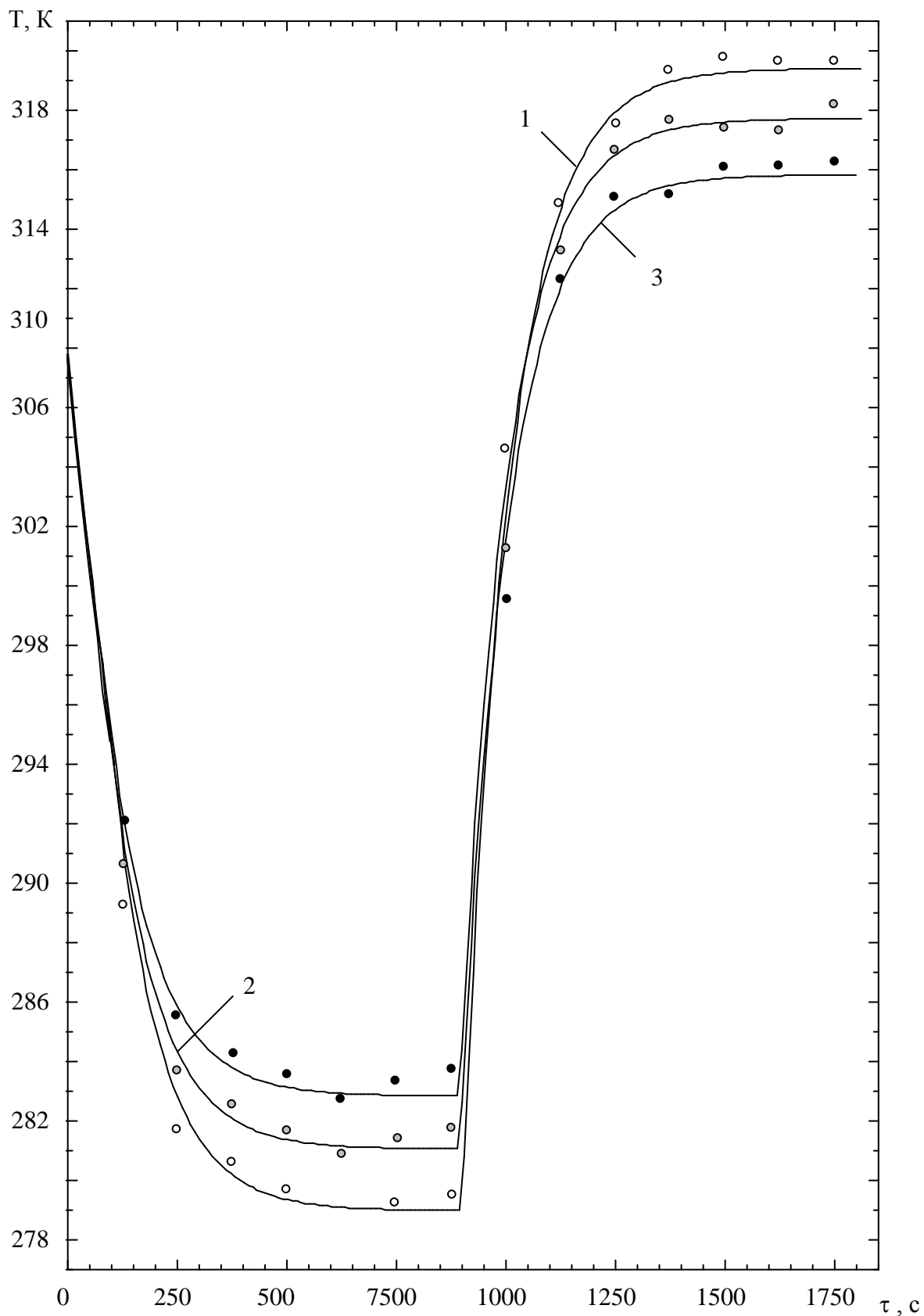


Рисунок 5.27 - Изменение температуры биологического объекта во времени при контрастном динамическом тепловом воздействии с переходом ТЭС из режима охлаждения в режим нагрева для различных значений тока питания ТЭМ

1 –  $I_{ТЭМ} = 9 \text{ A}$ ; 2 –  $I_{ТЭМ} = 7 \text{ A}$ ; 3 –  $I_{ТЭМ} = 5 \text{ A}$



## **5.5 Экспериментальные исследования термоэлектрической системы для внутриполостного теплового воздействия**

Структурная схема измерительного стенда изображена на рисунке 5.28.

Объектом натуральных испытаний являлся опытный образец ТЭС для внутриполостного теплового воздействия с двумя, и для сравнения с одним, ТЭБ. Опытный образец состоит из медного цилиндра 1, выполняющего функции теплопровода, находящегося с обеих сторон в тепловом контакте с основной ТЭБ 2 и дополнительной ТЭБ 3. Отвод тепла от горячего спая ТЭБ 2 обеспечивается посредством жидкостного теплообменного аппарата 4. Теплопровод 1, ТЭБ 2 и ТЭБ 3 по боковой поверхности имеют тепловую изоляцию 5.

Опытный образец помещался в теплоизолированную климатическую камеру 6. ТЭБ запитывались источниками электрической энергии 10 и 11. Нагрузка на наконечник моделировалась посредством электрического нагревателя, представляющего собой намотанную на цилиндр нихромовую проволоку 13, подключенной к индивидуальному источнику питания 14. Температура в контрольных точках регистрировалась посредством термопар 12 подключенных к технологическому многоканальному измерителю ИРТМ 2402/МЗ 15.

В ходе натурального эксперимента измерялись напряжения и ток на основной и дополнительной ТЭБ, температура окружающей среды, температуры в контрольных точках опытного образца ТЭС. Термопары размещались на воздействующем наконечнике, горячих и холодных спаях ТЭБ, входе и выходе жидкостного теплообменного аппарата, по длине теплопровода.

Исследовалась работа ТЭС с одной и с двумя ТЭБ. Для каждого конструктивного варианта прибора измерения проводились при его холостом ходе, с тепловой нагрузкой. Измерения проводились для четырех значений питающего тока (10 А; 15 А; 20 А и 23 А) основной ТЭБ и трех значений питающего тока (5 А; 10 А; 15 А) дополнительной ТЭБ.

Для имитации биологического объекта использовалась его желатиновая модель с температурой 310 К. После выхода ТЭС на режим, она приводилась в тепловой контакт с желатиновой моделью.

В соответствие с требованиями, предъявляемыми к устройству в соответствие с методиками проведения медицинских процедур, задавались следующими исходными данными:

- температурный диапазон – 223-248 К;
- температура окружающей среды – 298-300 К;
- точность термостабилизации – 0,5 К;
- отвод теплоты от горячих спаев основной ТЭБ осуществлялся жидкостным теплообменным аппаратом.

Для определения переходных характеристик ТЭС, связанных с определением времени его выхода на режим, проведены измерения при холостом режиме работы прибора. На рисунке 5.29 изображены графики изменения температуры наконечника во времени при различных величинах тока питания ТЭБ без тепловой нагрузки. Согласно представленным кривым длительность выхода устройства в стационарный рабочий режим примерно 4,5-5 мин. При этом с ростом силы тока ТЭБ, температура наконечника снижается.

На рисунке 5.29, а рассмотрено изменение во времени температуры наконечника для различных токов питания в случае применения в ТЭС только основной ТЭБ. Согласно результатам расчета максимальное снижение температуры при данных условиях составляет 237 К при токе 23 А и повышается на 2, 4 и 8 К соответственно для значений токов питания 20 А, 15 А и 10 А. На рисунке 5.29, б изображены графики изменения во времени температуры наконечника для различных токов питания при использовании в системе основной и дополнительной ТЭБ. Данные зависимости определяют, что в случае применения дополнительной ТЭБ, повышение ее силы тока с 5 А до 12 А при питании основной ТЭБ током силой 23 А температура наконечника уменьшается с 237 К до 224 К.

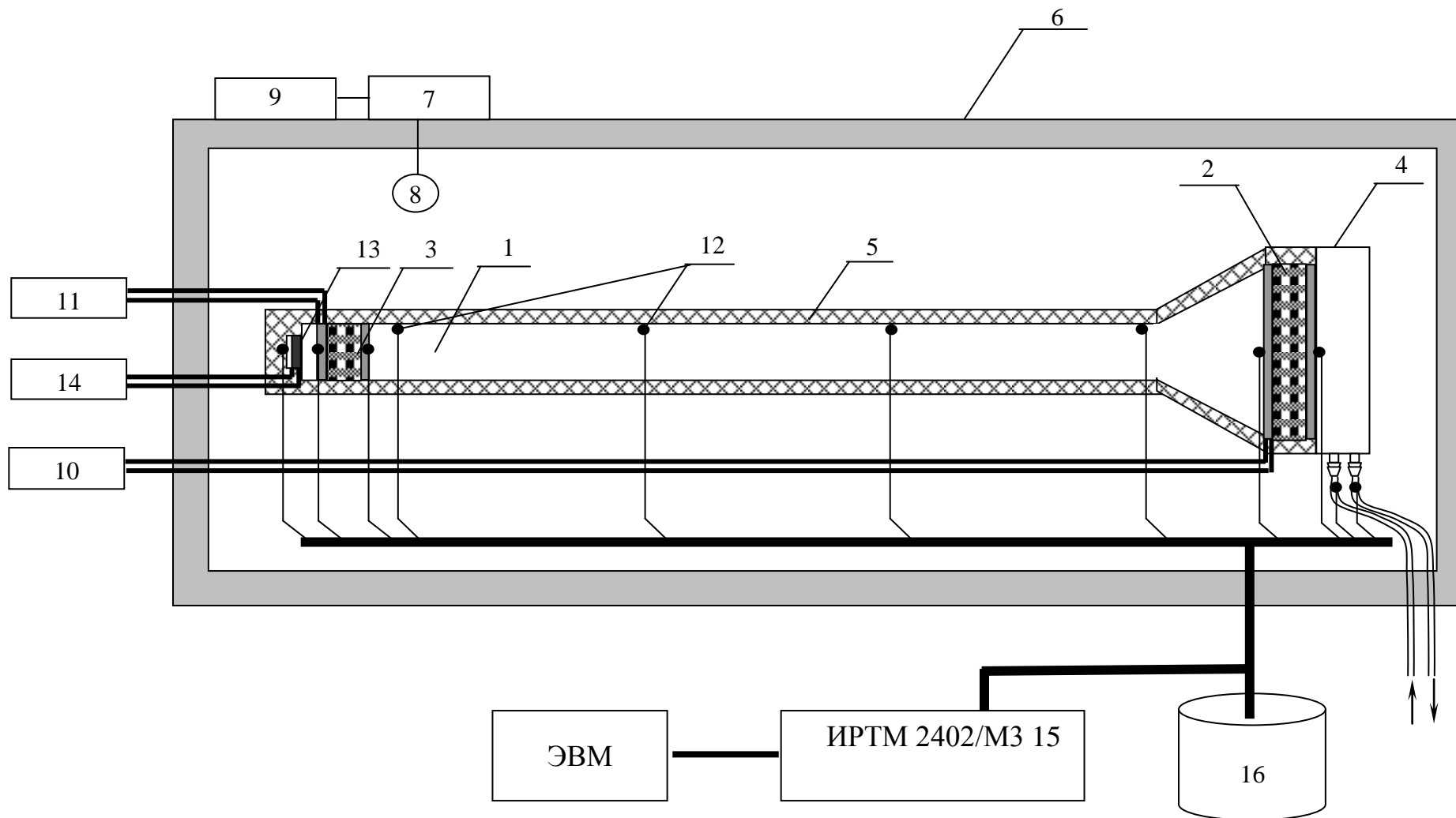


Рисунок 5.28 - Структурная схема экспериментального стенда устройства для исследования ТЭС для внутриволокнистого теплового воздействия

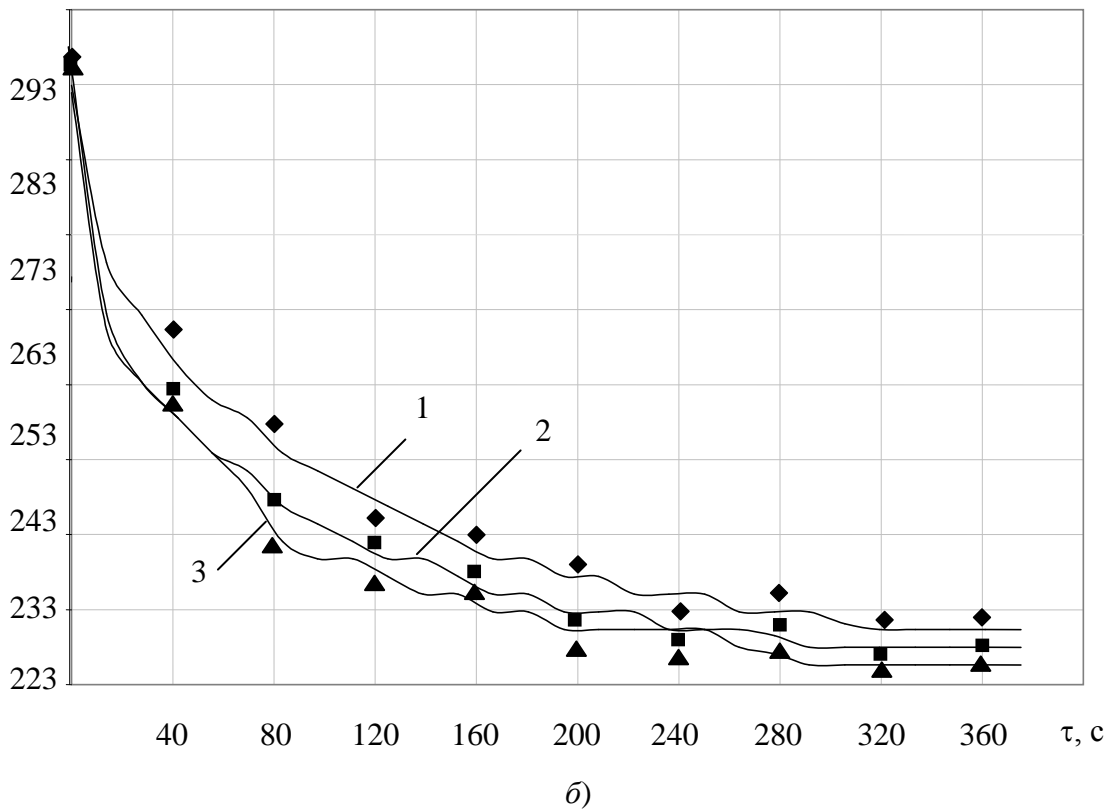
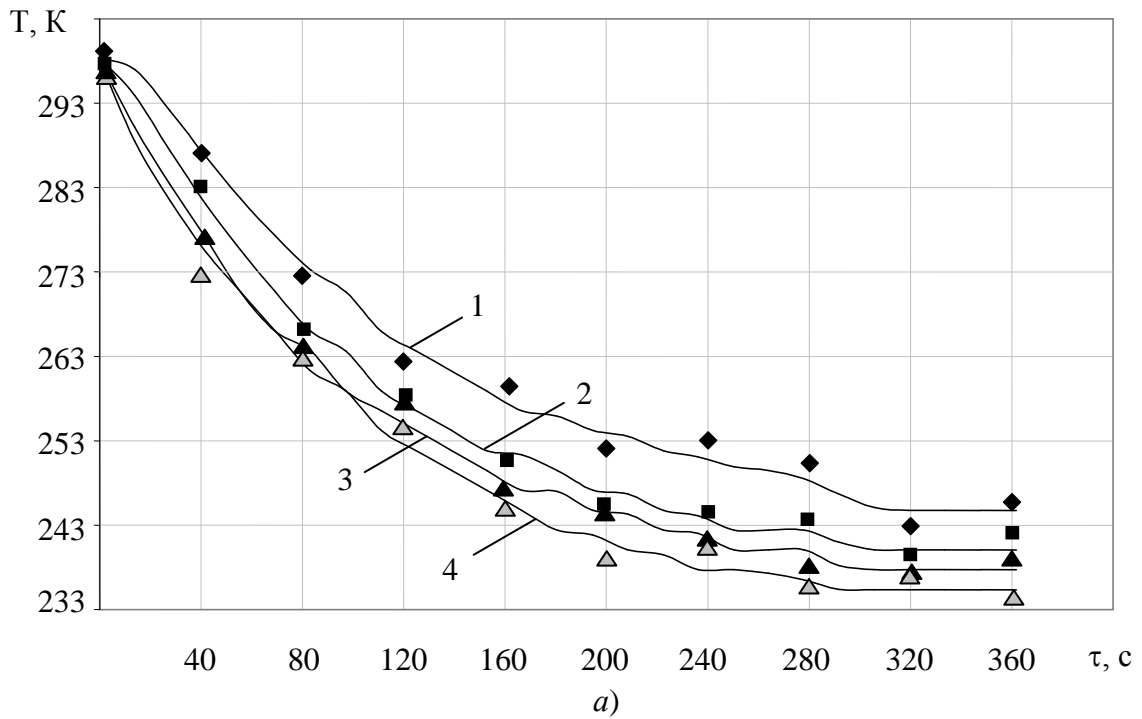


Рисунок 5.29 - Изменение температуры наконечника во времени при различных значениях тока питания ТЭБ, без нагрузки  
*a)* конструкция системы с одной ТЭБ: 1 – 30 А, 2 – 40 А, 3 – 45 А, 4 – 50 А;  
*б)* конструкция системы с двумя ТЭБ, ток питания основной ТЭБ 50 А, дополнительной ТЭБ: 1 – 5 А, 2 – 10 А, 3 – 12 А.

Одним из существенных факторов, сказывающихся на стабильной и надежной работы ТЭС, является обеспечение эффективного теплосъема с горячих спаев основной ТЭБ. Для оценки эффективности работы теплосъемной системы регистрировались измерения температуры горячих спаев основной ТЭБ во времени, представленные на рисунке 5.30. Для рассмотренного случая при токах питания основной и дополнительной ТЭБ соответственно 23 А и 10 А значение температуры горячего спаев основной ТЭБ не превышает 302 К при температуре жидкости в теплообменном аппарате 291 К и скорости ее протекания 0,07 л/с.

Для анализа тепловых потерь по теплопроводу длиной 150 мм, получены зависимости изменения температуры по его длине для различных моментов времени без нагрузки, которые изображены на рисунке 5.31. Согласно графикам зависимости наибольший перепад температуры по длине теплопровода при токах питания основной и дополнительной ТЭБ 23 А и 10 А, равняется 14 К и приходится на момент включения прибора. После выхода ТЭС на стационарный режим величина этого перепада температур не превышает 3 К, что дает возможность говорить об относительной равномерности распределения температурного поля по его длине. Данное обстоятельство дает возможность ввести в математическую модель системы какую-то одну усредненную температуру теплопровода. При этом данное упрощение существенного влияния на точность модели оказывать не будет.

На рисунках 5.32-5.33 рассмотрены зависимости изменения температуры наконечника от времени при наличии тепловой нагрузки на него. В соответствии с данными работы [150] значение тепловой нагрузки составляет 1 Вт, что согласуется со средней величиной тепловыделений в человеческом организме. Согласно проведенным измерениям при токах питания дополнительной ТЭБ 5 А, 10 А и 12 А температура наконечника при выходе его на стационарный режим без тепловой нагрузки составляет 224 К, 227 К и 239 К, что соответствует температурам наконечника на графиках в начальный момент времени. Как показывают зависимости на рисунке 5.32, действие нагрузки на

систему повышает температуру воздействующего наконечника примерно на 6 К для каждого тока, соответственно ее значение для этих случаев составляет 230 К, 233 К и 245 К. При этом время выхода ТЭС на стационарный режим составляет примерно 2,5 минут. Аналогичная зависимость получена и для конструкции прибора с одной основной ТЭБ. Повышение температуры по отношению к начальной составило 2,5 К и равнялось 245 К для тока питания ТЭБ 23 А. Указанные данные проиллюстрированы на рисунке 5.33.

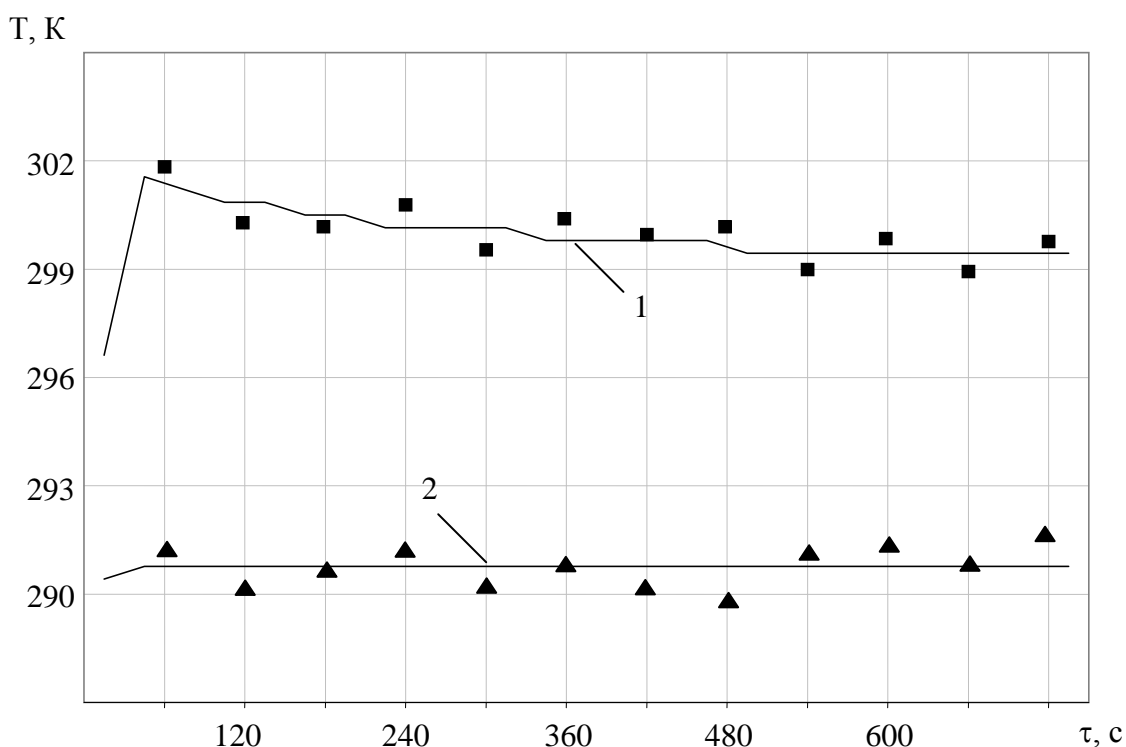


Рисунок 5.30 - Изменение температуры горячих спаев основной ТЭБ во времени без нагрузки, ток питания ТЭБ - 23 А, дополнительной ТЭБ – 10 А.

1 – охлаждающая жидкость, 2 – горячий спай основной ТЭБ

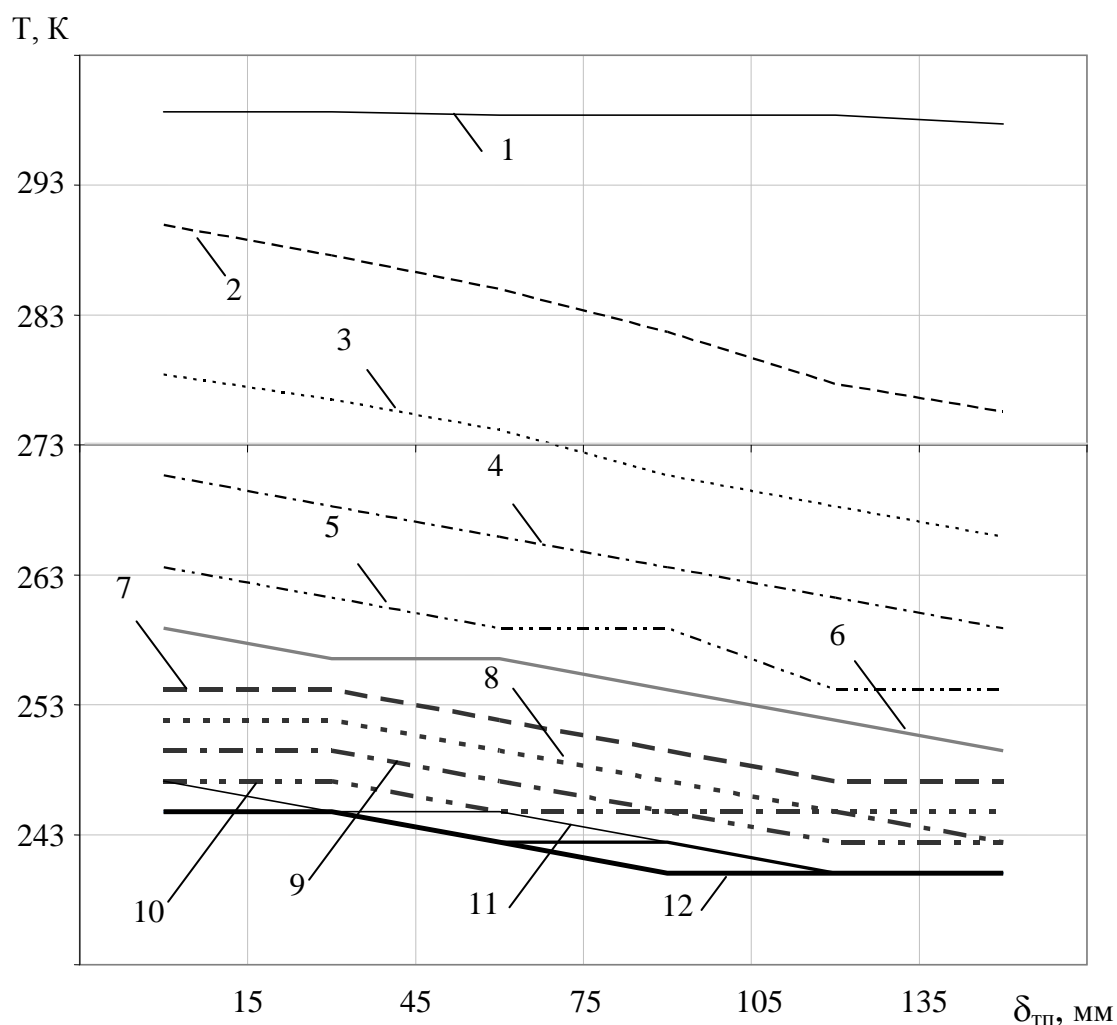


Рисунок 5.31 - Распределение температуры по длине теплового мостика без нагрузки, ток питания основной ТЭБ - 23 А, ток питания дополнительной ТЭБ – 10 А

1 –  $\tau=0$ , 2 –  $\tau=2$  мин., 3 –  $\tau=4$  мин., 4 –  $\tau=6$  мин., 5 –  $\tau=8$  мин., 6 –  $\tau=10$  мин., 7 –  $\tau=12$  мин., 8 –  $\tau=14$  мин., 9 –  $\tau=16$  мин., 10 –  $\tau=18$  мин., 11 –  $\tau=20$  мин., 12 –  $\tau=22$  мин.

T, K

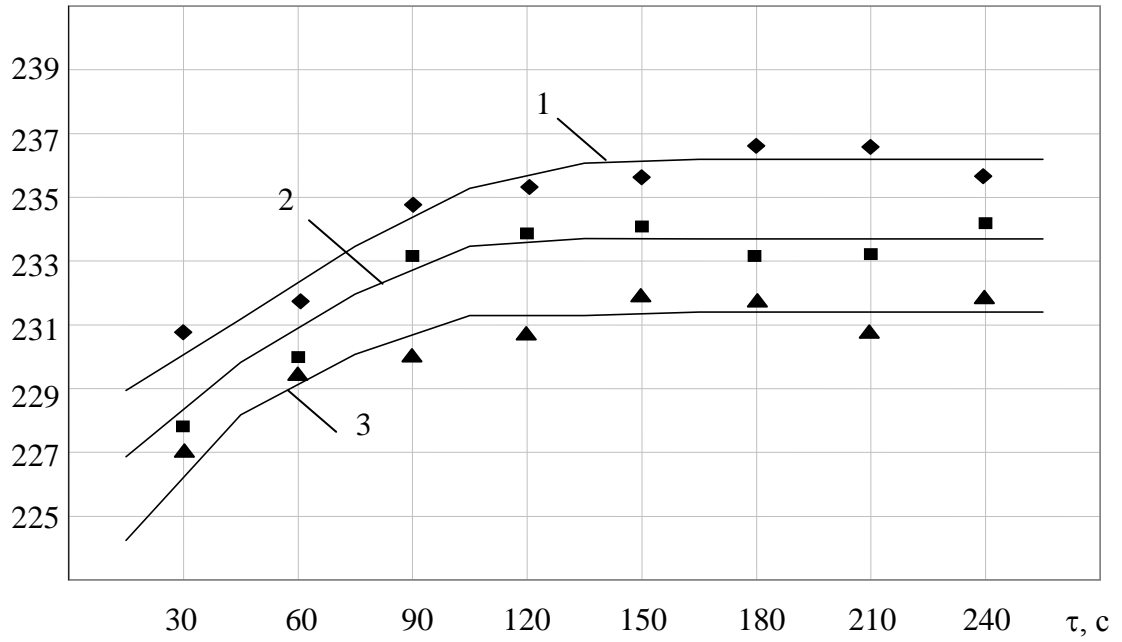


Рисунок 5.32 - Изменение во времени температуры наконечника при различных значениях тока питания дополнительной ТЭБ с нагрузкой; ток питания основной ТЭБ 23 А  
1 – 5 А, 2 – 10 А, 3 -12 А

T, K

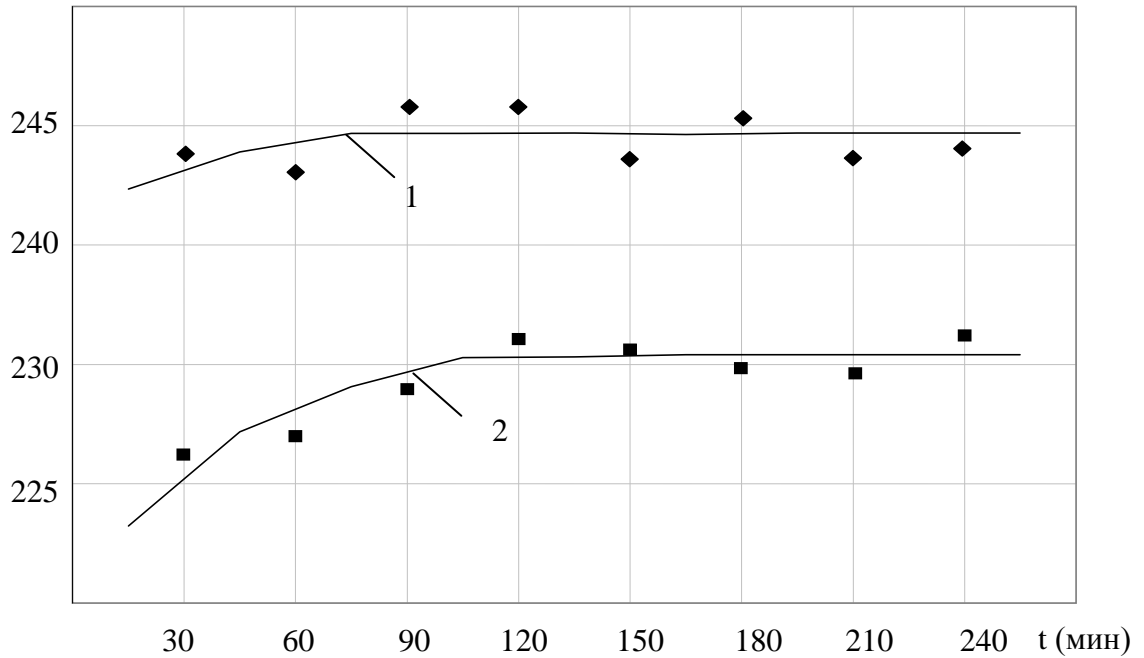


Рисунок 5.33 - Изменение во времени температуры наконечника с одной (1) и двумя ТЭБ (2), с нагрузкой, ток питания основной ТЭБ – 23 А; ток питания дополнительной ТЭБ – 10 А



## 5.6 Оценка погрешности измерений

Для оценки погрешности измерений использовались методы статистической обработки информации. Результаты статистического анализа позволили оценить достоверность выводов, полученных при интерпретации экспериментального материала. При этом информация, извлеченная на статистическом этапе из наблюдений, являлась входной по отношению к этапу интерпретации с использованием регуляризирующих алгоритмов и позволила дать оценку неопределенности входных данных, необходимую для корректного применения этих алгоритмов и оценки неопределенности регуляризованного решения.

Исследования проводились на основе метода статистической обработки многократных отсчетов. При этом решались следующие задачи:

- оценивание случайной погрешности, то есть области неопределенности исходных экспериментальных данных;
- нахождение более точного усредненного результата исследования;
- оценивание погрешности этого усредненного результата, то есть более узкой его области неопределенности.

При осуществлении экспериментов соблюдалась следующая схема проведения опытов. Измерительная аппаратура калибровалась, тщательно выверялись режимы измерений, устанавливались необходимые значения температуры и влажности. Каждый отдельный опыт проводился четыре раза в идентичных условиях.

При построении экспериментальных графиков использовалось усредненное значение измеренных величин, определяемое по формуле:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (5.1)$$

где  $n=4$  – количество равноценных опытов,  $x_i$  - измеряемая величина при  $i$ -м повторном опыте.

Значение дисперсии определялось следующим образом:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}{n-1}, \quad (5.2)$$

среднеквадратичное отклонение

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}{n-1}}. \quad (5.3)$$

Оценка погрешности измерений в соответствии с [89], осуществлялась с доверительной вероятностью 0,9. Величина погрешности измерений определялась по выражению:

$$\Delta_{0,95} = 1,6\sigma. \quad (5.4)$$

Анализ погрешностей измерений по вышеприведенной методике показал, что средний для экспериментов доверительный интервал при определении силы тока составил  $\pm 0,22$  А, а точность измерений значений силы тока по среднеквадратичным отклонениям равна  $\pm 0,09$  А. Средний доверительный интервал при определении температуры составил  $\pm 0,45$  К при точности измерений температуры по среднеквадратичным отклонениям, равной 0,14 К.

## **ГЛАВА 6. РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ ОХЛАЖДАЮЩИХ ПРИБО- РОВ И СИСТЕМ НА БАЗЕ СИЛЬНОТОЧНЫХ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ**

### **6.1 Конструкции сильноточных слоистых термоэлектрических батарей**

#### **6.1.1 Конструкции сильноточных слоистых термоэлектрических батарей с непосредственным контактом к объекту охлаждения**

На основе результатов исследований, описанных в предыдущих главах, разработан ряд конструктивных вариантов сильноточных слоистых ТЭБ [96-102, 113, 132, 133]. К основным достоинствам ТЭБ данного типа относятся следующие.

1. В слоистых ТЭ практически полностью устранены перегородки теплоты от горячих спаев к холодным по межтермоэлементным пространствам за счет их специального конструктивного исполнения.

2. Существенно уменьшены термомеханические напряжения, связанные с тепловым расширением составляющих ТЭ материалов, а также биметаллическим эффектом, за счет чего повышена надежность ТЭБ.

3. Коммутационные элементы вследствие специфики своего исполнения имеют намного меньшие габаритные размеры, чем в существующих П-образных ТЭ, что дает возможность уменьшить их электрические сопротивления и теплоемкости, а это определяет хорошие перспективы по достижению более низких температур и повышению термодинамических характеристик ТЭБ.

4. В ТЭБ слоистой конструкции могут быть использованы ветви различной высоты, что позволит обеспечить точное согласование величины оптимального тока и перепада температур между спаями для каждого отдельно взятого ТЭ, в следствие чего будет иметь место увеличение энергетической эффективности батареи.

5. Уменьшена толщина теплопереходов, соответственно для электрической и тепловой изоляции требуется меньше расходов.

6. Улучшен съём теплоты с горячих спаев ТЭ за счет снижения размеров коммутационных элементов, ведущего к уменьшению термического сопротивления контактов.

На рисунке 6.1 приведен первый конструктивный вариант сильноточной ТЭБ слоистой конструкции.

ТЭБ состоит из последовательно соединенных в электрическую цепь посредством коммутационных пластин 1 и 2 чередующихся ветвей, изготовленных соответственно из полупроводника р-типа 3 и n-типа 4. Электрическое соединение ветвей осуществляется посредством контакта ветвь р-типа 3 – коммутационная пластина 1 или 2 – ветвь n-типа 4, где ветвь р-типа 3 контактирует торцевой поверхностью к одной из поверхностей коммутационной пластины, а ветвь n-типа 4 – к противоположной. При этом каждая ветвь в ТЭБ контактирует противоположными торцевыми поверхностями с двумя коммутационными пластинами 1 и 2 за исключением токоподводящих ветвей.

Коммутационные пластины 1 и 2 имеют площадь, несколько большую, чем площадь поперечного сечения ветвей р- и n-типа 3 и 4, вследствие чего их части выступают за поверхность структуры, образованной ветвями ТЭБ. Отдельные части нечетных коммутационных пластин 1 выступают за одну поверхность структуры, а части четных коммутационных пластин 2 – за другую. Выступающие части коммутационных пластин могут быть покрыты защитным слоем высокотеплопроводного диэлектрика 5.

Поверхность структуры, образованной ветвями ТЭБ также может быть покрыта слоем диэлектрического теплоизоляционного материала 6. На крайних торцевых поверхностях ветвей, находящихся соответственно в начале и конце ТЭБ имеются контактные токоподводящие площадки 7.

При прохождении сквозь ТЭБ постоянного электрического тока, подаваемого от источника электрической энергии через контактные

площадки 7, между коммутационными пластинами 1 и 2, представляющими собой контакты ветвей р- и n-типа 3 и 4, возникает разность температур, обусловленная выделением и поглощением теплоты Пельтье.

При указанной на рисунке 6.1 полярности электрического тока происходит нагрев четных коммутационных пластин 2 и охлаждение нечетных 1. Если при этом за счет теплоотвода температура коммутационных пластин 2 поддерживается на постоянном уровне при заданном значении электрического тока, то температура коммутационных пластин 1 снизится до некоторого определенного значения. При заданном электрическом токе величина снижения температуры на коммутационных пластинах будет зависеть от тепловой нагрузки на них. Тепловая нагрузка складывается из теплопритока из окружающей среды и от коммутационных пластин 2, обусловленного теплопроводностью образующих ТЭБ ветвей, теплоты Джоуля, а также теплоты, поступающей от объекта охлаждения.

Теплоизоляция 6 служит для уменьшения теплопритока из окружающей среды, а защитный слой высокотеплопроводного диэлектрика 5 - для устранения возможности поражения электрическим током при эксплуатации ТЭБ.

Внешний вид фрагмента слоистой ТЭБ приведен на рисунке 6.2.

На рисунке 6.3 изображена модификация рассмотренного типа слоистой ТЭБ. Ее основное отличие состоит в том, что свободные концы коммутационных пластин 1 и 2 припаяны к электроизолированным друг от друга площадкам 5 и 6, выполненным в виде пленок металлов или сплавов, нанесенных на пластины из керамики 7 и 8. В этом случае конструкция коммутационных элементов имеет Т-образный вид, что позволяет улучшить условия сопряжения ТЭБ и объекта охлаждения. Данное обстоятельство упрощает технологическое исполнение охлаждающей системы, а также снижает тепловые потери при сопряжении объекта и ТЭС.

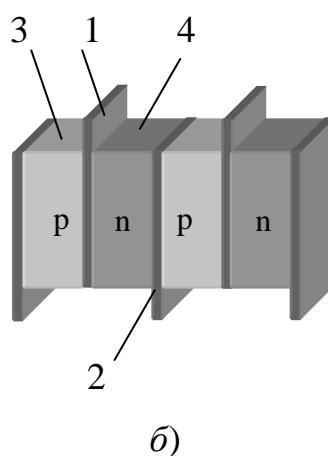
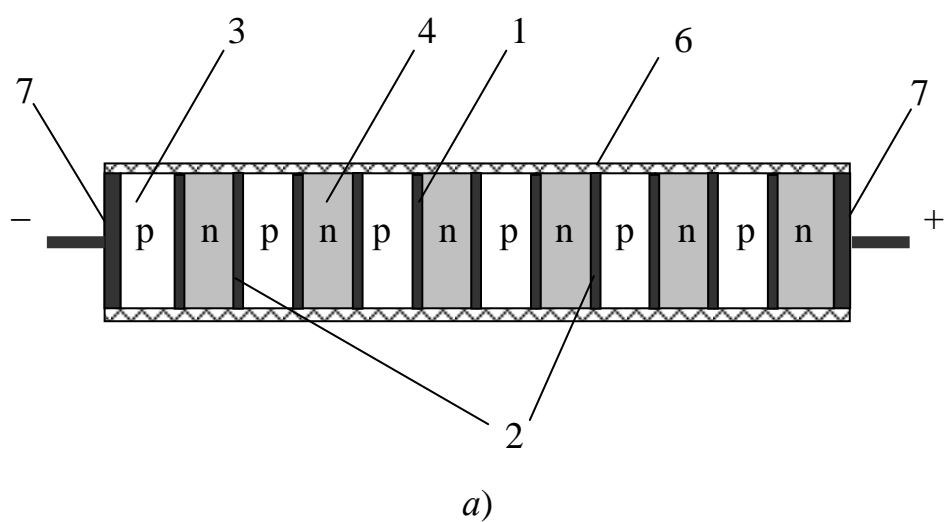
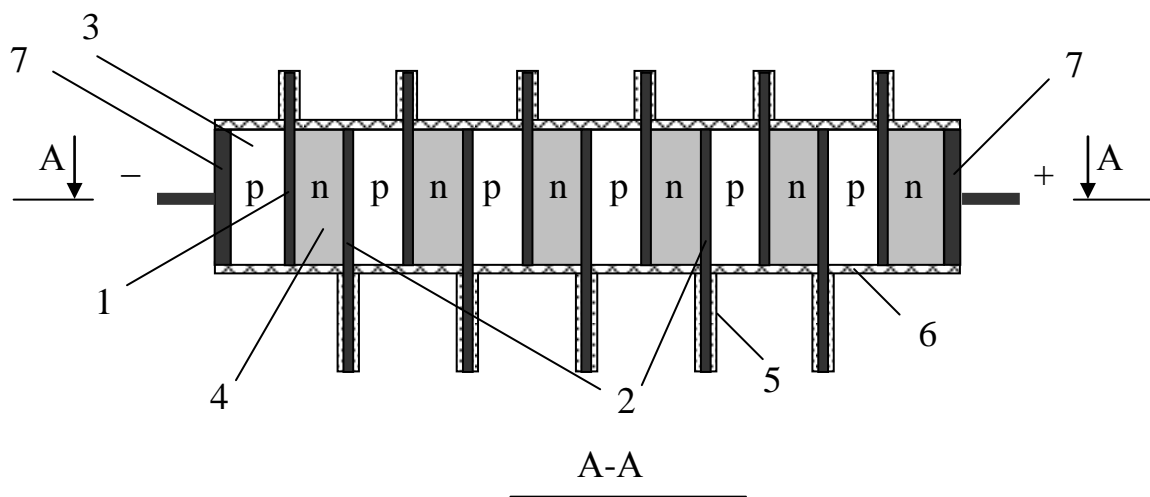


Рисунок 6.1 - Конструкция сильноточной слоистой ТЭБ  
 а) схематическое изображение  
 б) объемный вид



Рисунок 6.2 - Внешний вид фрагмента слоистой ТЭБ

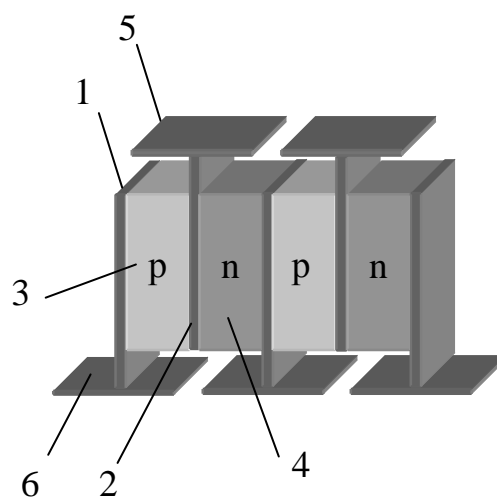
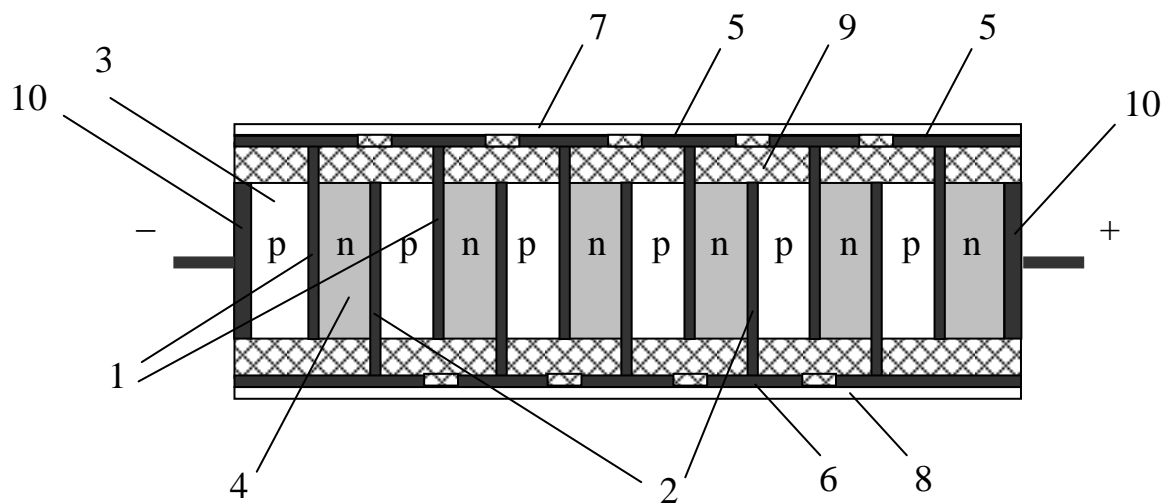


Рисунок 6.3 - Конструкция сильноточной слоистой ТЭБ с дополнительными коммутационными площадками



### **6.1.2 Конструкции высокоточных слоистых термоэлектрических батарей с дополнительными теплопроводами**

Разработаны слоистые ТЭБ, в которых сопряжение охлаждаемого элемента и источника холода производится посредством цельнометаллических теплопроводов (выполненных, например, меди или алюминия).

К достоинствам таких батарей относится механическая развязка охлаждаемого элемента, ТЭБ и системы теплосъема с горячих спаев ТЭ, а также конструктивная простота сопряжения с охлаждаемым объектом, находящимся в труднодоступных местах, в том числе входящим в состав блоков аппаратуры с плотной упаковкой элементов, или находящихся в герметичном объеме.

Конструкция ТЭБ приведена на рисунке 6.4, а внешний вид на рисунке 6.5.

В ней коммутационные пластины 3 и 4 изготовлены в виде электроизолированных друг от друга теплопроводов – гибких медных шин 5 с контактными площадками 6 и 7 на их концах, выполненными из электропроводного материала. Контактные площадки 6 контактируют с двух сторон с ветвями полупроводникового материала р- и n-типа 1 и 2, контактные площадки 7 – с контактными площадками 8, электроизолированными друг от друга, представляющими собой пленки из металла или сплава, нанесенного на керамические теплопереходы 9, причем все четные коммутационные пластины 4 соединены с одним, а нечетные 3 – другим теплопереходом. Контактные площадки 8, используемые в мощных ТЭБ, также могут быть выполнены в медных пластин, припаянных к электроизолированным пленочным контактам керамической пластины.

Рассмотренная конструкция слоистой ТЭБ даст возможность обеспечивать механически гибкое соединение охлаждаемого объекта с системой теплосброса, а также сопряжение с охлаждаемым объектом,

находящимся в труднодоступной зоне за счет таких свойств коммутационных элементов, как протяженность и гибкость.

На рисунке 6.6 изображена модификация данного конструктивного варианта [25]. На рисунке 11 - теплоизоляция. Отличительной особенностью ее является то, что ветви 1 и 2 имеют наклон в одной из координатных плоскостей, причем ветви 1 и 2 имеют противоположные углы наклона  $\vartheta$ , причем  $\vartheta$  лежит в пределах  $\frac{\pi}{18} \leq \vartheta < \pi$ . Коммутационные пластины 3 и 4 на одних концах выполнены со скосами под тем же углом и впаяны в пространство, ограниченное торцами ветвей р- и n-типов 1 и 2.

Преимуществом данного конструктивного исполнения ТЭБ является повышение теплоотдачи от коммутационных пластин ТЭ к объекту охлаждения.

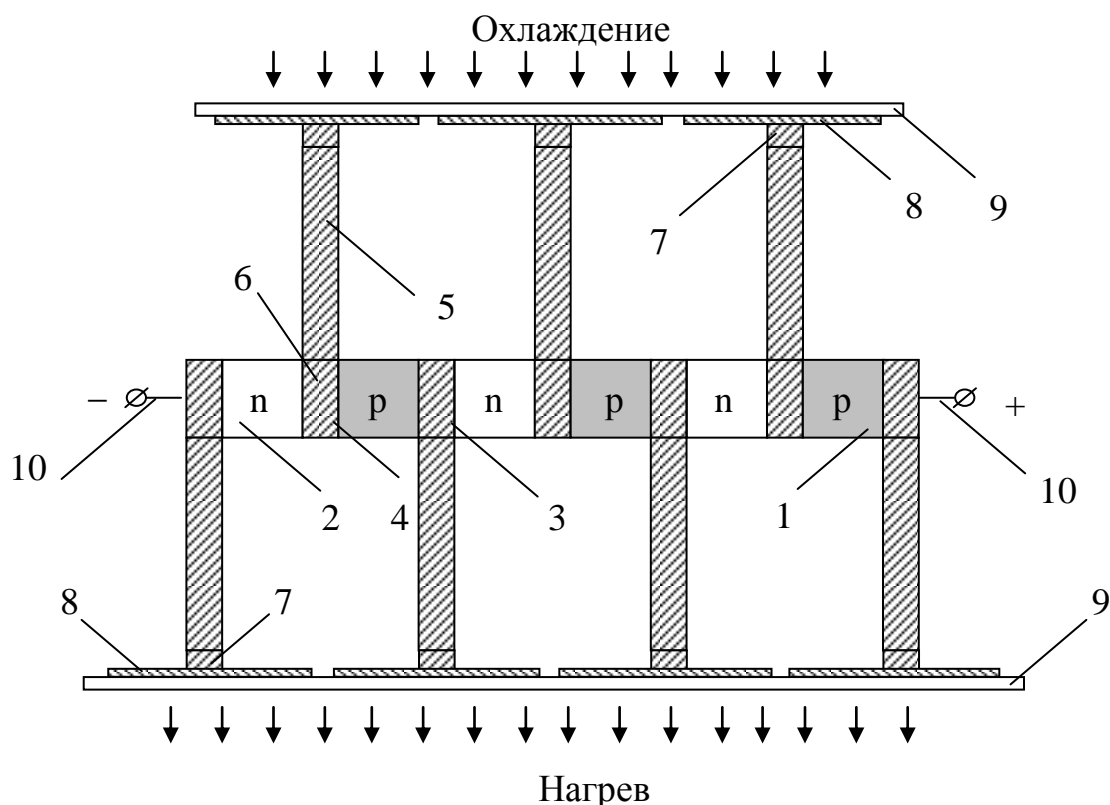


Рисунок 6.4 - Конструкция сильноточной слоистой ТЭБ с цельнометаллическими теплопроводами

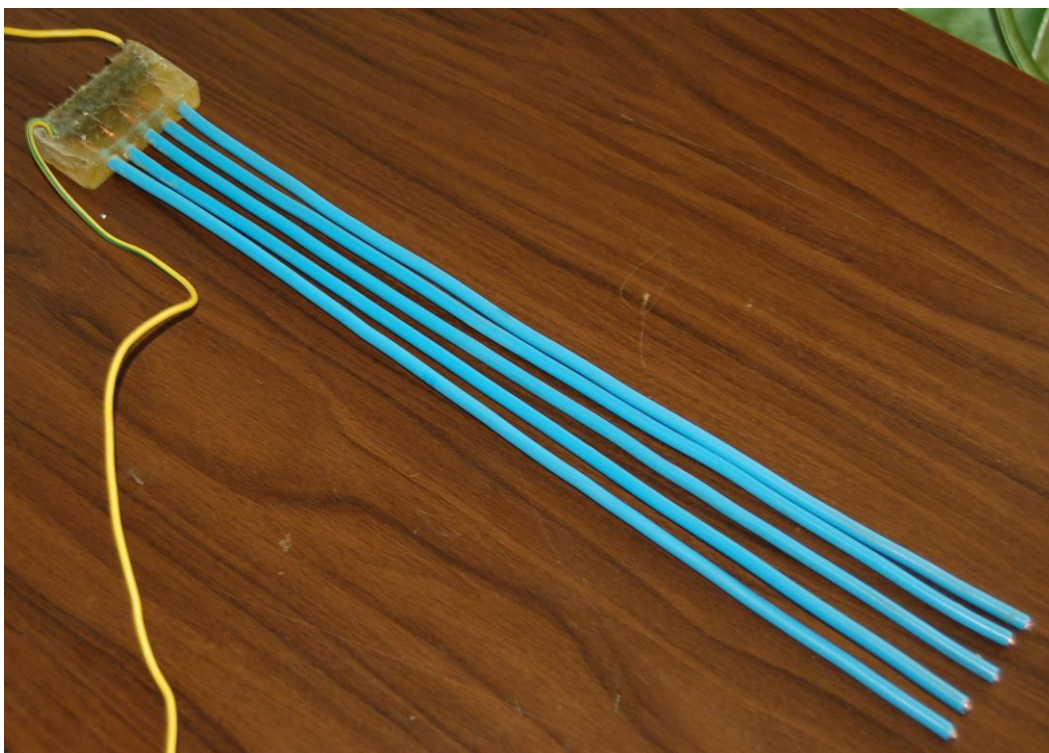


Рисунок 6.5 - Внешний вид сильноточной слоистой ТЭБ с цельнометаллическими теплопроводами

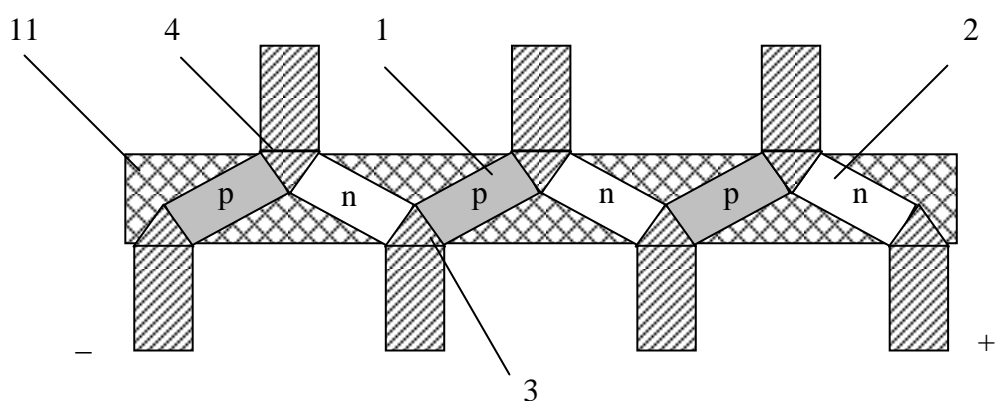


Рисунок 6.6 - Модификация сильноточной слоистой ТЭБ с цельнометаллическими теплопроводами и наклонным исполнением ветвей ТЭ

С целью снижения тепловых потерь по теплопроводу в конструкции такой ТЭБ целесообразным является использование тепловых термосифонов. Их основным достоинством является возможность передачи теплоты практически без потерь на относительно большие расстояния (до 3 м). Например, при использовании такого теплового термосифона в соответствии с расчетными данными при плотности теплового потока примерно  $1,4 \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup> тепловые потери при длине теплопровода 0,5 не превышали 1000 Вт/м<sup>2</sup>. Такие исключительные особенности тепловых термосифонов обеспечивают их широкое применение в теплофизическом приборостроении и холодильной технике, термоэлектрическом приборостроении для интенсификации процессов теплопередачи.

Кроме этого, применение тепловых термосифонов даст возможность обеспечивать сопряжение разнесенных на некоторое расстояние объектов и источников теплоты с минимальными потерями по их длине. Последнее обстоятельство обеспечит возможность создания более технологичных конструкций охлаждающих приборов в целом.

Применение тепловых термосифонов совместно с ТЭБ имеет ряд специфических особенностей, к которым относятся:

- эксплуатация в широком диапазоне низких и высоких температур;
- обеспечение высокой степени герметичности транспортной системы, рассчитанной на длительный срок службы;
- подбор теплоносителя с необходимыми характеристиками для рабочего интервала температур;
- учет влияния степени концентрации неконденсирующихся газов, находящихся в тепловом термосифоне, на перепад температур и др.

С учетом вышеизложенного перечня особенностей работы тепловых термосифонов разработана сильноточная слоистая ТЭБ, структурная схема которой изображена на рисунке 6.7. ТЭБ включает в себя последовательно соединенные ТЭ слоистой конструкции, тепловые термосифоны,

выполняющие функцию теплопроводов. Для отвода теплоты от горячих спаев ТЭ используется специальная система теплосъема.

Каждый ТЭ образован двумя ветвями, изготовленными из полупроводника соответственно р- и n-типа 1 и 2 и коммутационными элементами 3 и 4. Ветви 1 и 2 ТЭ расположены в ряд, а коммутационные элементы 3 и 4 изготовлены в виде полых электроизолированных гибких трубок 5, заполненных теплоносителем 6 с требуемой степенью герметичности, на концах которых установлены контактные площадки 7, 8, внутренняя поверхность трубок 5 может иметь оребрение 12.

Контактные площадки 7 на одном конце коммутационных элементов по бокам сопряжены с ветвями ТЭ р- и n-типа 1 и 2, а контактные площадки 8 на противоположном конце коммутационных элементов приведены в тепловой контакт с электроизолированными друг от друга площадками 9, изготовленными в виде пленок металлов или сплавов, нанесенных на пластины из керамики – теплопереходы 10. При этом все четные коммутационные элементы 4 приведены в контакт с одним, нечетные 3 сопряжены с другим теплопереходом 10. Контакты 11 предназначены для питания ТЭБ электрической энергией.

ТЭБ функционирует следующим образом.

В результате прохождения через ТЭБ постоянного электрического тока, поступающего от источника электрической энергии через контакты 11, между сопряженными контактными площадками 7 возникает разность температур, обусловленная выделением теплоты Пельтье. При полярности тока, соответствующей рисунку 5.7, происходит повышение температуры нечетных контактных площадок 7 и снижение температуры четных.

При нагреве нечетных контактных площадок 7 с оребренной поверхности 12 осуществляется интенсивный отвод теплоты за счет кипения теплоносителя 6. Образующийся пар поступает в верхнюю зону трубок 5, где через оребрение 12, контактные площадки 8, площадки 9, верхний теплопереход 10 отдает теплоту в окружающую среду, либо в

теплообменную аппаратуру. За счет этого пар охлаждается и конденсируется на поверхности 12, образовавшийся конденсат теплоносителя стекает в нижнюю зону теплового термосифона и опять поступает в нагреваемый участок. Отвод теплоты от нагретых контактных площадок 7, вследствие этого, производится за счет испарения теплоносителя 6.

При контакте нижнего теплоперехода 10 с объектом охлаждения его температура повышается, повышается также температура площадок 9, контактных площадок 8 и оребрения 12. При их нагреве происходит испарение теплоносителя 6. Образовавшийся пар перемещается в верхнюю зону трубок 5. В верхней зоне трубок 5 осуществляется конденсация теплоносителя 6 вследствие теплообмена с оребрением 12 четных («холодных») контактных площадок 7. Далее теплоноситель 6 стекает вниз – нагреваемую область трубки 5, находящуюся в тепловом контакте с объектом охлаждения.

Отвод теплоты от объекта в этом случае обеспечивается за счет высокого коэффициента теплообмена при испарении и конденсации теплоносителя 6.

На рисунке 6.8 представлена модификация ТЭБ, в которой ветви ТЭ размещены под зеркальным углом друг к другу, а коммутационные пластины занимают пространство, ограниченное торцами ветвей р- и n-типов 1 и 2. Коммутационные пластины 2 и 3 имеют форму трехгранной призмы с двугранным углом  $\vartheta$ , причем третья грань коммутационных пластин сопряжена с электроизолированными гибкими трубками 12 и 13, заполненными теплоносителем, имеющими внутреннее оребрение. Противоположными торцевыми поверхностями трубки приведены в тепловой контакт с охлаждаемым объектом и системой теплосброса.

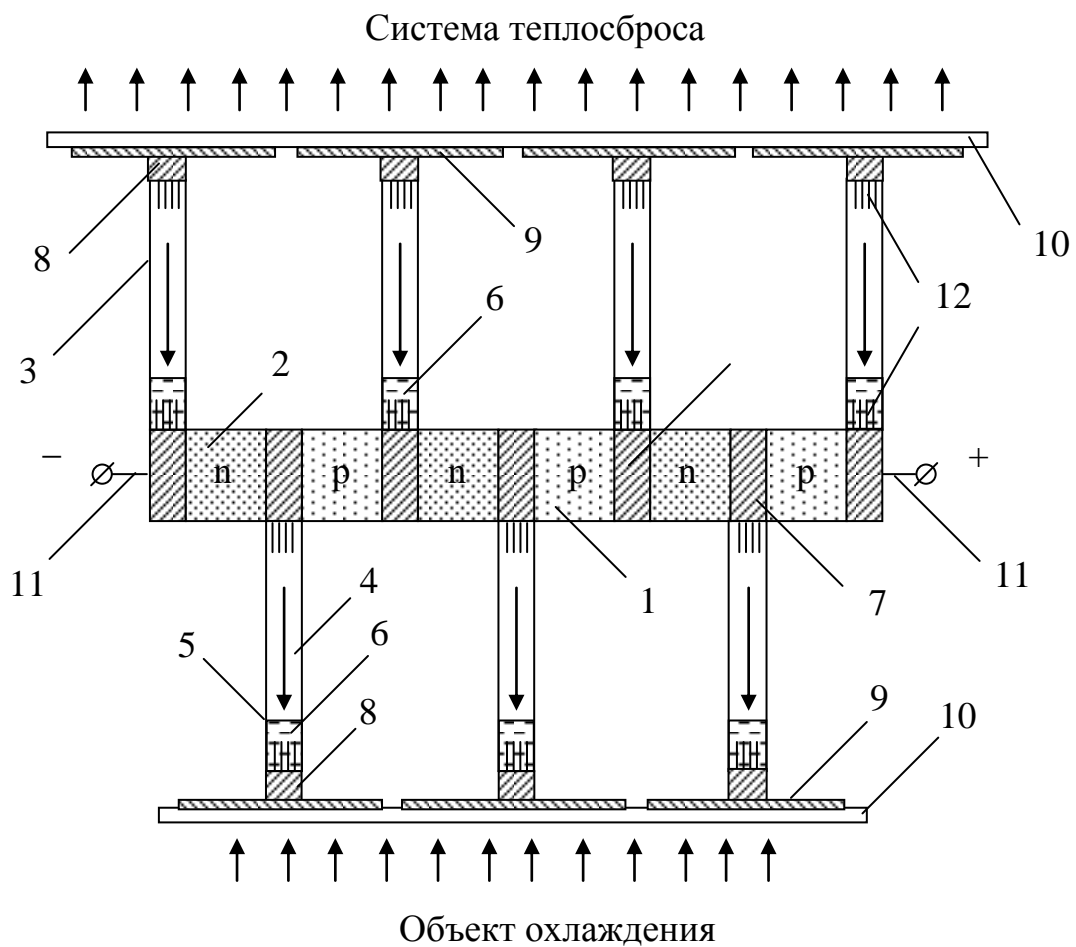


Рисунок 6.7 - Конструкция сильноточной ТЭБ слоистой конструкции с тепловыми термосифонами

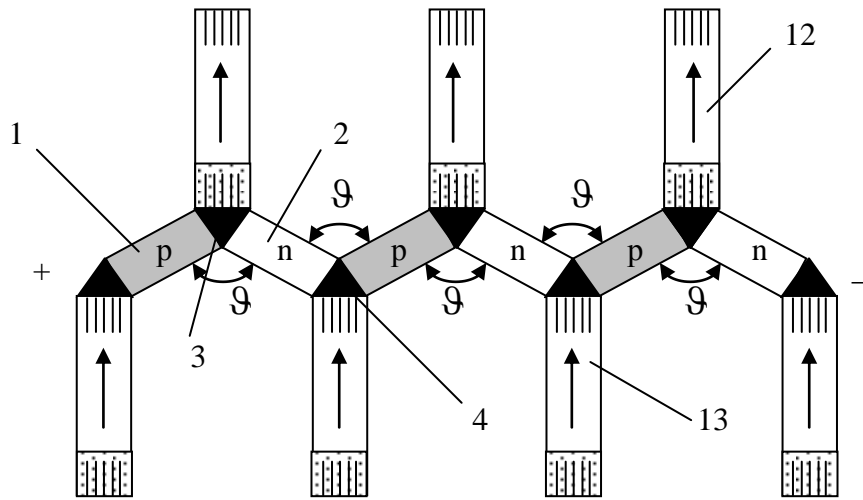


Рисунок 6.8 - Модификация сильноточной ТЭБ слоистой конструкции с тепловыми термосифонами

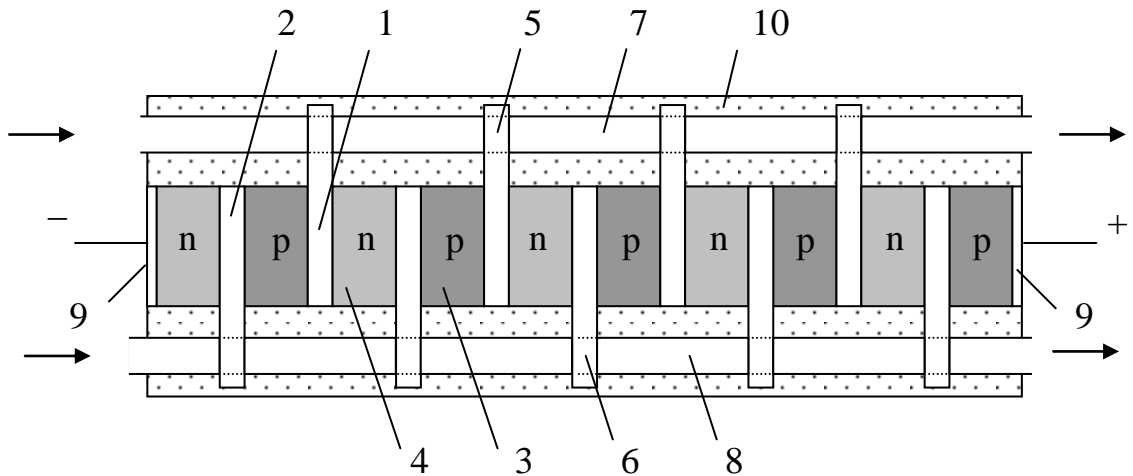


Рисунок 6.9 - Конструкция сильноточной слоистой ТЭБ с вторичным жидкостным контуром



### **6.1.3 Конструкции сильноточных слоистых термоэлектрических батарей с вторичным жидкостным контуром**

На рисунках 6.9-6.12 изображен ряд конструктивных вариантов ТЭБ с вторичным жидкостным контуром.

Отличительной особенностью ТЭБ, приведенной на рисунке 6.9, является то, что коммутационные пластины 1 и 2 в той части, которая выступает за поверхность структуры, образованной ветвями ТЭБ, имеют сквозные отверстия соответственно 5 и 6, выполненные в направлении, перпендикулярном контакту коммутационных пластин и ветвей ТЭБ. Отверстия 5 всех коммутационных пластин 1 посредством трубок 7, выполненных из высокотеплопроводного материала, соединяются в единый канал, по которому в процессе функционирования ТЭБ протекает теплоноситель. Аналогичным образом объединяются в единый канал посредством трубок 8, также выполненных из высокотеплопроводного материала, отверстия 6 всех коммутационных пластин 2.

В конструкции, соответствующей рисунку 6.10, каждая коммутационная пластина 2 в своей центральной части имеет сквозное отверстие 7. Отверстия 7 всех коммутационных пластин 2 посредством гибких шлангов 8 также соединяются в единый канал, по которому в процессе функционирования ТЭБ прокачивается охлаждающая жидкость.

ТЭБ, изображенные на рисунках 6.11-6.12, являются модификациями описанных вариантов ТЭБ, реализующими регенеративную схему охлаждения. В них канал образуется таким образом, что сначала посредством трубок 7 последовательно соединяются все отверстия 5 в коммутационных пластинах 1, а затем также последовательно – отверстия 6, выполненные в коммутационных пластинах 2. Между последовательно соединенными трубками 7 отверстиями 5 в коммутационных пластинах 1 и отверстиями 6 в коммутационных пластинах 2 имеется область сопряжения канала с теплоносителем 8 с объектом охлаждения 9. В данной схеме жидкость после теплового контакта с объектом охлаждения осуществляет также съем теплоты с горячих спаев

ТЭБ и только потом охлаждается посредством естественного или принудительного теплообмена с окружающей средой.

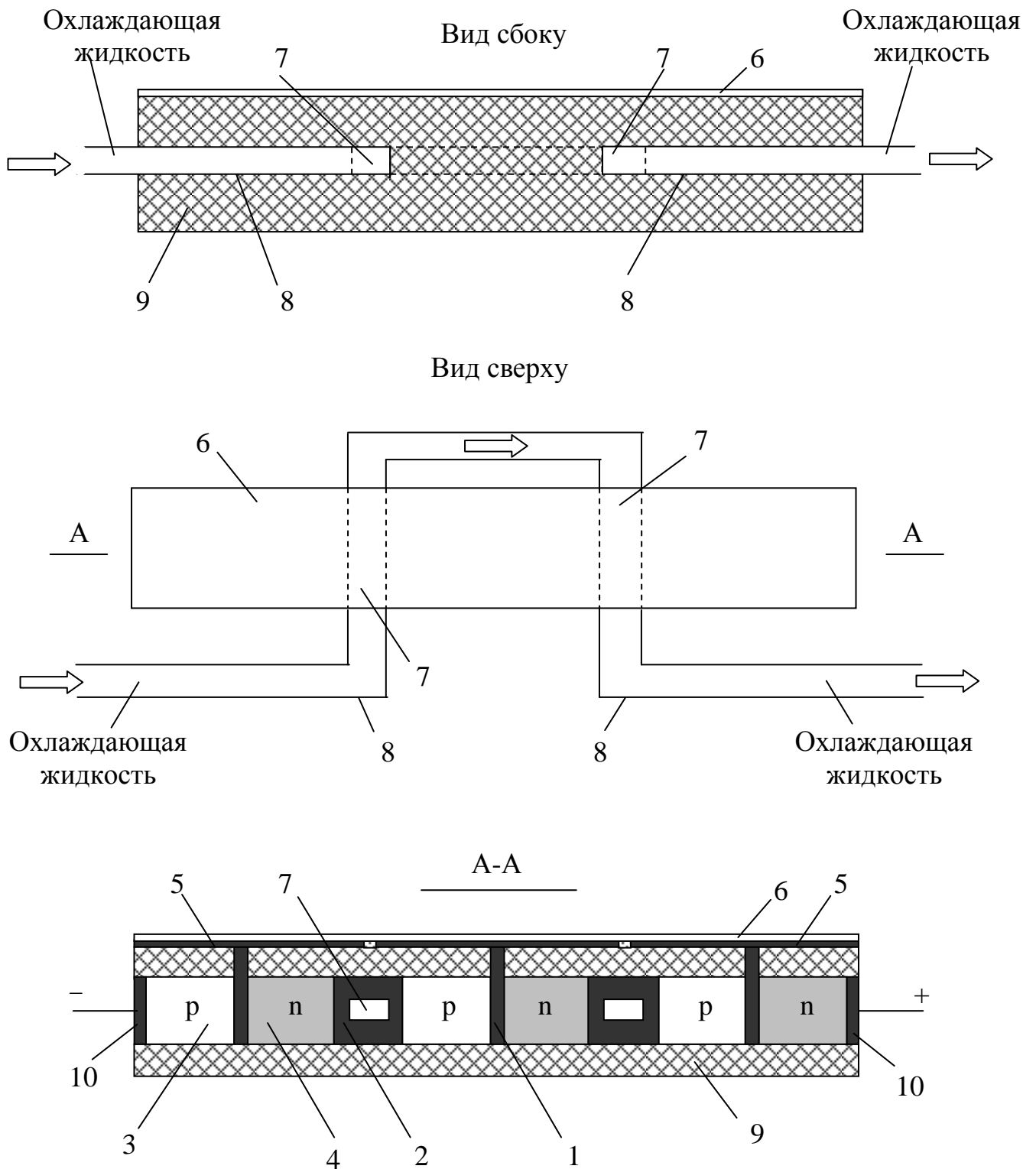


Рисунок 6.10 - Модифицированный вариант сильноточечной слоистой ТЭБ с вторичным жидкостным контуром

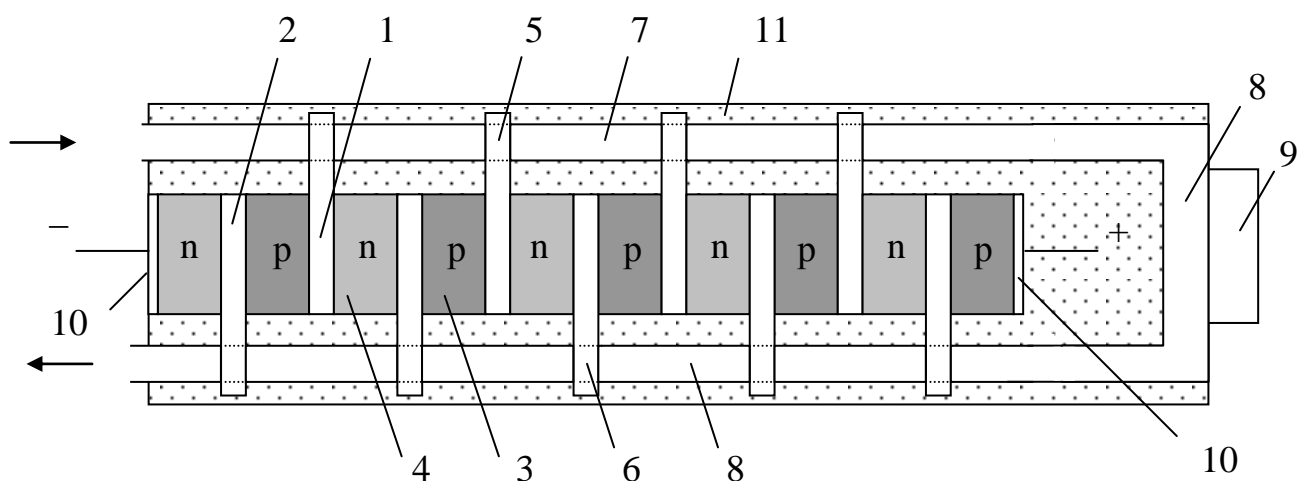


Рисунок 6.11 - Конструкция сильноточной слоистой ТЭБ с вторичным жидкостным контуром, реализующей регенеративную схему охлаждения

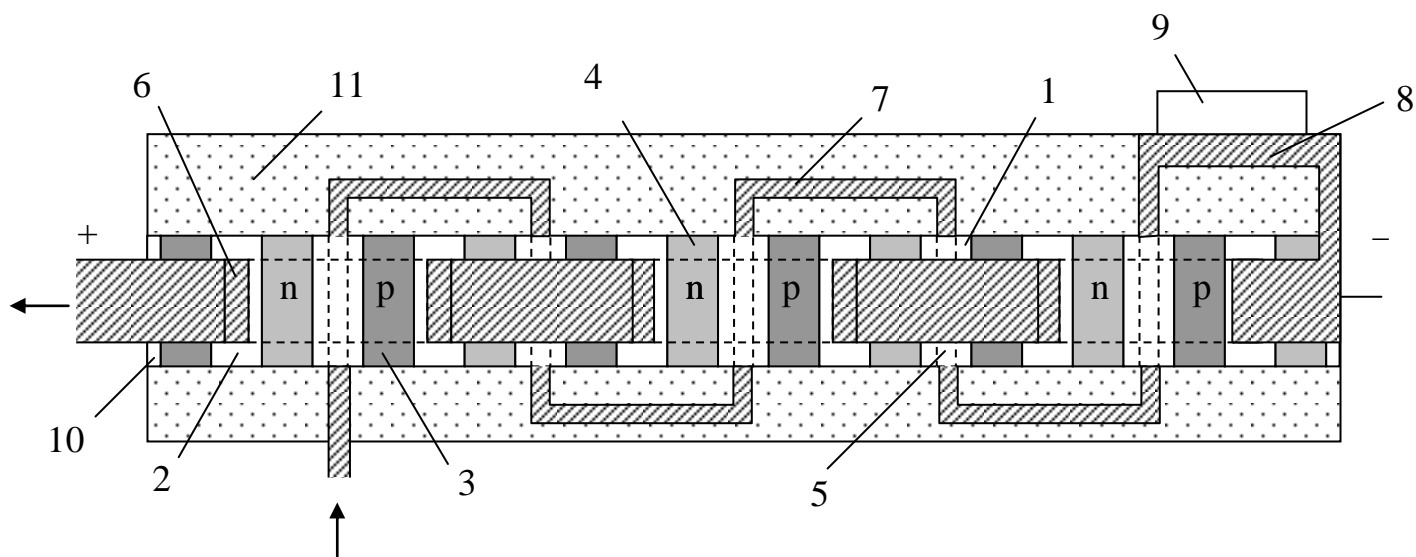


Рисунок 6.12 - Модифицированный вариант сильноточной слоистой ТЭБ с вторичным жидкостным контуром, реализующей регенеративную схему охлаждения

## **6.2 Устройства для охлаждения элементов и узлов радиоэлектронной аппаратуры**

### **6.2.1 Устройства для охлаждения элементов радиоэлектронной аппаратуры в режиме повторно-кратковременных тепловыделений**

В настоящее время в радиоэлектронном приборостроении существует целый класс РЭА, в процессе своей эксплуатации подвергающейся однократным или повторно-кратковременным «пиковым» тепловым нагрузкам [1, 51, 88, 104, 117, 161, 174, 178]. Такого рода тепловые нагрузки возникают при резком возрастании собственного тепловыделения элементов РЭА, при кратковременном воздействии на аппаратуру внешних тепловых потоков и ряда других факторов. При воздействии высоких тепловых нагрузок электронные технические средства, как правило, не успевают выйти на стационарный режим работы, поэтому для проектирования оптимальной по массе и габаритам теплоотводящей системы, а следовательно, и РЭА в целом целесообразным является применение теплоаккумулирующей способности конструкции или использование специальных средств для отвода тепла, позволяющих обеспечить снижение скорости ее нагрева и термостабилизацию мощных тепловыделяющих элементов.

Для эффективного отвода теплоты, выделяющейся при повторно-кратковременных режимах работы РЭА, эффективным является использование обратимых процессов, сопровождающихся эндотермическими реакциями при фазовых и химических превращениях рабочих агентов. Для данных целей применяются процессы испарения, плавления, сублимации, а также эндотермические химические реакции [2]. Однако почти все эти явления для рассматриваемого повторно-кратковременного режима работы элементов РЭА обладают рядом недостатков, не позволяющих использовать их в локальных охлаждающих устройствах периодически работающей аппаратуры. К таким недостаткам относятся: сложность системы, ее эксплуатации и ремонта; значительные массогабаритные параметры теплообменных приспособ-

соблений. Так, в частности, испарительная система охлаждения замкнутого типа требует наличия зон испарения и конденсации для циркуляции теплоносителя, что требует использования специальных технических средств, или, при необратимом испарении теплоносителя, значительных его запасов. Аналогично подобные сложности возникают при изготовлении теплообменных устройств, в основу работы которых положены обратимые процессы сублимации, а также эндотермические химические процессы. При этом, чем меньше значение рассеиваемой мощности, тем более значительную долю с точки зрения занимаемого объема и массы имеет охлаждающая система в аппаратуре.

Одним из эффективных методов теплоотвода от элементов РЭА с повторно-кратковременными тепловыми нагрузками является метод, основанный на использовании плавящихся рабочих веществ, имеющих относительно высокое значение теплоты фазовых превращений, состав и свойства которых позволяют их многократную эксплуатацию при воздействии «пиковых» тепловых нагрузок. Наиболее распространенным на сегодняшний день является такое конструктивное исполнение подобных охлаждающих систем, когда элементы РЭА размещаются на плоской поверхности герметичной оболочки емкости с рабочим агентом и имеют с ней хороший тепловой контакт [2, 66]. Обычно на поверхность емкости с плавящимися рабочими веществами устанавливаются дискретные электронные приборы, такие как мощные диоды, транзисторы, интегральные микросхемы, микросборки, отдельные составные части РЭА. Наружная и внутренняя поверхности герметичной емкости могут быть оребрены с целью интенсификации процесса теплообмена с рабочим наполнителем и окружающей средой. При эксплуатации РЭА большая часть выделяемой ею теплоты поглощается при фазовом переходе вещества счет его скрытой теплоты плавления. В момент паузы в работе аппаратуры рабочий агент остывает и затвердевает вследствие теплообмена с окружающей средой. Обязательным условием эффективной работы такой теплоотводящей си-

стемы является наличие достаточно большого промежутка времени в паузе ее работы.

Разработан ряд конструкций ТЭУ, позволяющих эффективно использовать плавящиеся рабочие вещества при незначительных паузах в работе циклически работающей РЭА [114-116, 118, 122, 123, 129].

Первый конструктивный вариант прибора изображен на рисунке 6.13., а его внешний вид - на рисунке 6.14. ТЭ В состав ТЭУ входит тонкостенная металлическая емкость 2, заполненная рабочим наполнителем 3, на которой размещаются тепловыделяющие элементы РЭА 1. К противоположной поверхности емкости присоединена ТЭБ 4, снабженная для отвода теплоты от горячих спаев воздушной радиаторной системой.

Остывание и затвердевание вещества при таком конструктивном исполнении в перерыве работы элемента РЭА помимо естественного теплообмена с окружающей средой еще и за счет работы ТЭБ. Снижение продолжительности процесса затвердевания рабочего агента достигается за счет повышения интенсивности теплоотвода при использовании ТЭБ.

Существенной особенностью данного ТЭУ является возможность эксплуатации его при переменных значениях продолжительности «паузы» работы РЭА. Здесь изменение скорости процесса затвердевания вещества будет осуществляться путем варьирования тока питания ТЭБ. При этом целесообразным будет предусмотреть использование такой батареи, которая была бы рассчитана не на предельную скорость отвода теплоты от вещества, а на какую-то усредненную, при которой потребление мощности за весь период эксплуатации РЭА будет как можно меньше. Более интенсивного отвода теплоты от рабочего агента в этом случае можно добиться, переведя ТЭБ в режим работы максимальной холодопроизводительности.

Так как охлаждение рабочего вещества ТЭБ осуществляется в основном снизу вверх, то влияние естественной конвекции в жидкой фазе на теплообмен незначительное, процесс теплопередачи в основном осуществляется за счет теплопроводности. Указанное обстоятельство накладывает дополни-

тельные требования на свойства рабочего агента, а именно требует повышения его удельной теплопроводности. В связи с этим лучшими рабочими веществами являются металлы и их сплавы, а также некоторые типы кристаллогидратов. Такие вещества, как парафин, стеарин, лауриновая, пальмитиновая и элаидиновая кислоты, имеющие лучшие эксплуатационные и технологические свойства по сравнению с другими наполнителями, перспективны при совместном использовании с конструкционными наполнителями, увеличивающими их теплопроводность, например внутренним ребрением емкости.

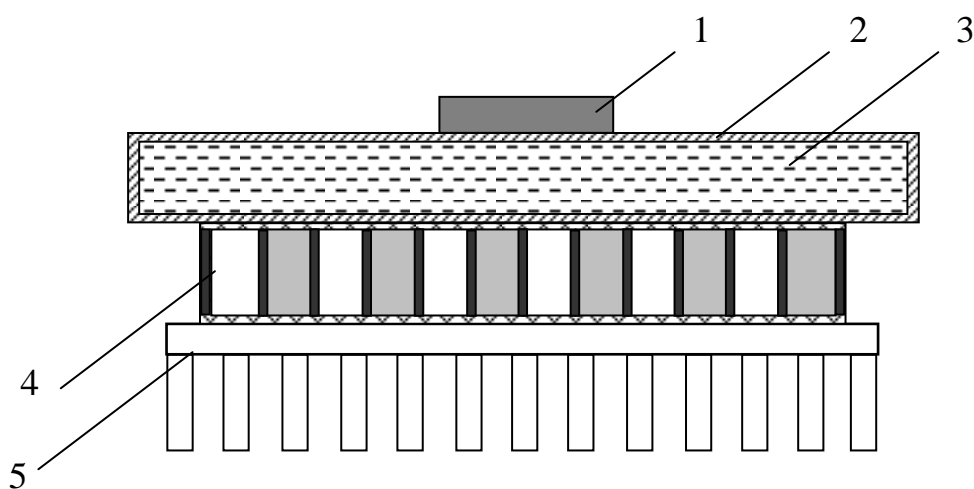


Рисунок 6.13 - Конструкция устройства для охлаждения элементов РЭА с повторно-кратковременными тепловыделениями

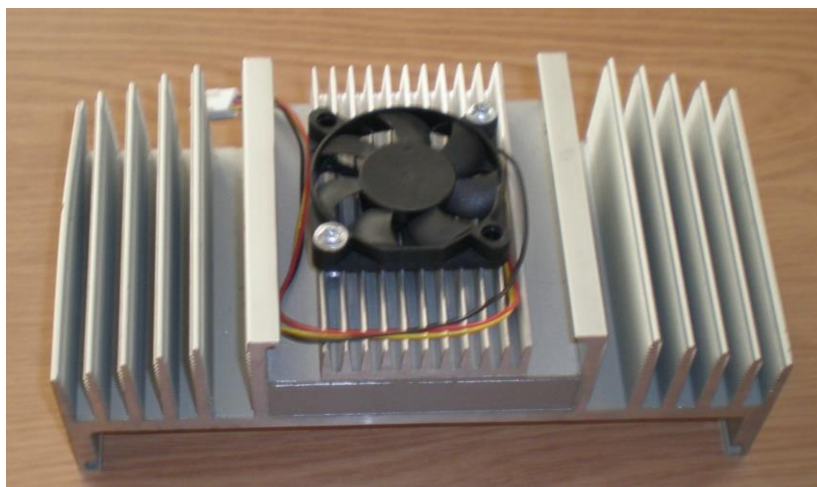


Рисунок 6.14 - Внешний вид устройства для охлаждения элементов РЭА с повторно-кратковременными тепловыделениями

Для повышения интенсивности отвода теплоты от элементов РЭА разработана конструкция прибора, рассмотренная на рисунке 6.15. Прибор содержит ТЭБ 1, состоящую из расположенных в середине низких ветвей 2 и расположенных по краям высоких ветвей 3, тепловыделяющие спаи которых расположены на одном уровне и примыкают к теплообменнику 4, а теплопоглощающие спаи расположены на двух уровнях. В середине ТЭБ 1 образовано углубление, в которое помещена тонкостенная металлическая емкость 5, заполненная рабочим веществом 6, температура плавления которого совпадает с температурой термостабилизации элемента РЭА 7. Элемент РЭА 7 помещен в камеру 8, размещенную на подставке 9 в тонкостенной металлической емкости 5, и находящуюся в непосредственном тепловом контакте с рабочим веществом 6. В объеме тонкостенной металлической емкости 5 с рабочим веществом 6 размещены два датчика температуры 10 и 11. Они электрически связаны с входом устройства управления 12, выход которого электрически связан с ТЭБ 1. Электрическая связь устройства управления 12 с ТЭБ 1 осуществляется таким образом, чтобы имелась возможность последовательного подключения или отключения ее низких 2 и высоких ветвей 3. Для снижения до минимума влияния колебаний температуры окружающей среды применяется теплоизоляция 13.

Устройство работает следующим образом.

Тепло, поступающее от элемента РЭА 7, находящегося в камере 8, размещенной на подставке 9, передается через поверхность соприкосновения рабочему веществу 6. Происходит прогрев рабочего вещества 6 до температуры плавления и процесс плавления, связанный с появлением жидкой фазы рабочего вещества 6 и ее перемещением в направлении от поверхности камеры 8 к стенкам тонкостенной металлической емкости 5. При плавлении рабочего вещества 6 температура тонкостенной металлической емкости 5 и соответственно температура элемента РЭА 7



будет поддерживаться при постоянном значении, равном температуре плавления рабочего вещества 6.

До тех пор, пока жидкая фаза расплавленного рабочего вещества 6 не переместится до места расположения первого датчика температуры 10, ТЭБ 1 не питается электрической энергией и не отводит тепло. При проплавлении рабочего вещества 6 до места расположения первого датчика температуры 10, с последнего передается электрический сигнал на устройство управления 12, которое начинает осуществлять питание электрической энергией части ТЭБ 1, состоящей из низких ветвей 2. Часть ТЭБ 1, состоящая из низких ветвей, начинает интенсивно отводить тепло от тонкостенной металлической емкости 5 с рабочим веществом 6. При дальнейшем увеличении мощности рассеяния тепла элементом РЭА 7 и соответственно при достижении жидкой фазы расплавленного рабочего вещества 6 второго датчика температуры 11, в соответствии с поступившим с него электрическим сигналом, устройство управления 12 подключает к питанию электрической энергией дополнительно к низким ветвям 2 высокие ветви 3 ТЭБ 1. При этом отвод тепла от тонкостенной металлической емкости 5 с рабочим веществом 6 будет осуществляться уже всей ТЭБ 1.

При уменьшении уровня тепловыделений элемента РЭА 7 за счет отвода тепла ТЭБ 1 жидкая фаза рабочего вещества 6 будет перемещаться в обратном направлении (от стенки тонкостенной металлической емкости 5 и камере 8). При этом устройство управления 12 в зависимости от электрических сигналов с датчиков температуры 10 и 11, до которых переместилась твердая фаза рабочего вещества 2, будет последовательно отключать соответственно высокие ветви 3 и низкие ветви 2 ТЭБ 1.

Последовательное подключение и отключение низких ветвей 2 и высоких ветвей 3 ТЭБ 1 к процессу теплоотвода от тонкостенной металлической емкости 5 с рабочим веществом 6 при изменении уровня тепловыделений элемента РЭА 7 будет способствовать повышению экономичности устройства.

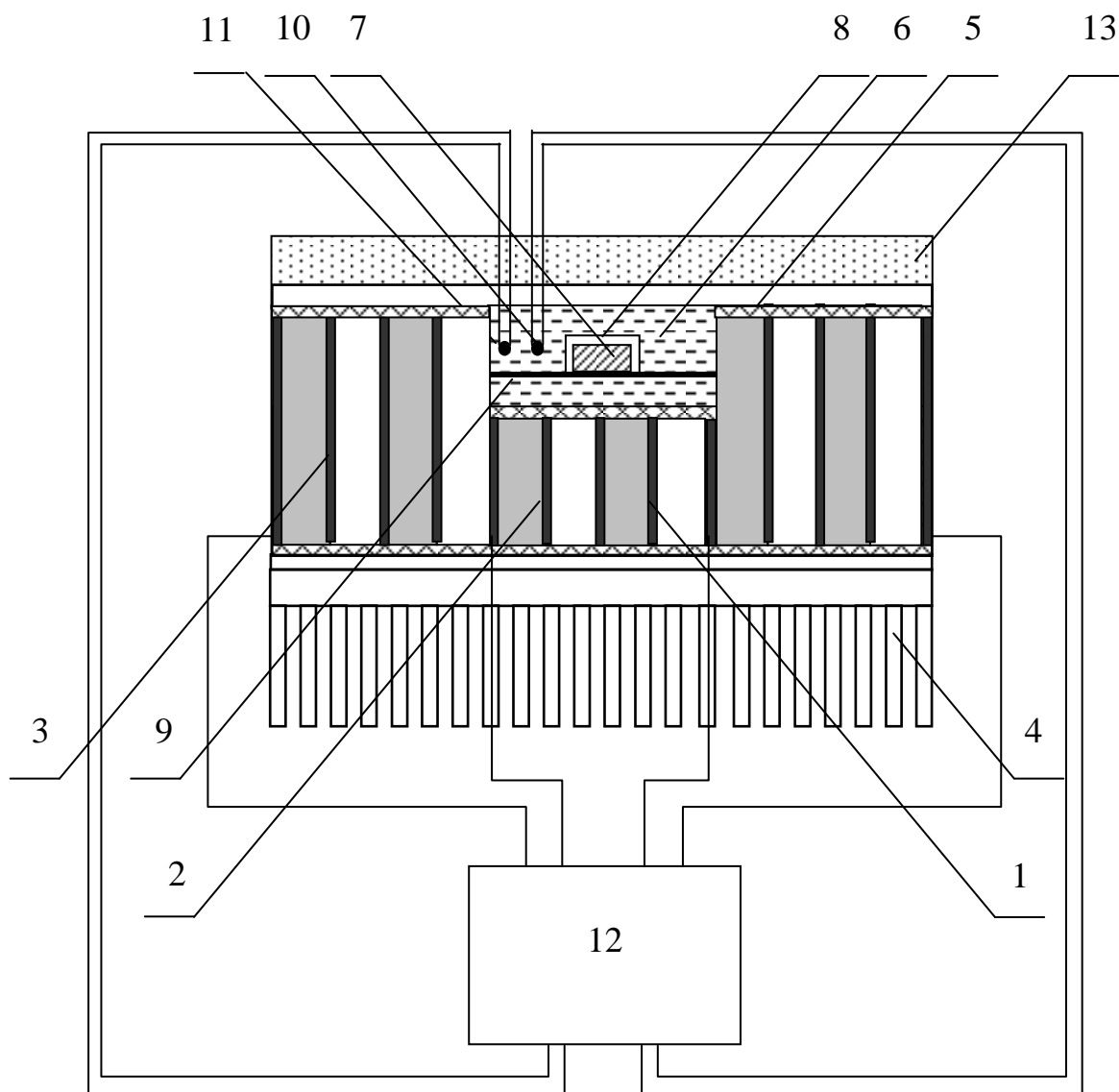


Рисунок 6.15 - Устройство для охлаждения элементов РЭА, выполненное на базе ТЭБ с разной высотой ветвей

На рисунке 6.16 показано устройство, реализующее схожий с описанным выше принципом отвод теплоты от элементов РЭА. В нем ТЭБ 4, приводимая в тепловой контакт с емкостью с рабочим веществом, состоит из нескольких последовательно соединенных секций ТЭ. В объеме емкости с рабочим веществом размещены датчики температуры 6, число которых равно числу секций ТЭ в ТЭБ 4. Датчики температуры электрически связаны с входом устройства управления 7, выход которого электрически связан с ТЭБ

4. Электрическая связь устройства управления 7 с ТЭБ 4 осуществляется таким образом, чтобы имелась возможность последовательного подключения или отключения каждой из секции ТЭ.

До тех пор, пока жидкая фаза расплавленного рабочего вещества 2 не переместится до места расположения первого датчика температуры 6, ТЭБ 4 не питается электрической энергией и не отводит тепло. При проплавлении рабочего вещества 2 до места расположения первого датчика температуры 6, с последнего передается электрический сигнал на устройство управления 7, которое начинает осуществлять питание электрической энергией крайней секции ТЭ в ТЭБ 4. Часть ТЭБ 4, состоящая из ТЭ крайней секции, начинает интенсивно отводить тепло от тонкостенной металлической емкости 1. При дальнейшем увеличении мощности рассеяния тепла элементом РЭА 3 и соответственно при достижении жидкой фазы расплавленного рабочего вещества 2 второго датчика температуры 6, в соответствии с поступившим с него электрическим сигналом устройство управления 7 начинает осуществлять питание электрической энергией крайней и расположенной рядом с ней секций ТЭ. При этом отвод тепла от тонкостенной металлической емкости 1 будет осуществляться уже двумя секциями ТЭБ 4. При еще большем увеличении мощности рассеяния тепла элементом РЭА 3 посредством датчиков температуры 6 и устройства управления 7 к процессу теплоотвода будут подключаться последовательно следующие секции ТЭ.

Процесс последовательного подключения секций ТЭ и, следовательно, увеличения уровня теплоотвода от тонкостенной металлической емкости 1 будет осуществляться до тех пор, пока граница раздела жидкой и твердой фазы рабочего вещества 2 не стабилизируется на определенном уровне.

При уменьшении уровня тепловыделений элемента РЭА 3 за счет отвода тепла ТЭБ 4 жидкая фаза рабочего вещества 2 будет перемещаться в обратном направлении (в направлении размещения элемента РЭА 3). При этом устройство управления 7 в зависимости от электрических сигналов с датчиков температуры 6, до которых переместилась твердая фаза рабочего

вещества 2, будет последовательно отключать секции ТЭ. Процесс отключения секций будет происходить до тех пор, пока граница раздела жидкой и твердой фазы рабочего вещества 2 не стабилизируется на определенном уровне.

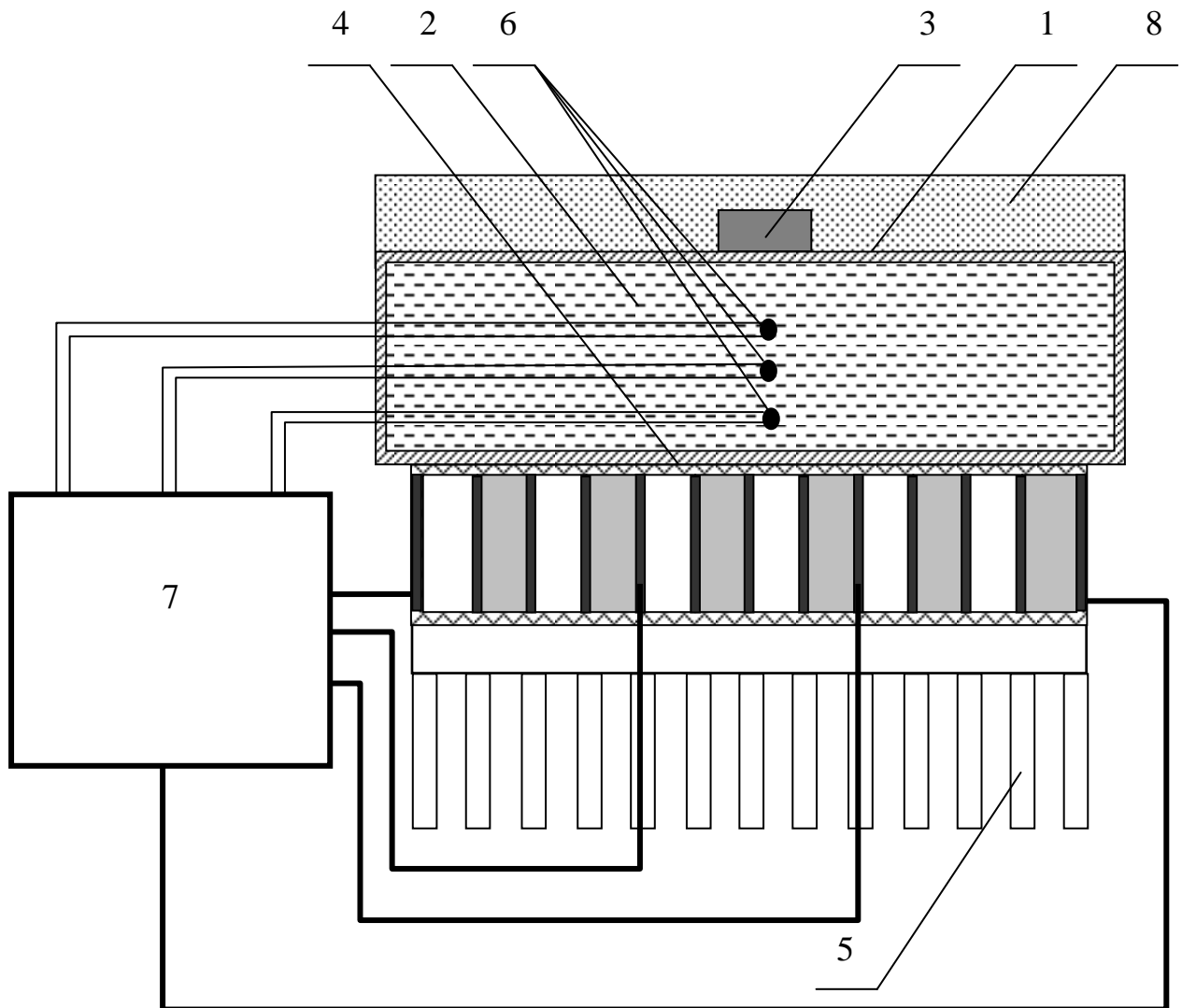


Рисунок 6.16 - Устройство для охлаждения элементов РЭА, выполненное на базе ТЭБ с ее разбиением на секции ТЭ

### **6.2.2. Устройства для охлаждения элементов радиоэлектронной аппаратуры в режиме повторно-кратковременных тепловыделений с несколькими рабочими веществами**

Одним из недостатков описанных устройств является следующее обстоятельство. Для постоянного движения границы раздела фаз от крайнего верхнего до крайнего нижнего слоя рабочего вещества, сопровождающегося поглощением теплоты при фазовом переходе, необходимо постоянное повышение температуры верхней поверхности емкости относительно температуры плавления до значения температуры, обусловленной величиной термического сопротивления расплавленного рабочего агента. Данное обстоятельство в некоторой мере снижает интенсивность охлаждения элементов РЭА. Целесообразным является предусмотреть необходимые конструкционные и технологические меры для уменьшения степени влияния термического сопротивления расплава рабочего вещества на теплообмен в емкости. Одним из возможных вариантов повышения эффективности охлаждающих систем является разбиение емкости на отсеки и наполнение последних рабочими веществами различного типа.

Подобного рода прибор изображен на рисунках 6.17-6.18. В состав прибора входит тонкостенная металлическая емкость 1, разделенная перегородками 2 (как правило, выполненными из меди или алюминия), расположенными параллельно плоскости установки элементов РЭА 3, на герметичные отсеки, заполненные плавящимися рабочими веществами 4 с различными температурами плавления. Температура плавления рабочих веществ 4 возрастает по направлению к плоскости размещения элементов РЭА 3. К плоскости емкости 1, противоположной размещению охлаждаемых радиоэлементов 3, приведена в тепловой контакт ТЭБ 5, отвод теплоты от горячих спаев которой осуществляется радиаторной системой 6. Так как в процессе работы ТЭУ рабочие вещества 4 изменяют свой объем при фазовом переходе, в конструкции для регулирования изменения объема предусмотрены специальные компенсирующие трубки 7.

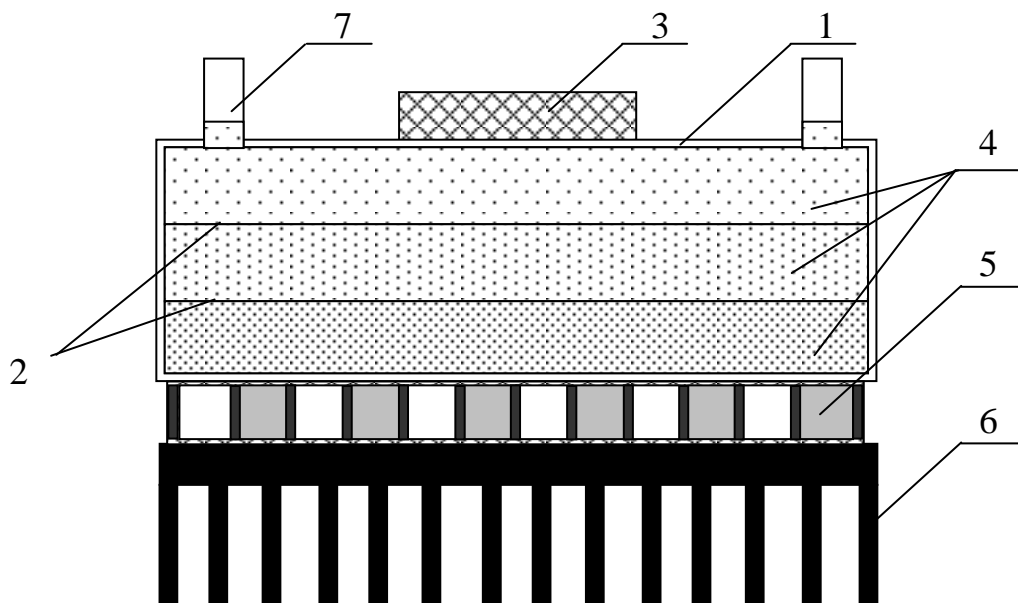


Рисунок 6.17. Конструкция устройства для охлаждения элементов РЭА, работающих в режиме повторно-кратковременных тепловыделений с несколькими рабочими веществами



Рисунок 6.18 - Конструкция устройства для охлаждения элементов РЭА, работающих в режиме повторно-кратковременных тепловыделений с несколькими рабочими веществами

Для интенсификации остывания и затвердевания рабочих веществ разработаны модификации описанного устройства, изображенные на 6.19-6.20.

Их отличие от прибора, рассмотренного на рисунках 6.17-6.18, состоит в том, что ТЭБ 5 имеют каскадное исполнение, причем каждый каскад термобатареи сопрягается с отдельно взятым отсеком, заполненным рабочим агентом 4. Контакт каскадов ТЭБ с отсеками в случае конструкции прибора, изображенной на рисунке 6.19 обеспечивается за счет выступающих концов перегородок каждого отсека, а в модификации, представленной на рисунке 6.20 предусмотрено использование отсеков разных объемов и их непосредственное сопряжение с каскадами ТЭБ.

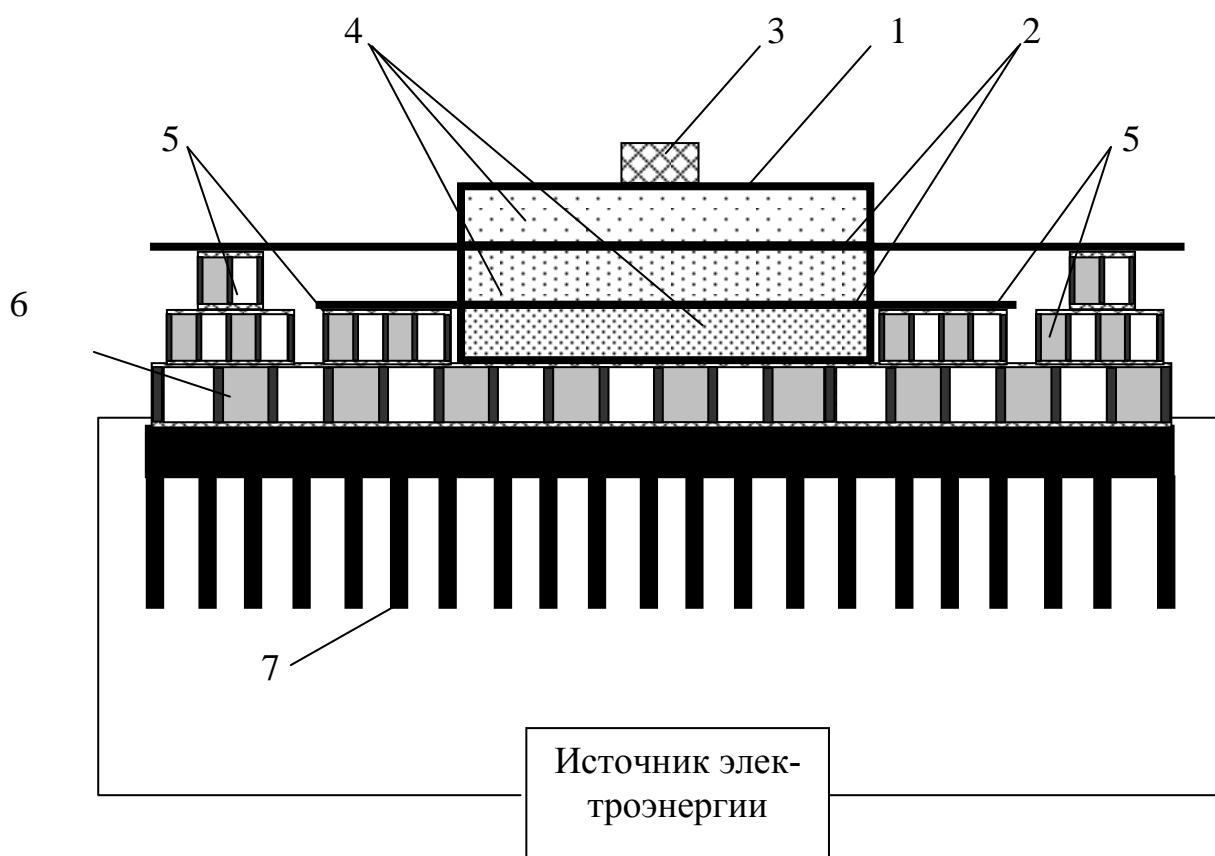


Рисунок 6.19 - Конструкция устройства для охлаждения элементов РЭА, работающих в режиме повторно-кратковременных тепловыделений с дополнительным теплосъемом за счет использования каскадной ТЭБ

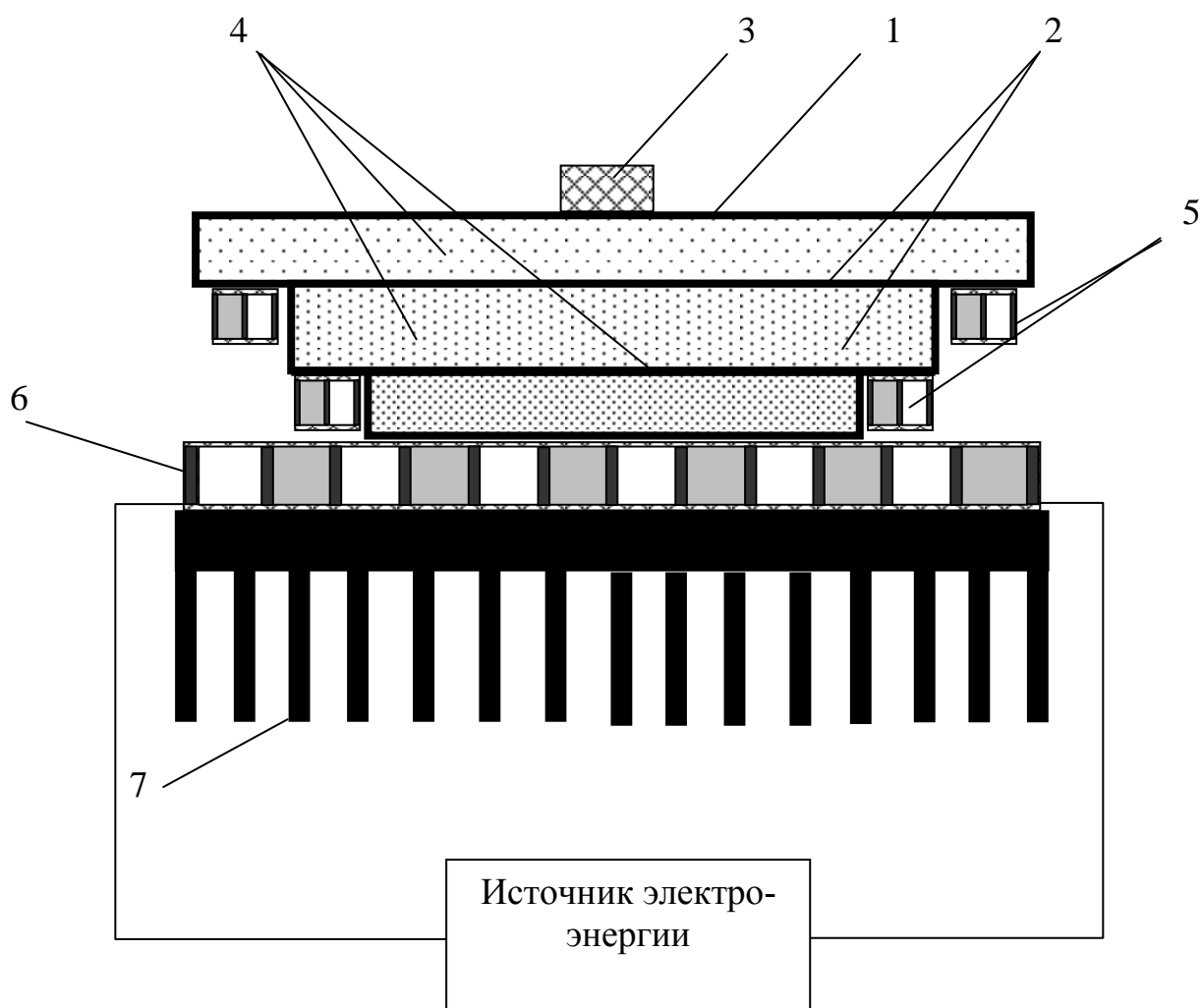


Рисунок 6.20 - Конструкция устройства для охлаждения элементов РЭА, работающих в режиме повторно-кратковременных тепловыделений с дополнительным теплосъемом за счет использования каскадной ТЭБ и переменным объемом отсеков

Для увеличения интенсивности остывания и затвердевания рабочих веществ также может быть предложен сьем теплоты с боковой поверхности устройства (рисунок 6.21). При этом элементы РЭА 3 будут располагаться на верхней и нижней поверхностях емкости 1, а ТЭБ 5 - устанавливаться по



боковой поверхности. Интенсификация отвода теплоты от рабочих агентов в данном случае обеспечивается за счет увеличения площади соприкосновения ТЭБ и прибора.

Количество отсеков, на которое делится емкость – нечетное, температура плавления веществ 4 возрастает от отсека, расположенного посередине в направлении к плоскости размещения элементов РЭА 3. При этом, температура плавления рабочего агента, находящегося в центральном отсеке, наименьшая.

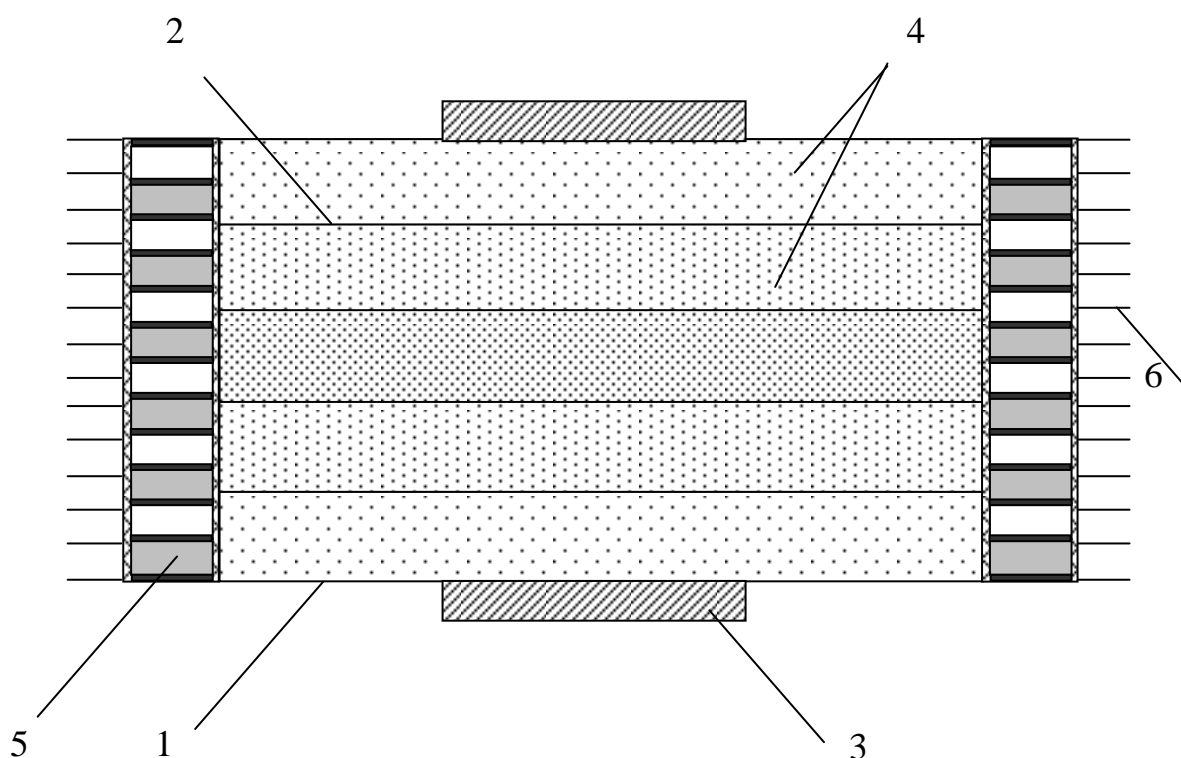


Рисунок 6.21 - Конструкция устройства для охлаждения элементов РЭА, работающих в режиме повторно-кратковременных тепловыделений с дополнительным боковым теплоотводом

### 6.2.3 Устройства для неравномерного охлаждения электронных плат

Также разработан ряд устройств, позволяющих реализовать неравномерный способ охлаждения, рассмотренный в параграфе 3.2, применительно к электронным платам или любым другим конструкциям, представляющим собой плоскую поверхность с установленными на ней элементами РЭА [127, 128].

Прототипом конструкции является прибор, описанный в [45]. Устройство содержит каскадную ТЭБ, состоящую из базовой ТЭБ, составляющую нижний каскад и дополнительных ТЭБ, образующих верхние каскады, теплопереходы и теплообменник. На холодные спаи дополнительных ТЭБ и теплопереходы помещается электронная плата с тепловыделяющими элементами. Размещение дополнительных ТЭБ осуществляется таким образом, чтобы их холодные спаи были расположены под наиболее тепловыделяющими элементами электронной платы.

Принцип работы устройства состоит в организации неравномерного отвода тепла от элементов электронной платы, при котором охлаждение тепловыделяющих элементов проводится с неодинаковой интенсивностью в зависимости от уровня выделяемой ими теплоты. Охлаждение организуется таким образом, чтобы съем тепла с наиболее тепловыделяющих элементов электронной платы осуществлялся наиболее холодными каскадами ТЭБ, съем тепла с менее тепловыделяющих элементов – менее холодными каскадами и т. д. При этом наиболее тепловыделяющие элементы электронной платы помещаются на каскадах ТЭБ с более высоким уровнем охлаждения, элементы и узлы с меньшими тепловыделениями располагаются на каскадах с более низким уровнем охлаждения.

Недостатком устройства является необходимость использования многокаскадной ТЭБ, изготовление которой технологически сложнее, чем однокаскадных ТЭБ, кроме того, при реализации неравномерного охлаждения указанным образом имеют место определенные трудности в согласовании

режимов работы отдельных каскадов ТЭБ и соответственно питания их электрической энергией.

Для устранения указанных недостатков разработано устройство для охлаждения электронных плат, структурная схема которого изображена на рисунке 3.18, а внешний вид на рисунке 6.22.

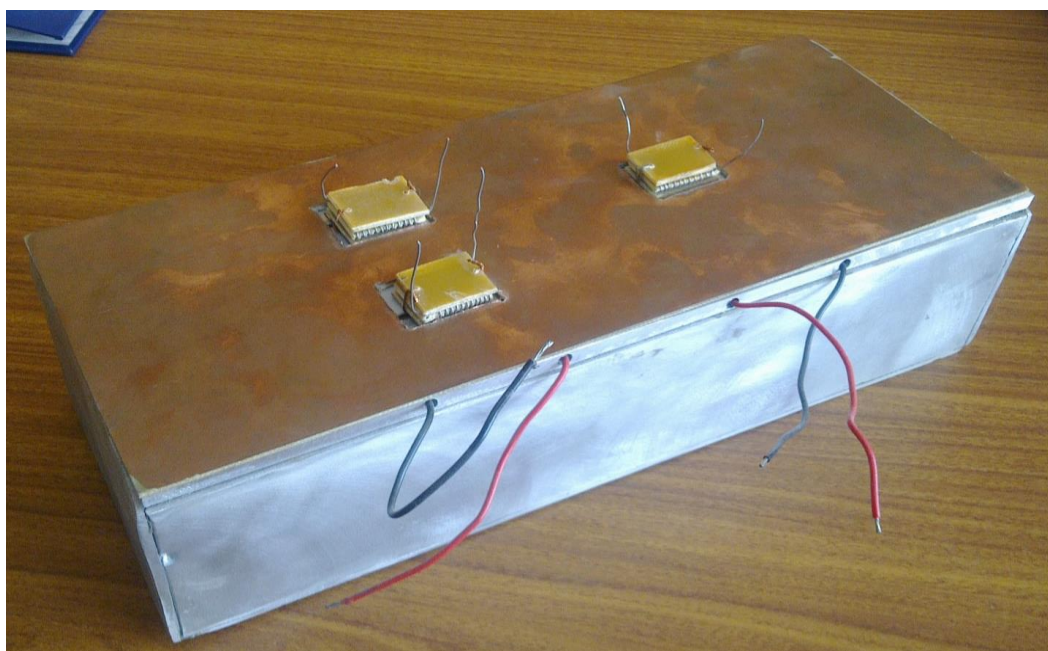


Рисунок 6.22 - Внешний вид устройства для охлаждения электронных плат с имитатором электронной платы

Устройство содержит металлическую емкость, заполненную рабочим веществом. Поверхность емкости, на которую устанавливается электронная плата с соответствующими тепловыделяющими элементами РЭА, выполнена профилированной с образованием углублений в местах размещения наиболее критичных к температурному режиму функционирования или требующих существенного снижения температуры элементов РЭА. В указанных углублениях установлены ТЭБ, запитываемые энергией от источника постоянного электрического тока.

Функционирует устройство следующим образом.

Тепло, поступающее от элементов РЭА, установленных на электронной плате, передается металлической емкости и через поверхность соприкосно-

вения рабочему веществу. Далее происходит прогрев рабочего вещества до температуры плавления и процесс плавления, сопровождающийся поглощением теплоты, тратящейся на изменение агрегатного состояния вещества. Теплоотвод за счет изменения агрегатного состояния рабочего вещества является базовым и может быть использован для обеспечения необходимого температурного режима функционирования элементов РЭА, не требующих существенного снижения температуры, либо не критичных к существенной величине перегрева по отношению к окружающей среде.

Для охлаждения элементов РЭА, особо критичных к перегревам или требующих существенного снижения температуры используются ТЭБ, которые организуют дополнительный теплосъем, причем величина холодопроизводительности каждой ТЭБ определяется в соответствии с уровнем тепловыделений конкретного элемента РЭА. При этом отвод теплоты от горячих спаев ТЭБ осуществляется также в содержащееся в емкости рабочее вещество, количество которого рассчитывается исходя из длительности функционирования элементов РЭА, мощности их тепловыделений, холодопроизводительности ТЭБ, а также условий эксплуатации.

Для устранения термического сопротивления между элементом РЭА и ТЭБ, обусловленного наличием между ними слоя стеклотекстолита, из которого изготавливается основание электронной платы, разработана модификация ТЭУ, изображенная на рисунке 6.23.

Отличие указанной конструкции от рассмотренной выше состоит в том, что ТЭБ сопрягаются с элементами РЭА, наиболее критичными к температурному режиму функционирования, непосредственно с их обратной плоскости крепления к электронной плате, стороны. При этом между элементом РЭА и ТЭБ отсутствует какое-либо тепловое сопротивление, теплота от ТЭБ передается к элементу электронной платы без потерь. Отвод теплоты с горячих спаев ТЭБ осуществляется в емкость с рабочим веществом посредством цельнометаллического (медного либо алюминиевого) теплопровода.

Для снижения теплотерь по теплопроводу также может быть использована его реализация в виде теплового термосифона, как это показано на рисунке 6.24.

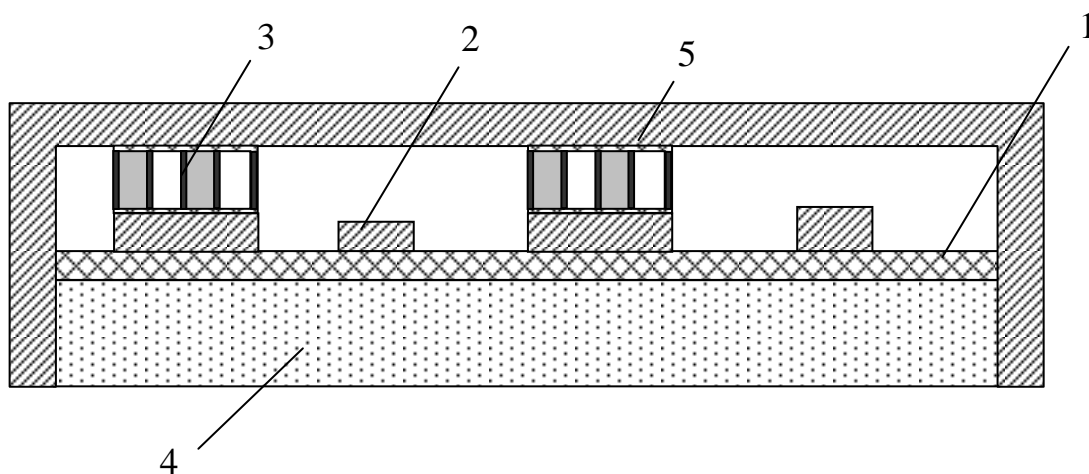


Рисунок 6.23 - Модификация устройства для охлаждения электронных плат с цельнометаллическим теплопроводом (1 - электронная плата, 2 - радиоэлементы, 3 - ТЭБ, 4 - емкость с плавящимся рабочим веществом, 5 - цельнометаллический теплопровод)

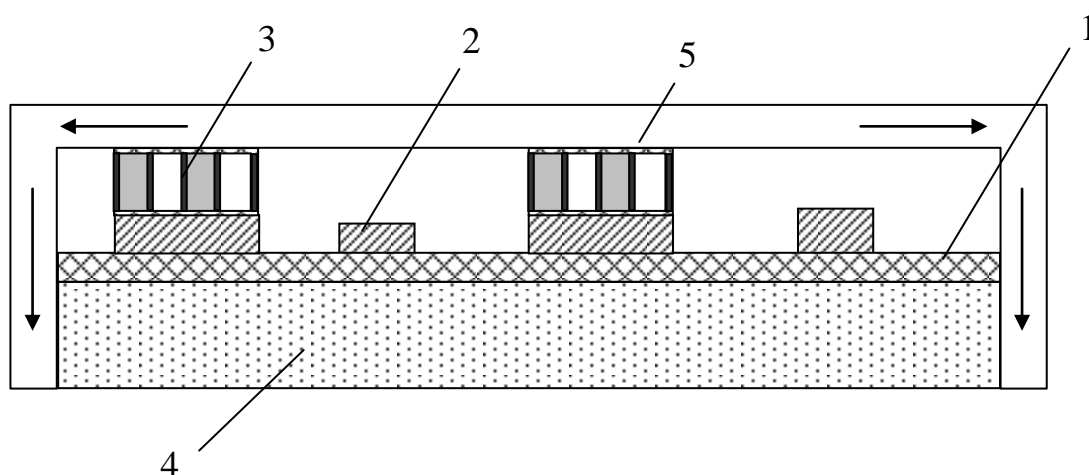


Рисунок 6.24 - Модификация устройства для охлаждения электронных плат с цельнометаллическим теплопроводом (1 - электронная плата, 2 - радиоэлементы, 3 - ТЭБ, 4 - емкость с плавящимся рабочим веществом, 5 - тепловой термосифон)

### **6.3. Термоэлектрические устройства медицинского назначения**

#### **6.3.1. Термоэлектрические устройства для теплового воздействия на стопу**

В соответствии с результатами исследований, описанных в главе 4, разработаны термоэлектрические приборы медицинского назначения.

Структурная схема устройства для теплового воздействия на стопу человека [95] изображена на рисунке 6.25, а внешний вид – на рисунке 6.26. Устройство содержит ТЭБ 1, первыми спаями находящуюся в тепловом контакте с нижней поверхностью стопы человека 2 через ванночку 3, выполненную из высокотеплопроводного материала, на дне которой располагается шарообразный гранулят 4, также изготовленные из материала с высокой теплопроводностью. Отвод теплоты от вторых спаев ТЭБ 1 осуществляется жидкостным теплообменным аппаратом 5. Управление режимами работы ТЭБ 1 производится блоком управления.

При проведении физиотерапевтических процедур пациент помещает ногу в ванночку 3. Далее включается программируемый блок управления, который по заданной программе производит запитывание электрической энергией ТЭБ 1. При этом происходит нагрев одних спаев ТЭБ 1, и охлаждение других. Соответственно происходит нагрев или охлаждение (в зависимости от полярности тока) гранулята 4, находящегося в непосредственном тепловом контакте со стопой. При возвратно-поступательного движении стопы по грануляту 4, имеет место как тепловое, так и механическое оздоровительное действие.

Необходимый температурный диапазон процедур составляет – 15-18 °С при охлаждении и 40-42 °С при нагреве стопы.

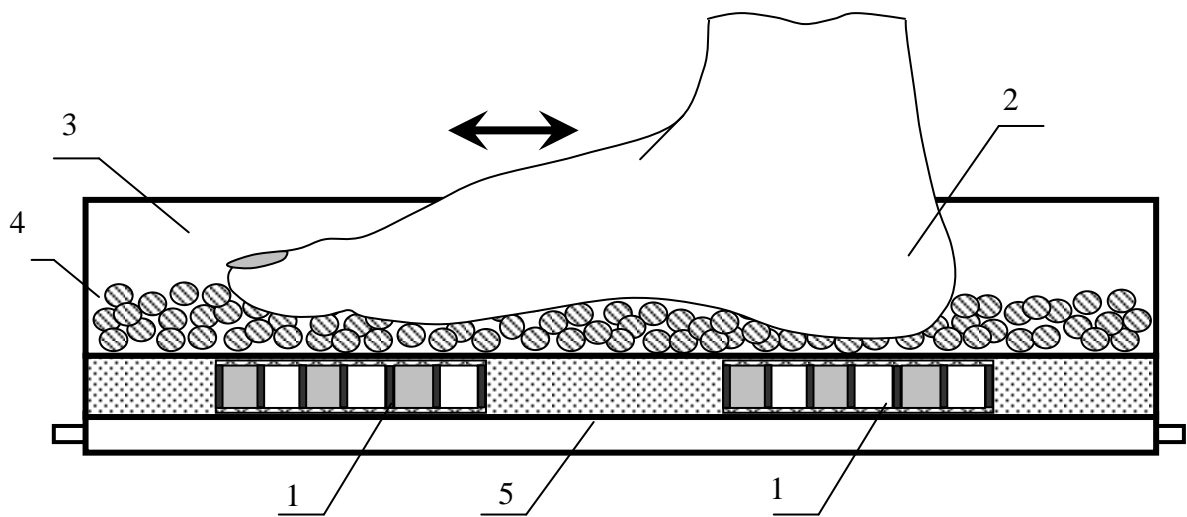


Рисунок 6.25 - Устройство для теплового воздействия на стопу человека



Рисунок 6.26 - Внешний вид устройства для теплового воздействия на стопу человека

Анализ конструкции данного устройства показал его высокую практическую, но вместе с тем обнаружился и некоторый недостаток, заключающийся в том, что на верхнюю поверхность стопы, так же богатую нервными рецепторами, не оказывается тепловое воздействие.

Для устранения этого недостатка разработано устройство [94], структурная схема которого приведена на рисунке 6.27.

Устройство содержит две термоэлектрические батареи (ТЭБ) 1 и 2, первыми спаями находящиеся в тепловом контакте со стопой человека 3 через прослойки, выполненные в виде герметичных тонкостенных эластичных емкостей из высокотеплопроводного материала 4 и 5, заполненных жидкостью с высоким коэффициентом теплопроводности 6. Отвод тепла со вторых спаев ТЭБ 1 и 2 производится жидкостными теплообменниками 7 и 8 соответственно. ТЭБ 1 первыми спаями сопряжена через тонкостенную эластичную емкость 4 с нижней поверхностью стопы человека. ТЭБ 2 посредством стойки, состоящей из секций 9, 10, 11, соединенных между собой шарнирами 12, прилегает через тонкостенную эластичную емкость 5 к верхней поверхности стопы человека. Секция 10 стойки выполнена телескопической. Управление режимами работы ТЭБ 1 и 2 осуществляется двухканальным программируемым источником электрической энергии. Независимое управление работой ТЭБ 1 осуществляется по одному каналу, ТЭБ 2 – по другому.

Принцип работы предлагаемого устройства следующий. Пациент помещает стопу 3 на тонкостенную эластичную емкость 4, заполненную теплопроводящей жидкостью 6, которая под воздействием веса ноги принимает форму подошвы. Для осуществления теплового воздействия на верхнюю поверхность стопы 3 пациента на нее кладется тонкостенная эластичная емкость 5. С другой стороны емкости 4 и 5 приводится в тепловой контакт с первыми спаями ТЭБ 1 и 2. Место расположения тонкостенной эластичной емкости 5 и сопряженной с ней ТЭБ 2 определяется при помощи секции 10 и шарниров 12 в соответствии с



геометрическими размерами стопы 3 пациента. При осуществлении процедур врач включает двухканальный программируемый источник электрической энергии, который по заданной программе осуществляет питание электрическим током ТЭБ 1 и 2. Причем, питание ТЭБ осуществляется таким образом, что одна батарея работает в режиме нагрева, а другая – охлаждения. Через некоторый промежуток времени происходит переключение режимов работы ТЭБ: та ТЭБ, что нагревала стопу человека, начинает ее охлаждать, а та, что охлаждала – нагревать.

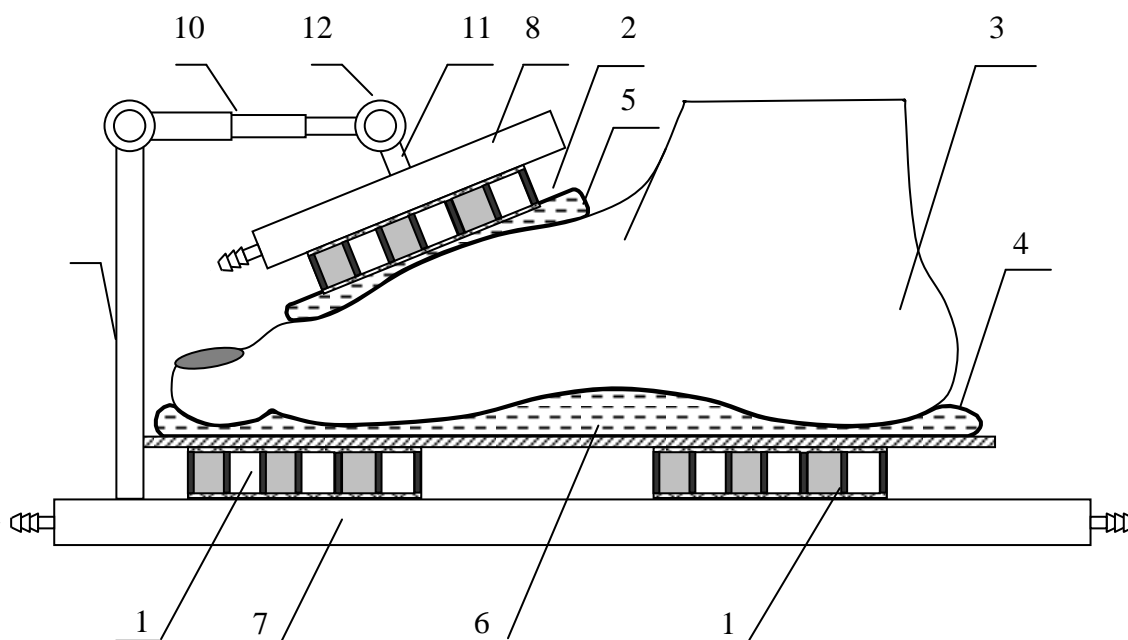


Рисунок 6.27 - Устройство для теплового воздействия на нижнюю и верхнюю поверхность стопы человека.

Данный прибор прост в изготовлении, обладает высокой надежностью и не требует высокой квалификации обслуживающего персонала. рассмотренное устройство может работать в различных температурных режимах, при этом малая инерционность ТЭМ позволяет осуществить быстрый переход с одного режима на другой, что позволяет чередовать воздействие теплом и холодом.

Контрастные процедуры, т.е. чередование воздействия теплом и холодом, улучшают микроциркуляторные процессы, причем большой эффект создает их сочетание с механическим массажем.

Для реализации такого типа процедур разработано ТЭУ, конструкция которого изображена на рисунке 6.28. Устройство представляет собой медную рамку 1, две противоположные боковые поверхности которой с внешней стороны приведены в тепловой контакт с первыми спиями ТЭБ 2, вторыми спиями сопряженными с теплообменниками 3 (воздушными или жидкостными). На внутренней поверхности рамки 1 закреплены специальные стержни 4, выполненные также из материала с высоким коэффициентом теплопроводности, имеющие рельефную поверхность.

Длина стержней 4 равняется расстоянию между двумя противоположными поверхностями рамки 1, а рельеф выполнен в виде выступов округлой формы с различными размерами и радиусом кривизны в направлении, противоположном плоскости крепления стержней. Стержни 4 равномерно расположены по всей площади рамки 1 с определенным шагом, значение которого несколько больше размера выступа максимального размера. Крепление стержней 4 выполнено таким образом, чтобы имелась возможность их свободного вращения вокруг своей оси. Питание электрической энергией ТЭБ 2 осуществляется программируемым источником постоянного электрического тока. Теплоизоляция 5 используется для устранения теплопритоков к устройству из окружающей среды.

Рассмотренные ТЭУ для теплового воздействия на поверхность стопы человека применяются в физиотерапевтической практике, как для лечения, так и для профилактики различных заболеваний опорно-двигательного аппарата, сердечно-сосудистого характера, послеоперационной реабилитации, снятия воспалительных процессов в области стопы.

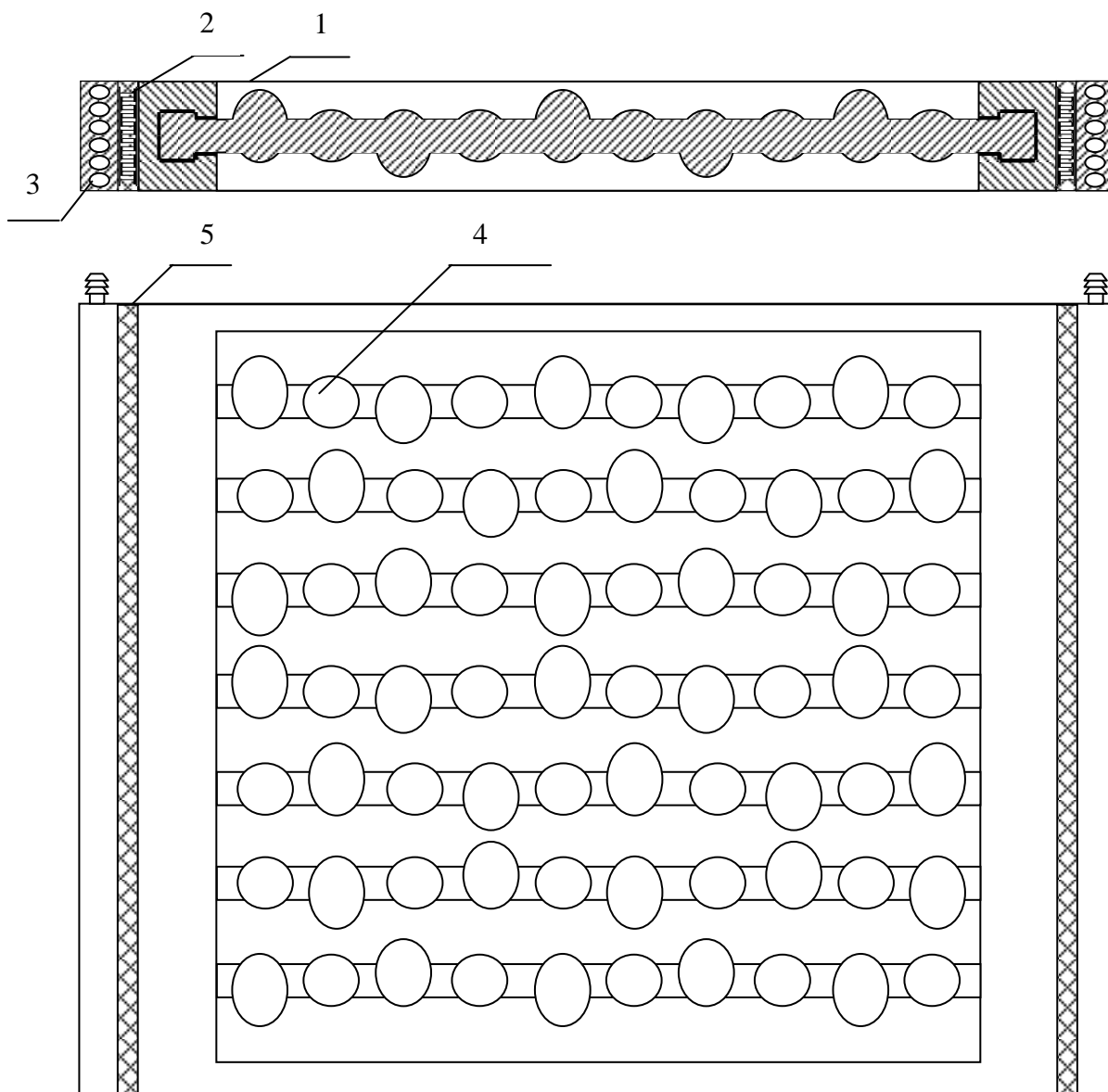


Рисунок 6.28 - Структурная схема устройства для теплового воздействия и механического массажа стопы человека

Методика проведения лечебных процедур с использованием разработанных приборов следующая. В начале сеанса пациент располагается в сидячем положении, нога от стопы до коленного сустава оголяется. Область стопы обрабатывается дезинфицирующим раствором (медицинским спиртом, либо перекисью водорода) и смазывается смягчающим кремом (например, детским). Нога пациента помещается в ТЭУ, при этом сам больной за исключением головы тщательным образом укутывается одеялом.

В процессе проведения тепловых процедур состояние больного тщательно отслеживается. Контролируется пульс, давление, температура, общее состояние пациента. В случае отклонений состояния больного от нормы физиотерапевтическая процедура прекращается.

Обязательным условием проведения каждой процедуры является предварительная стерилизация внутренней поверхности прибора и гранулята, находящегося в нем. Перед и после каждой процедуры гранулят обрабатывается в специальном дезинфицирующем растворе, затем сушится и только после этого загружается в прибор или же сдается на хранение. В целях повышения эффективности и удобства эксплуатации ТЭУ целесообразным является наличие нескольких комплектов гранулята различного размера и материала.

После окончания физиотерапевтической процедуры оценивается состояние пациента. После осмотра он укладывается на кушетку и укутывается в одеяло. После 15-20 минут отдыха больного, процедура считается завершённой.

Количество сеансов, их продолжительность, периодичность, а также характер определяется индивидуально для каждого пациента в соответствии с типом заболевания, а также его состоянием. Обычно процедура проводится ежедневно или через день в соответствии с рекомендациями врача. Лечебный курс обычно включает в себя от 10 до 20 процедур и занимает примерно один или полтора месяца.

Разработан ряд стандартных методик проведения тепловых процедур с помощью разработанных конструкций ТЭУ для лечения некоторых широко распространенных заболеваний опорно-двигательного аппарата, сердечно-сосудистой деятельности и др., особенности которых рассмотрены ниже.

1. Лечение гипотонической болезни (регулярного понижения артериального давления).

При лечении и профилактики данного заболевания особое значение имеет тепловой массаж, поэтому для стимулирования деятельности нервной системы и нормализации сердечнососудистой деятельности проводятся контрастные тепловые процедуры, состоящие в поочередном нагреве стопы при температуре 38-40 °С и ее охлаждение при температуре 18-20 °С. Общее время одного цикла проведения процедур – 3-4 минуты.

2. Лечение нарушения мозгового кровообращения.

Особенностью физиотерапевтических процедур в данном случае является постепенное повышение температуры стопы, так как в этом случае происходит расширение не только мелких периферических, но и глубоко лежащих сосудов. Процедура вызывает значительное перераспределение крови в организме, оказывая благоприятное влияние на сердечную деятельность и мозговое кровообращение. Температурный уровень воздействия – 37 °С, затем температуру доводят до 45 °С. Общее время проведения оздоровительной процедуры составляет 10 минут.

3. Лечение атеросклероза.

В данном случае применяется методика теплового воздействия, аналогичная случаю лечения нарушения мозгового кровообращения. Отличие состоит только в продолжительности процедуры, которая в данном случае составляет порядка 15 минут.

Методика нагрева стопы с постепенным поднятием температуры также может быть использована для лечения ряда других сердечнососудистых заболеваний, в частности гипертонии, а также бессонницы.

4. Лечение заболеваний опорно-двигательного аппарата (ревматоидного артрита, воспаления суставов пальцев стопы, посттравматическая реабилитация).

В основе лежит тепловое воздействие в диапазоне температур от 36 до 43 °С [72]. При лечении ревматоидного артрита проведение физиотерапевтических процедур считается наиболее эффективным на начальных стадиях проявления заболевания, а также в подострой стадии. В хронической стадии заболевания тепловое воздействие эффективно с применением массажа, а также при комплексном лечении с использованием соответствующих медикаментозных препаратов.

При лечении ревматического полиартрита большое внимание должно уделяться режимам проведения процедур. Именно для этого случая больше, чем при каких-либо других видах болезней, лечение которых производится с помощью тепловых процедур, необходимо придерживаться индивидуального подхода, особенно это важно, когда поражение суставов наблюдается с левой стороны. Таким пациентам рекомендуется проводить лечебные физиотерапевтические процедуры только спустя 6-8 месяцев после окончания острых и подострых проявлений заболевания.

При механических повреждениях области стопы в лечении и реабилитации пациента значительную роль играет контрастное тепловое воздействие, а также совмещение чередующего нагрева и охлаждения поврежденной области с ее механическим массажем. Рекомендуемый рабочий диапазон температур: для охлаждения - 10-12 °С, нагрева - 40-42 °С. При рубцовых сращениях, миофиброзе, миосклерозе тканей, тугоподвижности суставов до механического массажа применяется тепловое воздействие для подготовки областей стопы к массажу. В случае парезов, параличе, мышечной атрофии, невритах и невралгиях стопа предварительно согревается, для уменьшения болезненности ощущений при углубленном массаже. При заболеваниях сосудов, снятия отеков в первую очередь, наоборот, выполняется механи-

ческий массаж, а уже затем осуществляется нагревание ткани (в диапазоне 38-42 °С).

Другими показаниями к применению разработанных ТЭУ являются локальные воспаления ткани, переломы костей стопы, различные поражения кожных покровов, плохо заживающие раны, послеоперационные швы и т.п.

При атрофиях мышц стопы, невритах нервных стволов, периферическом параличе физиотерапевтические процедуры на пораженную область начинаются с теплового воздействия при индифферентных температур (32-37 °С), затем выполняется стимулирующий сегментарно-рефлекторный массаж, который усиливает крово- и лимфообращения в объекте воздействия, при этом улучшает трофику и способствует быстрому заживлению поврежденного участка. В результате чередующегося умеренного нагрева и охлаждения в сочетании с механическим воздействием повышается эластичность и подвижность связочно-капсульного аппарата, активизируется работа сустава, что приводит к уменьшению отечности и нормализации состояния ткани.

Разработанные модификации ТЭУ менее эффективны в случае их использования при лечении заболеваний опорно-двигательного аппарата в острой и подострой стадиях (особенно в случае острой стадии ревматического полиартрита), а также некоторые заболевания сердечнососудистой системы. Противопоказаний к использованию приборов нет.

ТЭУ для теплового воздействия на стопу было апробировано в лечебных учреждениях г. Махачкалы и г. Грозный. Было проведено 37 процедур 6 пациентам с различными заболеваниями. Из них один пациент с атеросклерозом, два пациента с ревматическим артритом не в стадии обострения и три пациента с нарушениями мозгового кровообращения. В ходе апробации прибора установлены следующие положительные эффекты:

- за счет комбинированного воздействия на стопу, совмещающего контрастные тепловые процедуры и механический массаж, наблюдалось повышение лечебного эффекта;

- с помощью ТЭ имелась возможность регулирования уровня воздействия в диапазоне от 10°C до 5°C при точности  $\pm 1^\circ\text{C}$ ;

В ходе клинической апробации устройства осложнений не наблюдалось.

### **6.3.2. Термоэлектрические устройства для теплового воздействия на руку**

Разработаны конструкции ТЭУ для теплового воздействия на отдельные области руки [65]. На рисунке 6.29 изображена структурная схема первого конструктивного варианта такого устройства, а его внешний вид показан на рисунке 6.30.

Прибор содержит эластичное основание 1 с отверстиями, расположенными в один ряд по длине основания, для установки ТЭБ 2. Основание 1 выполнено в виде двух полотен 3 из синтетической эластичной материи, сшитых между собой капроновой нитью по периметру установленных в них ТЭМ 2 на расстоянии от их краев в 2 мм таким образом, что часть материи находит на поверхности ТЭБ 3, закрывая 2 мм последних по периметру. Внутренние спаи 4 ТЭБ 2, обращенные к руке человека, приведены в тепловой контакт с гибкой тепловыравнивающей пластиной 5 через теплопроводную пасту 6. Противоположные внешние спаи 7 ТЭБ 2 также через теплопроводную пасту 7 контактируют с гибкими металлическими пластинами 8, выполняющими роль теплосъема. Металлические пластины 8 пришиваются к основанию 1 по своим углам капроновой нитью. ТЭБ 2 подключаются электрическими проводами к программируемому источнику питания, реализующего различные режимы работы модулей (охлаждение, нагрев, их чередование). Основание 1 по краям снабжено застежкой 9.

Прибор функционирует следующим образом.

Перед началом процедуры устройство закрепляется на участке руки человека, подлежащем тепловому воздействию, с обеспечением плотного



контакта за счет эластичных свойств основания 1 и наличия застежки-липучки 9. Процедура начинается с включения программируемого блока питания, по заданной программе осуществляющего питание электрическим током необходимой величины и полярности ТЭБ 2. Доза и длительность теплового воздействия определяется лечащим врачом, им же производится текущий контроль за состоянием пациента. Металлические пластины 8 предназначены для съема излишка тепла с внешних спаев 7 ТЭБ 2 при охлаждении участка руки, а тепловыравнивающая пластина 5 обеспечивает равномерное распределение температуры.

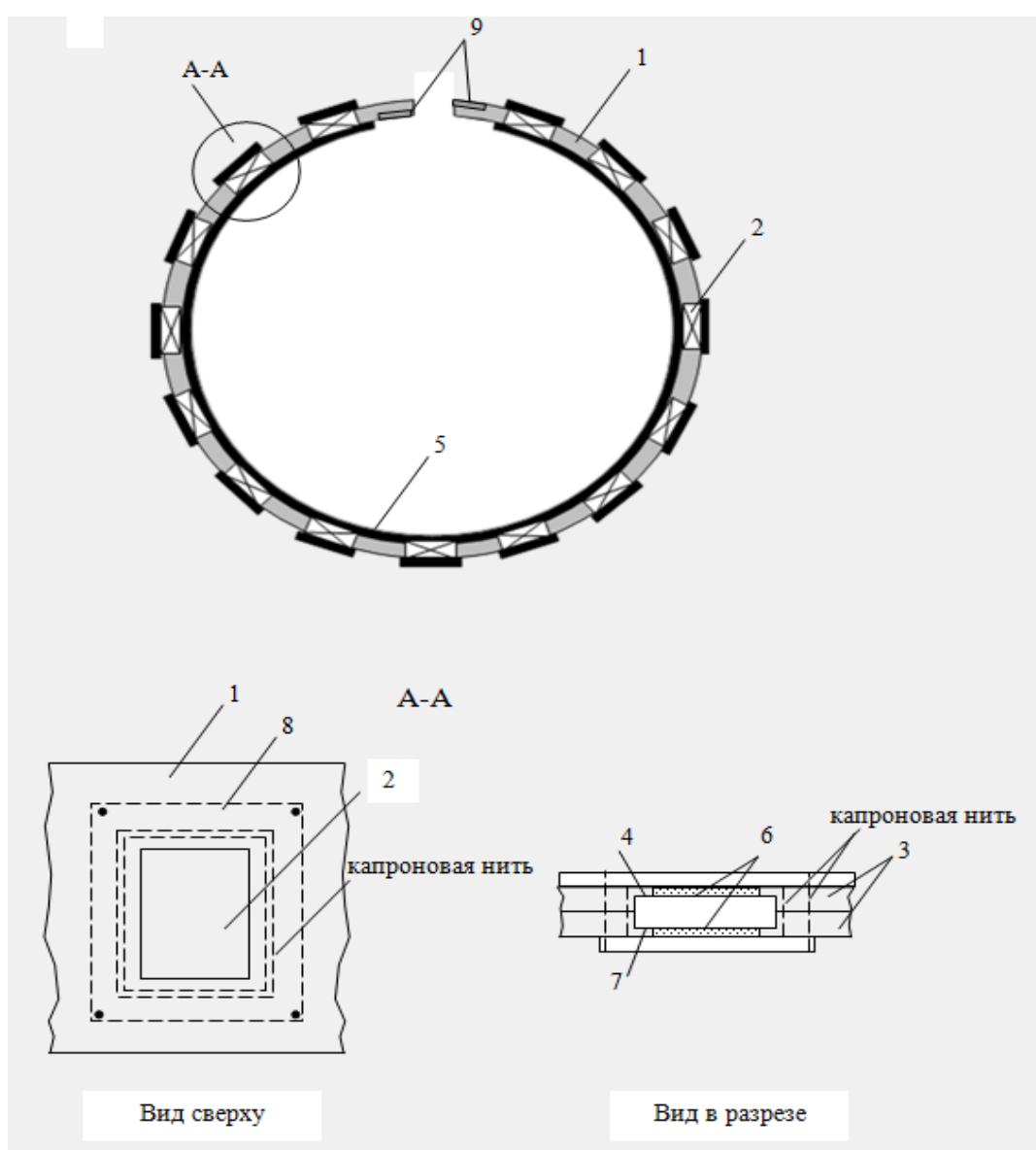


Рисунок 6.29 - Структурная схема термоэлектрического прибора для теплового воздействия на отдельные зоны руки человека

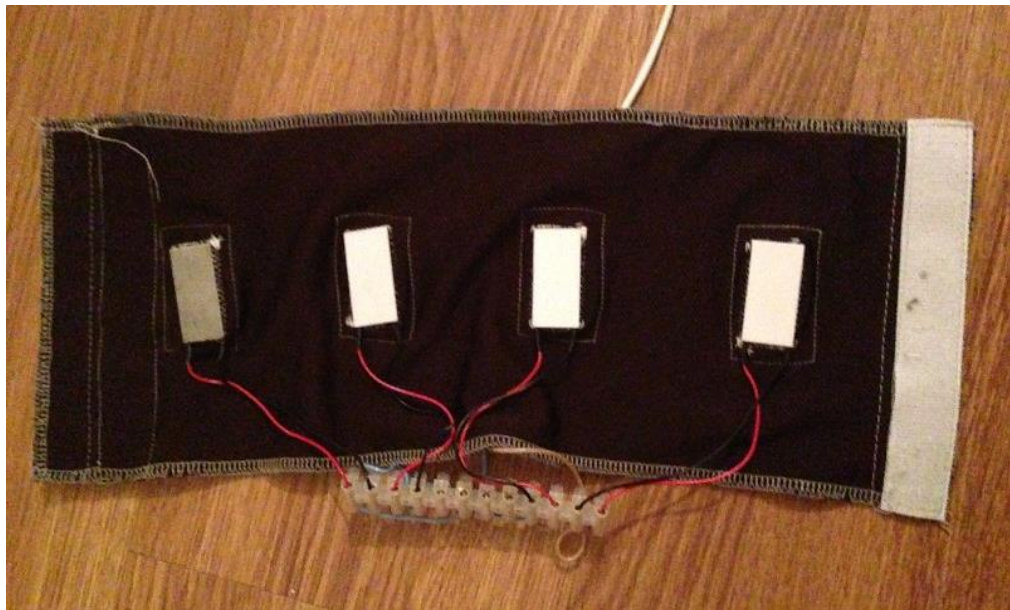
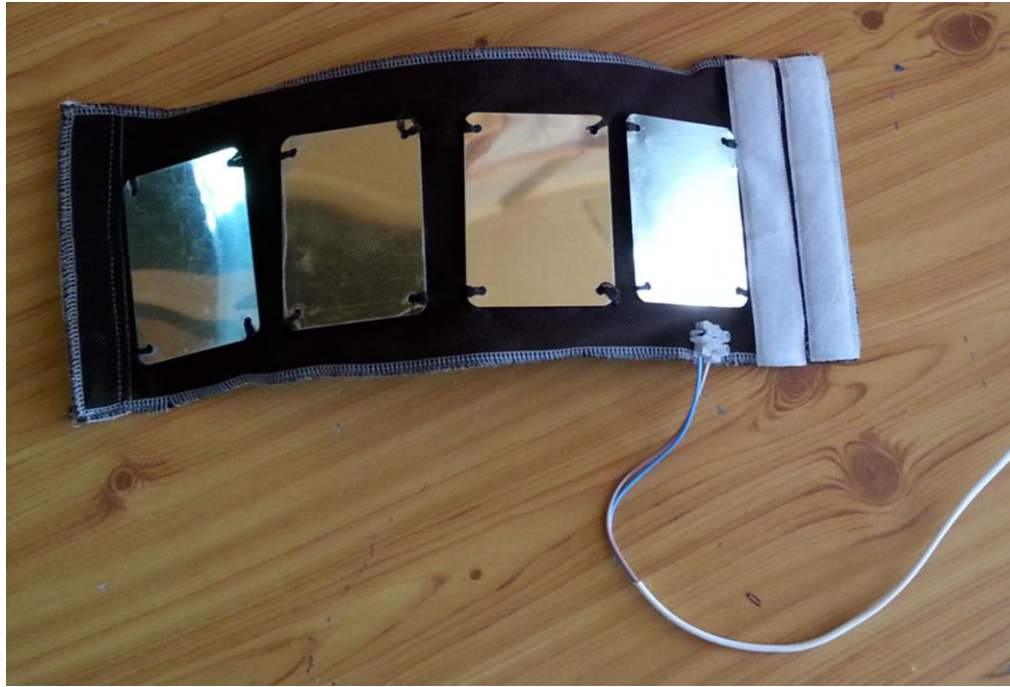


Рисунок 6.30 - Внешний вид термоэлектрического прибора для теплового воздействия на отдельные зоны руки человека

Представляет интерес регулирование плотности контакта прибора с зоной воздействия в целях повышения эффективности лечебных процедур. Для этих целей разработана модификация ТЭС, представленная на рисунке 6.31. Отличительной особенностью этого варианта прибора является наличие манжеты 10, приведенной в плотный механический контакт с основанием. Манжета соединена с нагнетателем 11 трубкой 12. Для обеспечения плотного контакта посредством нагнетателя 11 через трубку 12 закачивается воздух в манжету 10. За счет создаваемого внутри манжеты 10 давления контакт зоны руки и тепловыравнивающей пластины 5 улучшается, что повышает эффективность передачи теплоты от внутренних спаев 4 ТЭБ 2 к зоне воздействия.

С целью совмещения возможности теплового действия и механического массажа спроектирована ТЭС, конструкция которого изображена на рисунке 6.32. Отличие данного прибора от рассмотренного выше состоит в наличии регулируемого блока 13, управляющего работой нагнетателя 11 таким образом, чтобы имелась возможность помимо теплового осуществлять также и управляемое компрессионное воздействие на зону руки человека, улучшающее микроциркуляцию крови и способствующее тренировке сосудов.

Для описанных ТЭУ разработана методика проведения физиотерапевтических тепловых процедур. она проводится в следующей последовательности.

Перед началом сеанса пациента усаживается на кушетку или специальное медицинское кресло, оголяя область руки, которая будет подвергаться тепловым процедурам. Затем данная область обрабатывается дезинфицирующим раствором (например, 40% спиртом или перекисью водорода) и смазывает смягчающим кремом. На руку надевается устройство с обеспечением плотного механического контакта прибора и поверхности тела пациента.

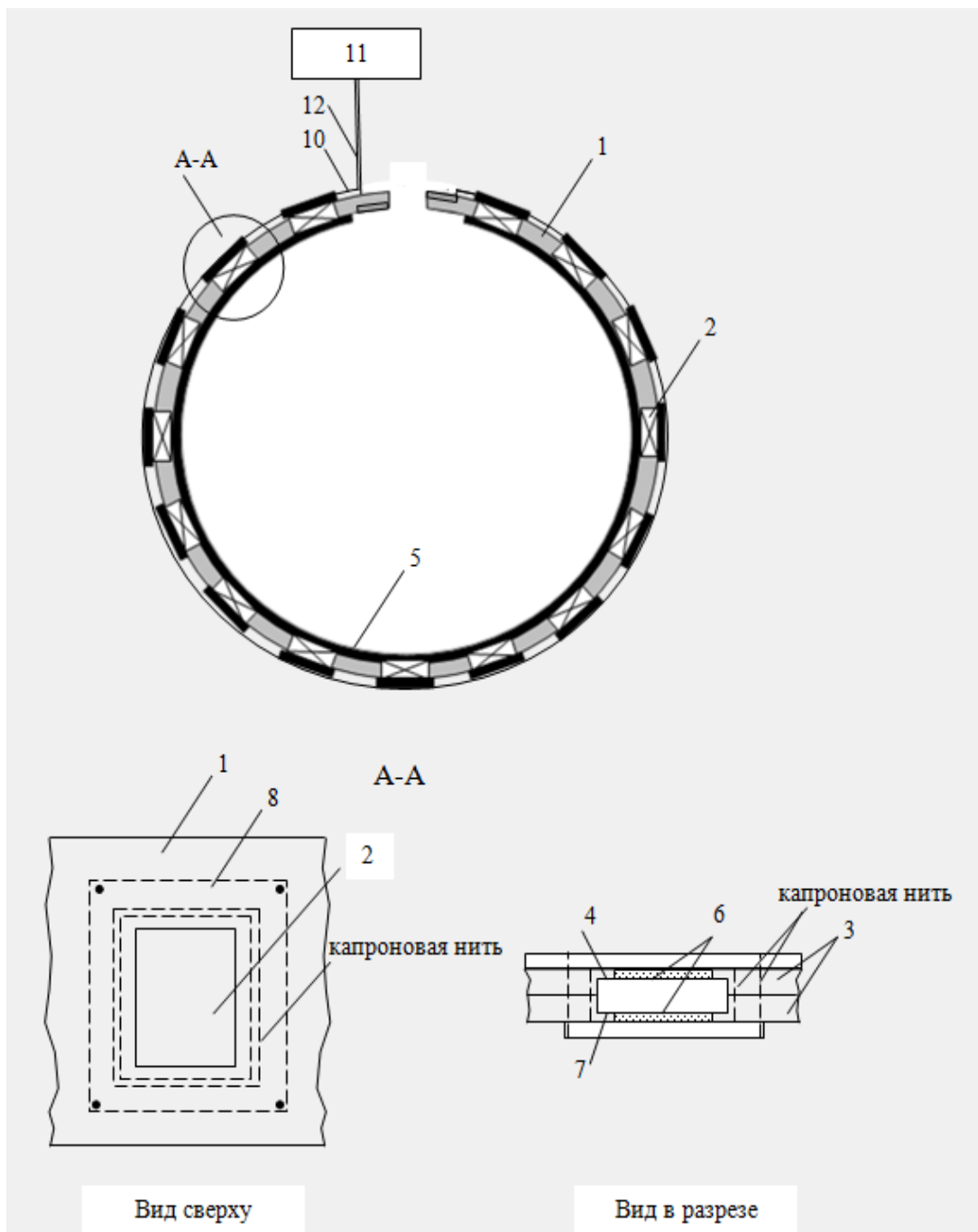


Рисунок 6.31 - Структурная схема термоэлектрического прибора для теплового воздействия на отдельные зоны руки человека с возможностью регулирования плотности контакта с биологическим объектом

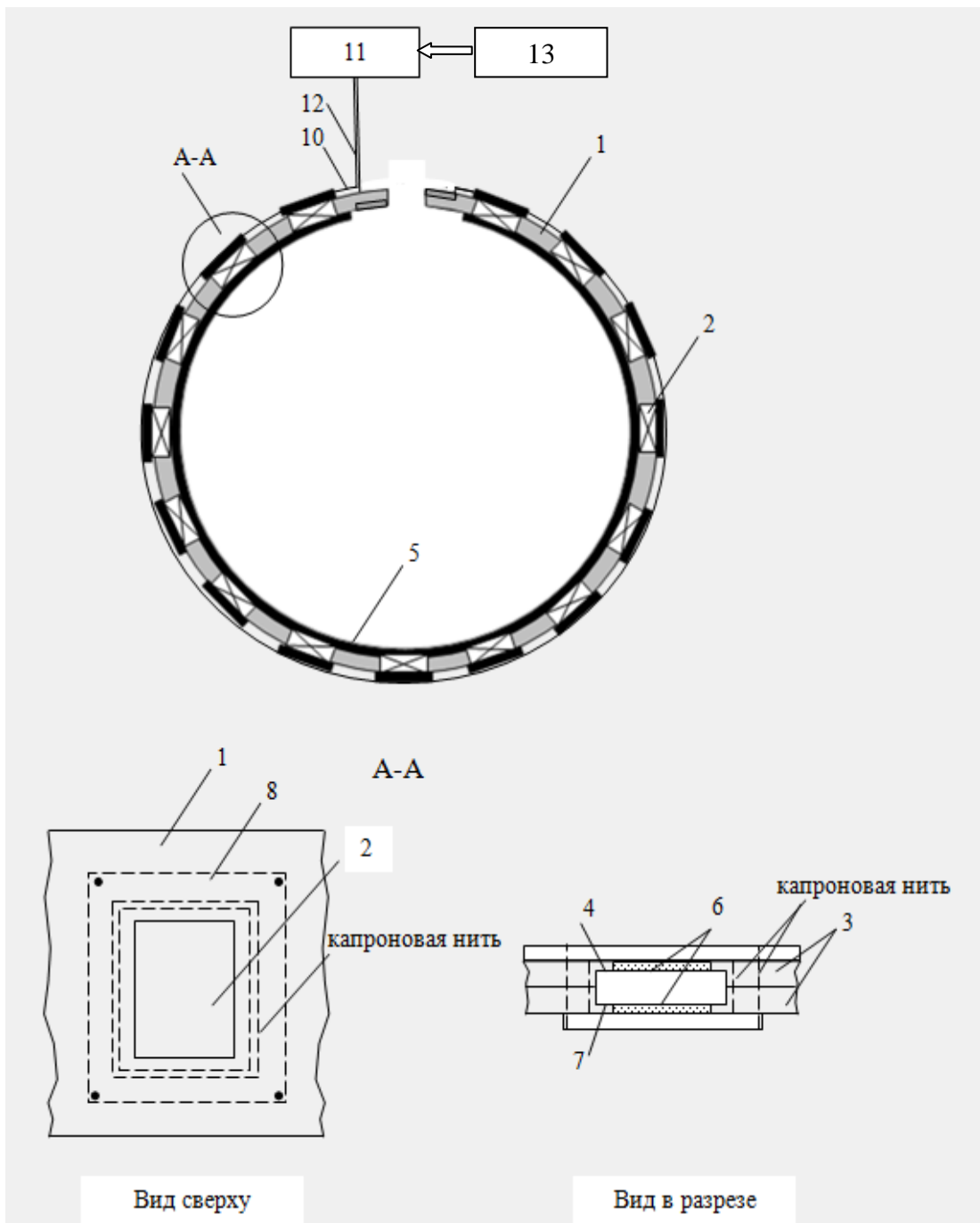


Рисунок 6.32 - Структурная схема ТЭУ для теплового воздействия на отдельные зоны руки человека с возможностью механического массажа биологического объекта

Режим проведения процедур выбирается из стандартного ряда или же определяется непосредственно врачом - физиотерапевтом. При использовании стандартного режима проведения тепловых процедур необходимо придерживаться апробированных и многократно реализованных методик с соответствующими параметрами – уровнями температур, продолжительностью экспозиции и общим временем лечебного сеанса. При реализации нового режима теплового воздействия следует, прежде всего, определиться со следующими параметрами и режимами: значением минимального и максимального нагрева и охлаждения области руки, подвергаемой воздействию; общей продолжительностью процедуры; длительностью охлаждения и нагрева биологического объекта при контрастных процедурах, временем переходного режима при этом же типе процедур и т.п.

За ходом лечебного сеанса должен осуществляться постоянный контроль со стороны медицинского персонала, который должен состоять в тщательном отслеживании пульса (путем подсчета его на височной артерии) и общим состоянием пациента. В случае нарушения теплового режима воздействия за границы требуемого диапазона необходимо оперативное отключение устройства от энергетической сети.

Непременным условием проведения каждого физиотерапевтического сеанса является предварительная стерилизация поверхности прибора, соприкасающейся с поверхностью тела человека. Так, после окончания процедуры воздействующую поверхность устройства тщательно стерилизуют в дезинфицирующем растворе.

После окончания процедур производится оценка состояния больного. При положительном результате осмотра пациент в течение 15-20 мин отдыхает. На этом процедура считается завершенной.

Такие параметры, как число, продолжительность и характер оздоровительных процедур (охлаждение, нагрев или контрастное воздействие) задаются с учетом индивидуальных особенностей человека, его состояния и патологии. Процедуры проводятся ежедневно или через один – два дня. Пол-

ный лечебный курс обычно составляет 10-25 процедур. В случае необходимости цикл процедур может повторяться через определенный временной в зависимости от необходимости и состояния пациента, который как правило составляет 1-1,5 месяца.

Для лечения некоторых заболеваний опорно-двигательного аппарата могут быть рекомендованы следующие режимы осуществления оздоровительных тепловых процедур.

При лечении воспалительных заболеваний суставов, последствий разнообразных травм верхних конечностей, ревматоидного артрита и т.п. преимущественно применяется локальный нагрев в диапазоне температур 36-43 °С. При этом, в случае ревматоидного артрита тепловое воздействие наиболее эффективно в фазе ремиссии, а также в подострой стадии.

При травматических повреждениях в последующей реабилитации пациента важную роль играет тепловой массаж, а также совмещенные контрастные тепловые процедуры и механическое воздействие. Необходимые тепловые режимы процедур следующие: охлаждение должно осуществляться на уровне 12-14 °С, нагрев – не выше 40-43 °С.

Применение разработанных ТЭУ для чередующегося охлаждения и нагрева поврежденных зон руки целесообразно также в случаях поражения плечевого сплетения, переломов костей верхнего плечевого пояса и т.п.

ТЭС для теплового воздействия на отдельные зоны руки человека апробировано в медицинских учреждениях. Проведено 24 процедуры 6 пациентам с заболеваниями верхних конечностей. Из них два пациента с ревматическим артритом, два пациента, проходящих реабилитацию после перелома лучевой кости и два пациента – с повреждением ткани в районе средней трети плеча. В ходе апробации ТЭС наблюдалось улучшение состояния пациентов за счет комбинирования теплового контрастного воздействия (уровень температур варьировался в пределах 12-42 °С) и массажа. В ходе апробации ТЭУ осложнения не наблюдались.

### 6.3.3 Термоэлектрические устройства для косметологии

Одной из самых распространенных областей воздействия при проведении косметологических процедур является лицо человека. На сегодняшний день разработан ряд приборов для теплового воздействия на эту зону тела человека [111, 136, 146, 215, 228]. Нами также спроектированы устройства для реализации тепловых процедур на эту область человеческого тела, отличающиеся высокой точностью воздействия и надежностью работы [143, 144].

В качестве прототипа взят прибор, описанный в [69]. Устройство содержит массажный блок, включающий корпус, в котором установлены теплоконтактная пластина, система теплоотвода и ТЭБ, и средство охлаждения или нагрева теплоконтактной пластины, включающее источник постоянного тока, подключенный через коммутационный элемент к ТЭБ. Устройство снабжено блоком автоматического контрастного термоциклирования, расположенным между источником постоянного тока и коммутационным элементом, держателем с отверстием для массажного блока и элементами прижима теплоконтактной пластины к коже, взаимодействующими с держателем.

Недостатком прибора является невозможность одновременного теплового воздействия на всю поверхность лица человека.

Для устранения указанного недостатка разработана конструкция устройства, внешний вид воздействующей части которой (без блока управления) показан на рисунке 6.33. В ее состав входит основание, выполненное в виде маски, повторяющей контуры лица человека с отверстиями в области глаз, носа и рта. В лобной и щечной областях с внутренней стороны основания расположены зоны теплового воздействия, исполнительным элементом которых являются ТЭБ, для создания равномерного теплового потока контактирующие с тепловыравнивающими пластинами.

ТЭБ подключаются к программируемому источнику постоянного тока, реализующему различные режимы работы модулей (охлаждение, нагрев, их чередование) в зависимости от вида косметологической процедуры. Доза и



длительность теплового воздействия определяется врачом-косметологом, им же производится текущий контроль за состоянием пациента.



Рисунок 6.33 - Внешний вид устройства для проведения тепловых косметологических процедур на лице человека

На рисунках 6.34-6.35 показаны температурные поля поверхности лица человека при осуществлении тепловых косметологических процедур посредством рассмотренного прибора, рассчитанные с помощью соотношений (4.8)-(4.13). Как следует из рисунков температурное поле достаточно равномерное, что обеспечивает эффективность косметологического действия.

На рисунке 6.36 представлена модификация устройства, отличающаяся тем, что тепловое воздействие в ней может проводиться только на щечную зону.

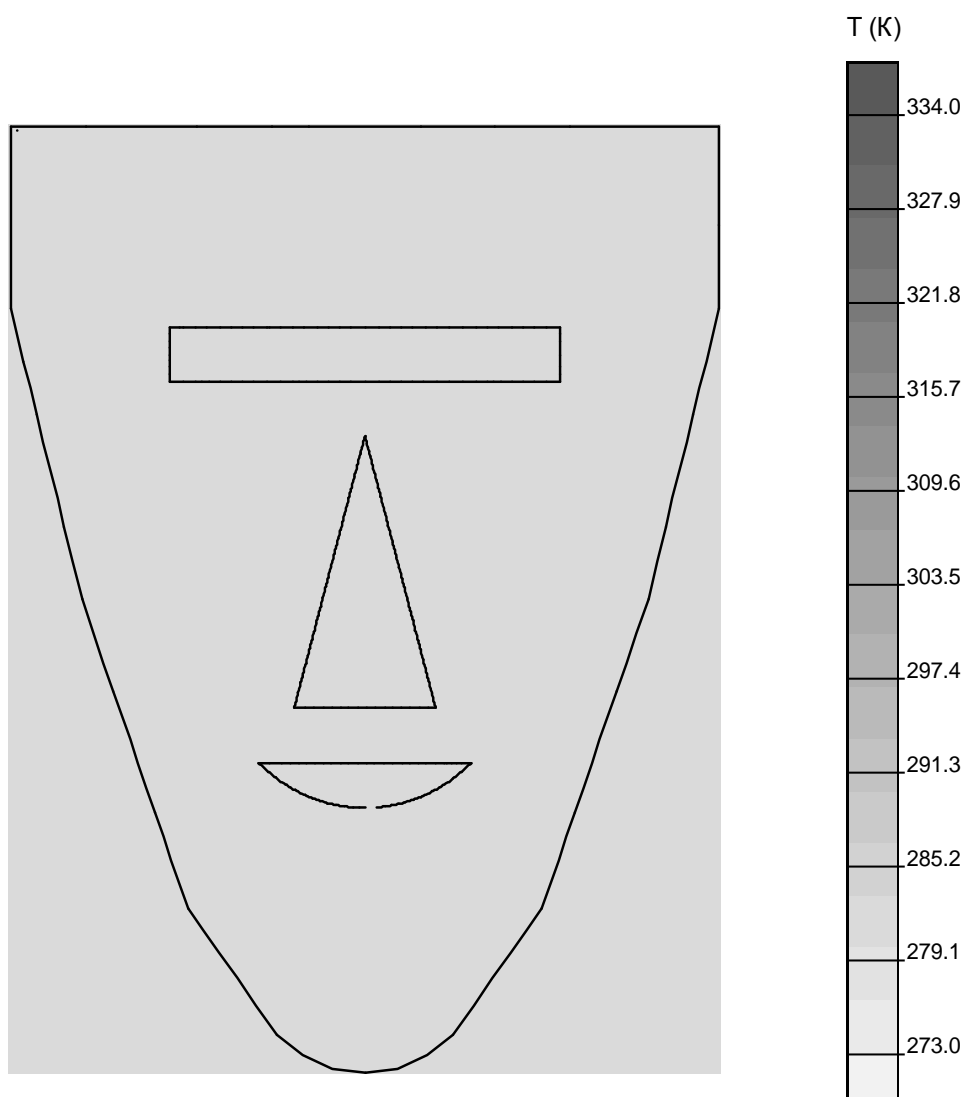


Рисунок 6.34 - Температурное поле лица человека при проведении охлаждающих тепловых косметологических процедур посредством разработанной ТЭС

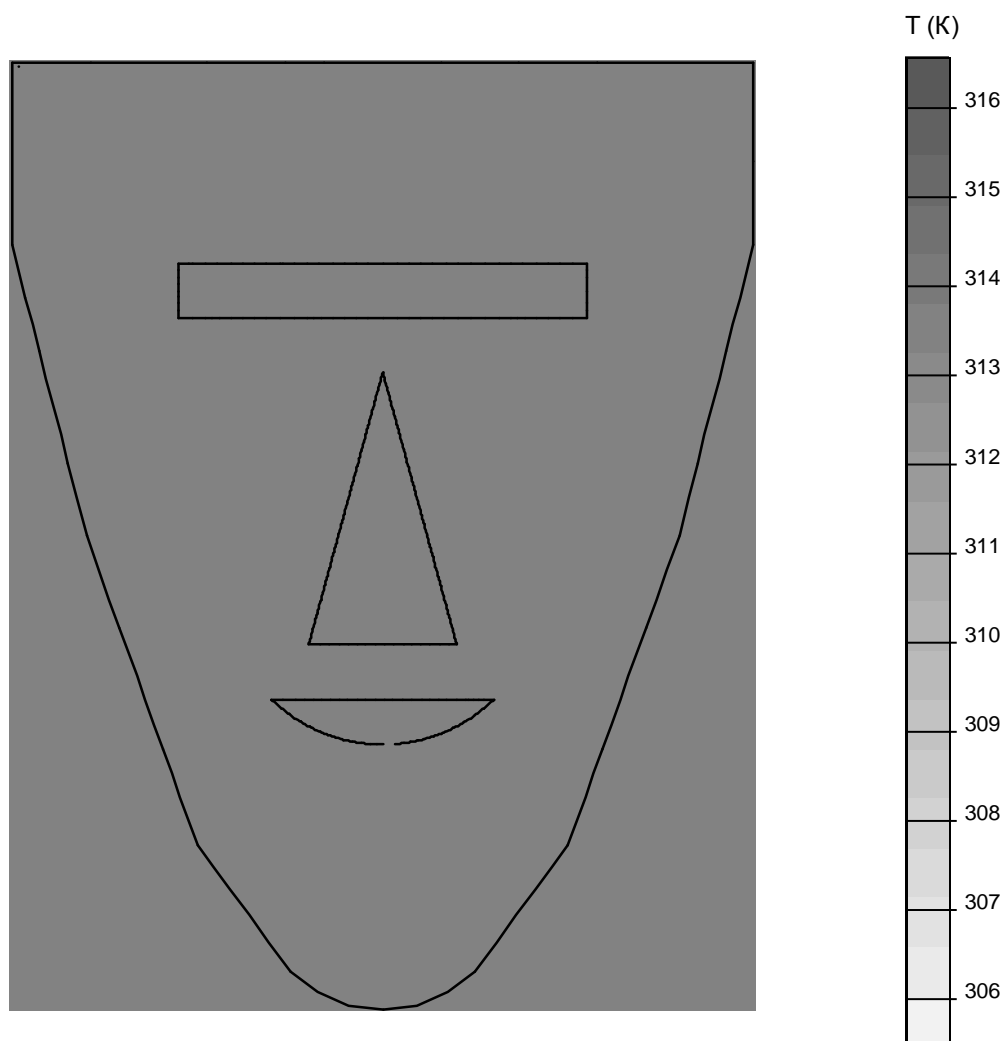


Рисунок 6.35 - Температурное поле лица человека при проведении нагревающих тепловых косметологических процедур посредством разработанной ТЭС



Рисунок 6.36 - Внешний вид модификации устройства для проведения тепловых косметологических процедур на лице человека

### 6.3.4 Термоэлектрическое устройство для остановки кровотечения

Одним из важнейших аспектов сохранения жизни и здоровья человека при ранениях является оперативное и своевременное оказание первой медицинской помощи. Зачастую в таких ситуациях определяющим фактором будет быстрая остановка кровотечения с использованием различных средств. Данное обстоятельство определяется тем фактом, что кровотечение представляет большую опасность жизни человека, так как связано с недостаточным кровоснабжением тканей, потерей крови, которое приводит к гипотензии (снижению артериального давления), затем гипоксии (кислородному голоданию), дыхательной и сосудистой недостаточности и в последствии к смерти человека (здесь следует отметить, что к смертельному исходу может привести даже сравнительно небольшая кровопотеря в пределах 15-20 %). Поэтому адекватная остановка кровотечения дает возможность во многих случаях спасти жизнь человека, предотвращая развитие травматического шока, во многом облегчая последующее выздоровление.

В настоящее время среди существующих методов остановки кровотечения выделяются четыре основные группы: механические, химические, биологические и термические. При обширных ранениях и сильных кровотечениях одновременно или последовательно применяются несколько методов из перечисленных в различных комбинациях.

В полевых условиях наиболее простым способом устранения кровопотерь является механический (наложение жгута, повязок, тампонов, блокираторов кровотока и т.п.). К временным механическим методам остановки кровотечения относятся также наложение тугой повязки, возвышенное положение конечностей (при их повреждении), максимальное сгибание конечностей, пальцевое прижатие поврежденного сосуда к кости, временное шунтирование сосудов полихлорвиниловыми или стеклянными трубками для сохранения кровоснабжения конечности на момент транспортировки. К окончательным механическим методам остановки кровотечения можно отнести проши-

вание раны, сосудистый шов, сосудистую пластику. Временные способы остановки кровотечения являются малоэффективными, при их применении всегда существует риск возобновления кровотока, окончательные же методы требуют специального хирургического оборудования и госпитализации пострадавшего.

Другими методами остановки кровотечения являются химический и биологический. В первом случае используются лекарственные средства, такие как криопреципитат, дицинон, кальция глюконат, викасол, протамина сульфат, адреналин, питуитрин, эпсилон-аминокапроновая кислота и др. При биологическом методе остановки кровотечения применяется тампонада ран гемостатической губкой, фибриновой пленкой, аллогенными материалами, например Аллоплант и Биоплант, прядью большого сальника, мышцей, пленкой Тахокомб. Для общего гемостатического действия используется переливание крови (в том числе прямое переливание крови), переливание плазмы, тромбоцитарной массы, фибриногена, применение витамина С, витамина К. Оба из рассмотренных способов остановки кровотечения требуют наличия лекарственных препаратов, что в полевых условиях не всегда доступно, специального оборудования, а также ограничены наличием различных аллергических реакций у пациента.

В этой связи актуально использование новых методов остановки кровопотерь, к которым также относится термический метод, основанный на локальном охлаждении зоны кровотечения. Эффект от местного применения холода состоит в вызываемом спазме сосудов, что приводит к снижению объемного кровотока по поврежденному сосуду и тем самым способствует фиксации тромбов в месте повреждения. Практически при любом виде травм в практике оказания первой помощи в этом случае применяется пузырь со льдом. При желудочном кровотечении желудок промывают холодной водой. Несмотря на то, что перечисленные методы достаточно эффективны, их главными недостатками являются сложность использования в полевых условиях, где сказывается отсутствие постоянного источника холода, диском-

фортность процедуры остановки кровотечения, риск обморожения тканей.

В этих условиях перспективным является разработка и исследование новых технических средств, позволяющих реализовывать с высокой эффективностью рассмотренный метод остановки кровотечения, основанный на локальном замораживании области кровопотери. В качестве таких технических средств перспективным представляется использование приборов и устройств, исполнительным элементом в которых являются термоэлектрические преобразователи энергии [6, 55].

Конструкция термоэлектрического устройства для остановки кровотечения приведена на рисунке 6.37, а его внешний вид на рисунке 6.38. Прибор состоит из термоэлектрической батареи (ТЭБ) 1, рабочей поверхностью 2 сопряженной с тепловыравнивающей пластиной 3. Поверхность 4 ТЭБ 1, противоположная рабочей 2, приведена в тепловой контакт с теплосъемной пластиной 5. Тепловыравнивающая 3 и теплосъемная 5 пластины, обладающие высокой теплопроводностью, связаны между собой креплениями 6 (например, в виде болтового соединения) так, чтобы тепловыравнивающая, теплосъемная пластины и ТЭБ образовывали жесткую конструкцию. Для устранения теплоперетоков между тепловыравнивающей 3 и теплосъемной 5 пластиной крепления 6 выполняются из материала с низким коэффициентом теплопередачи (например, пластмассы).

На поверхность тепловыравнивающей пластины 3, контактирующей с объектом воздействия, с хорошим сцеплением нанесен тонкий слой эластичного материала 7 (например, силикона). Питание ТЭБ 1 производится управляемым источником электрической энергии 8. Для плотной фиксации устройства на поврежденном участке ткани используется фиксирующее приспособление 9, выполненное в виде двух полос из кожного или матерчатого материала, с одной стороны крепящихся по бокам тепловыравнивающей пластины 3, а с другой имеющие возможность осуществлять ремненное соединение.

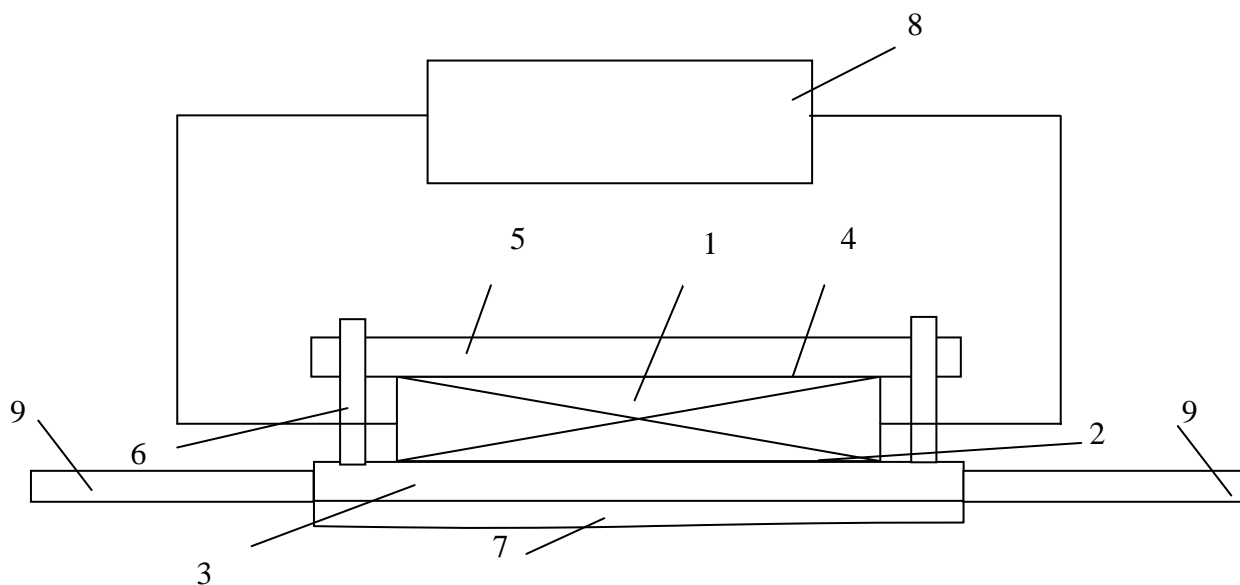


Рисунок 6.37 - Конструкция термоэлектрического устройства для остановки кровотечения



Рисунок 6.38 - Внешний вид термоэлектрического прибора для остановки кровотечения



Перед эксплуатацией прибор тщательно дезинфицируется и затем поверхностью с нанесенным эластичным материалом 7 приводится в механический контакт с поврежденным участком ткани. С помощью фиксирующего приспособления 9 производится плотное прижатие устройства к пораженному участку. Далее посредством управляемого источника электрической энергии 8 на ТЭБ 1 подается постоянный электрический ток такой полярности, чтобы ее рабочая поверхность 2, и, следовательно, тепловыравнивающая пластина 3 и эластичный материал 7, охладилась. Величина тока питания, а также продолжительность охлаждения определяются длительностью кристаллизации, затвердевания и остановки кровотока поврежденного участка. Излишек теплоты, выделяющейся на поверхности 4 ТЭБ 1, противоположной рабочей, отводится в окружающую среду посредством теплосъемной пластины 5.

После остановки кровотечения на ТЭБ 1 от источника электрической энергии 8 подается краткий импульс тока противоположной полярности, что приводит к непродолжительному нагреву тепловыравнивающей пластины 3 и эластичного материала 7 с целью снятия болезненных ощущений при съеме устройства.

Далее происходит непосредственно съем прибора, после чего проводятся дальнейшие медицинские процедуры.

Представляет интерес комбинированное использование разработанного прибора с другими методами остановки кровотечения. Так, совместно с локальным замораживанием зоны кровотока, может применяться механическое пережатие, а также прием соответствующих лекарственных препаратов. В этом случае эффект будет более действенным, а процесс остановки кровотока более быстрым и эффективным.

### **6.3.5 Термоэлектрические устройства для внутриволокнистого теплового воздействия**

Разработана конструкция ТЭУ для внутриволокнистого теплового воздействия, структурная схема которой показана на рисунке 6.39 [68].

Устройство включает в себя высокотеплопроводный стержень 1, с резьбой 2, с помощью которой на нем с одного конца закрепляются сменные аппликационные насадки 3. Насадки выполнены из меди или алюминия и покрыты слоем резистентного к биологическим тканям материала. Другой конец стержня 1 своим торцом находится в тепловом контакте с холодными спаями двухкаскадной ТЭБ 4. Горячие спаи ТЭБ 4 сопряжены с полым высокотеплопроводным металлическим теплообменником 5 с плавящимся рабочим веществом, находящимся в состоянии фазового перехода.

В упрощенном случае теплообменник может быть заполнен водой 6 и предварительно заморожен. Металлический теплообменник 5 снабжен крышкой 7, герметично закрывающей корпус за счет резиновой прокладки 8, для наилучшего теплообмена имеющий внутреннее оребрение 9 в зоне контакта с ТЭБ 4.

Стержень 1, ТЭБ 4 и теплообменник 5 покрыты слоем теплоизоляции 10.

Температура аппликационной насадки 3 контролируется при помощи размещенной на границе ее контакта со стержня 1 датчиком температуры 11, сигнал с которого поступает на блок контроля и регулировки, выход которого связан с блоком питания ТЭБ 4.

Принцип работы устройства следующий.

До медицинских процедур устройство предварительно готовится к работе. Для этого теплообменник 5 заполняется водой 6. Далее ТЭУ помещается в стационарный холодильник для заморозки воды в объеме теплообменника. После этого прибор вынимается из холодильника, на него устанавливается необходимая аппликационная насадка 3 в соответствие с характером проце-

дур (резьбовые соединения предварительно смазываются теплопроводящей пастой для уменьшения термического сопротивления). После пропускания через ТЭБ 4 постоянного электрического тока от блока контроля и регулировки, последняя начинает охлаждать стержень 1 и, соответственно, саму аппликационную насадку 3. Лед, находящийся в металлическом теплообменнике 5, дает возможность с большой точностью стабилизировать температуру горячих спаев ТЭБ 4. До перехода всей массы льда в воду температура горячих спаев ТЭБ 4 не будет существенно превышать 0°C.

Внутреннее оребрение 9 теплообменника 5 будет обеспечивать равномерное распределение температуры по всему его объему.

Сигнал, поступающий от датчика температуры 11 на блок контроля и регулировки, дает возможность обеспечить такое питание ТЭБ 4 электрическим током, которое бы обеспечило требуемую температуру аппликационной насадки 3, а также в случае необходимости ее плавное регулирование. По окончании лечебных процедур, ТЭУ отключается от источника электрической энергии и дезинфицируется.

В конструкции устройства не используется жидкостная система съема теплоты с горячих спаев ТЭБ, что делает его компактным и удобным в эксплуатации. Однако при этом следует отметить, что продолжительность работы ТЭУ ограничивается временем перехода объема льда в жидкую фазу (воду). В связи с этим необходимо предусмотреть возможность его оперативной замены.

Другим недостатком данной конструкции прибора являются тепловые потери по длине стержня, а также ограничения, связанные с возможностью получения глубокого охлаждения аппликатора.

Указанного недостатка лишена конструкция, приведенная на рисунке 6.40 и содержащая основную и дополнительную ТЭБ. Внешний вид прибора приведен на рисунке 6.41.

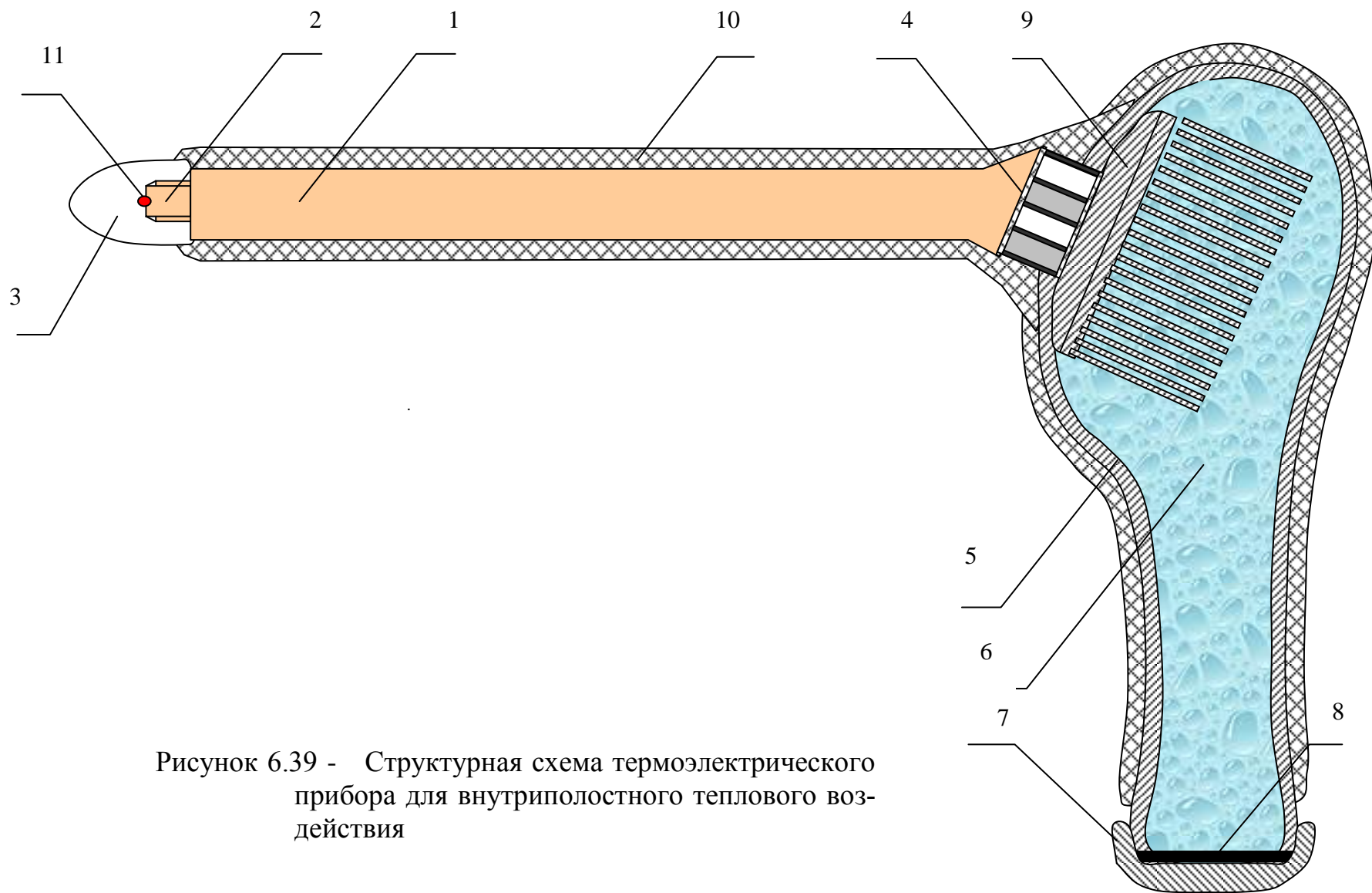


Рисунок 6.39 - Структурная схема термоэлектрического прибора для внутрисполостного теплового воздействия

Воздействующий аппликатор устройства выполнен из материала с высокой теплопроводностью, который имеет форму изогнутого под углом  $35^\circ$  конуса с отполированной округлой поверхностью в вершине диаметром 4 мм. С учетом требований к медицинской аппаратуре и обеспечения резистентности организма к объекту воздействия поверхность аппликатора никелирована. Система изменения температуры аппликатора состоит из пары ТЭБ и теплопровода между ними в виде медного стержня. В устройстве использован двухканальный блок питания, выход которого связан с двухкаскадными ТЭБ, а вход которого связан с датчиком температуры, вмонтированным в подставку под криоинструмент, для контроля за температурой аппликатора.

Устройство содержит аппликатор 1, выполненный из материала с высокой теплопроводностью, который с помощью навинчивающегося теплоизолирующего чехла 2 прижимается к холодным спаям воздействующей ТЭБ 3. Горячие спаи воздействующей ТЭБ 3 находятся в хорошем тепловом контакте с одним из оснований медного стержня 4, играющего роль теплопровода, причем медный стержень имеет длину, позволяющую свободно проникать на необходимую глубину гортани пациента. Противоположное основание медного стержня 4 находится в хорошем тепловом контакте с холодными спаями опорной ТЭБ 5. Отвод тепла от горячих спаев опорной ТЭБ 5 осуществляется с помощью игольчатого радиатора 6, омываемого проточной водой, циркулирующей в канале 7 ручки 8 устройства. Медный стержень 4 и ТЭБ 3 и 5 с боковых сторон защищены теплоизоляцией 9. Контроль за температурой аппликатора осуществляется при помощи датчика температуры 10, вмонтированного в подставку под криоинструмент 11, содержащую сигнальную лампочку 12. Питание ТЭБ 3 и 5 осуществляется двухканальным блоком питания.

Прибор работает следующим образом. Выставляют необходимое положение аппликатора 1, и фиксируют его при помощи навинчивающегося теплоизолирующего чехла 2, прижимающего его к холодным спаям воздействующей ТЭБ 3. Далее криоинструмент помещают в подставку 11, где на него подается напряжение от блока питания. Наличие двух ТЭБ 3 и 5 позволяет добиться раз-

ности температур между аппликатором 1 и проточной жидкостью, циркулирующей в канале 7 ручки 8, порядка 50-60 °С. При этом холодные спаи опорной ТЭБ 5 при помощи теплопровода задают опорную температуру горячих спаев воздействующей ТЭБ 3 и, таким образом, позволяют достичь необходимого температурного уровня на аппликаторе 1. О достижении необходимой температуры аппликатора 1, прибор сигнализирует с помощью сигнальной лампочки 12. Врач извлекает криоинструмент из подставки и приводит в контакт с внутриполостными тканями пациента по необходимой методике. При завершении процедуры, устройство выключается и протирается дезинфицирующим раствором.

Рабочий диапазон температур прибора лежит в пределах – 30 - – 40 °С.

Анализ работы рассмотренной модификации ТЭУ для внутрисполостной гипотермии показал ее высокую практичность, надежность, удовлетворительные энергетические характеристики. В описанной конструкции устройства предусмотрено жидкостное охлаждение горячих спаев ТЭБ, что делает ее эксплуатацию практически неограниченной по времени.

Основными показаниями к применению ТЭС являются локальные воспалительные процессы внутрисполостных тканей [16, 209, 219].

Общая методика проведения процедур следующая. Перед началом сеанса больного усаживают в больничное кресло, где он может принять удобное положение. Предварительно перед воздействием проводят легкую местную анестезию той зоны, в которой будет проводиться лечение 10% раствором лидокаина. Необходимость такой обработки связана с риском механических повреждений внутрисполостных тканей при вводе прибора в организм человека.

С помощью регулировки блока контроля и управления задается необходима величина тока питания ТЭБ, соответствующая температурному режиму проведения процедур.

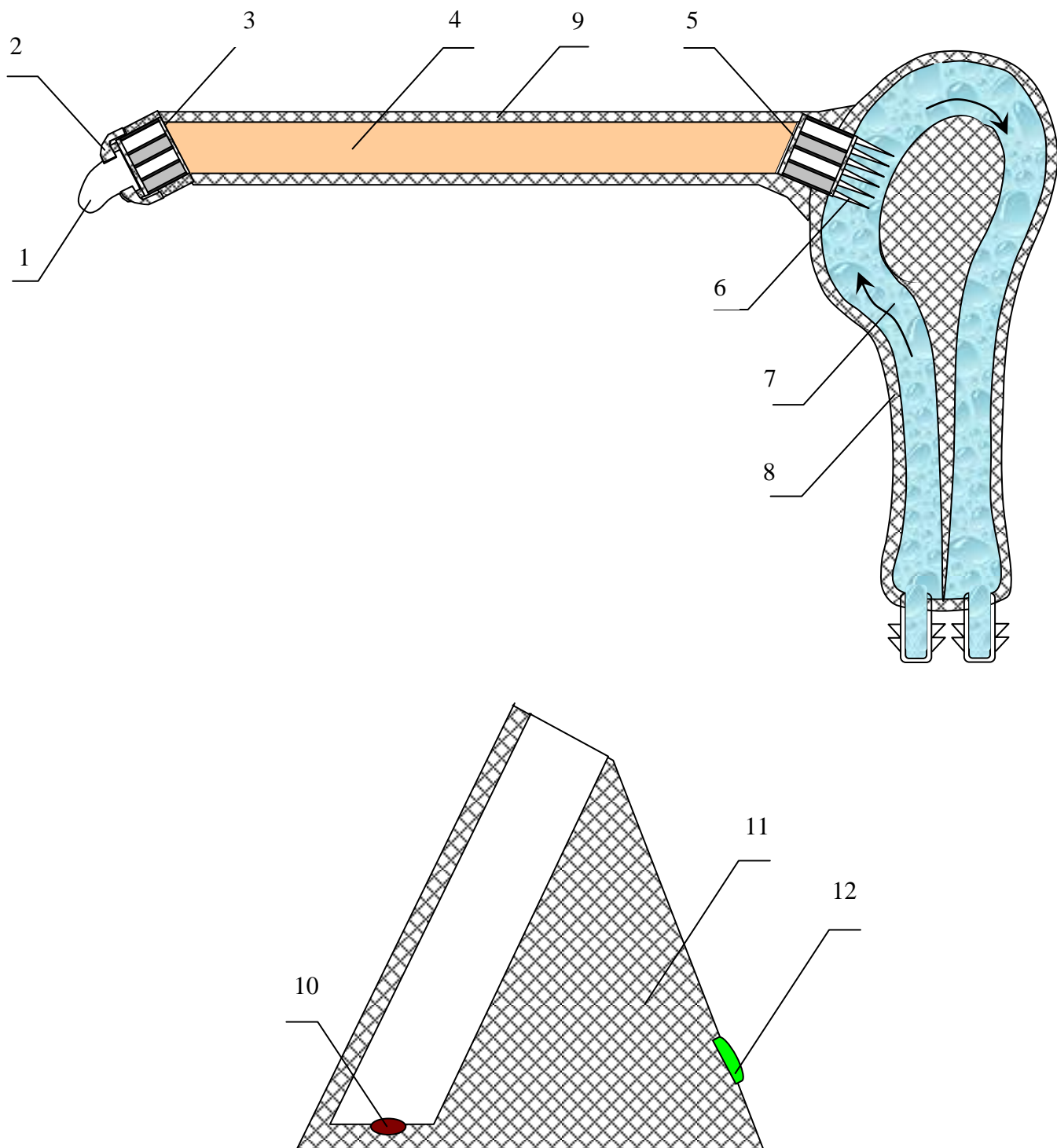


Рисунок 6.40 - Структурная схема термоэлектрического прибора для внутрисполостного теплового воздействия с дополнительной ТЭБ



Рисунок 6.41 Внешний вид термоэлектрического прибора для внутри-полостного теплового воздействия с дополнительной ТЭБ

ТЭУ устанавливается на подставку, врач запускает прибор в работу. При выходе прибора на режим, в подставке загорается сигнальная лампочка и подается звуковой сигнал. После чего устройство извлекается из подставки, вводится в полость человека и осуществляется криовоздействие по заданному тепловому режиму в соответствии с лечебной методикой. Месторасположение прибора, продолжительность, температурный уровень и кратность теплового воздействия зависит от разновидности заболевания. Лечение может производиться амбулаторно.

Перед эксплуатацией ТЭУ стерилизуется. При проведении процедур после



каждого прикосновения аппликатора к слизистой оболочки, производится его обработка салфеткой, смоченной спиртом с целью удаления слюны и слизи. При несоблюдении этих требований возможен риск возникновения нежелательных адгезивных эффектов.

Предложены следующие методики с использованием разработанной ТЭС при лечении ЛОР заболеваний.

Методика криогенного лечения небных миндалин в случае хронического тонзиллита следующая. Первоначально воспаленная зона небных миндалин промывается антисептиком. Промывание производится ежедневно 3-5 раз перед процедурой. Далее в соответствии с методикой, холодным концом аппликатора прикасаются к поверхности небных миндалин таким образом, чтобы устья крипт не замораживались. Прикосновения холодным аппликатором к небной миндалине производится 2-5кратно, в зависимости от ее морфологии и расстоянием между лакунами в области верхнего, среднего и нижнего полюса с продолжительностью прикосновения порядка 0,5 мин.

Методика лечения локальным охлаждением гипертрофического фарингита и микоза зависит от анатомических особенностей больного. При проведении сеанса выполняется от 3-4 до 12-15 прикосновений аппликатором, охлажденным до температуры  $-40^{\circ}\text{C}$  с экспозицией в 0,5 мин.

При воздействии на гипертрофированную лимфоидную ткань ротоглотки экспозиция составляет порядка 1-2 мин. После лечения писанным методом регенеративной криотерапии в случае фарингита в течении 4-6 недель идет циклическая реакция с существенной активизацией регенеративных процессов. Сеанс повторяется 3-8 раз с интервалом в 2-3 месяца.

В случае лечения синдрома надгортанника (состоящего в возникновении механического контакта корня языка и надгортанника, сопровождающегося ощущением комка в горле, в хронических случаях приводящего к деформации вестибулярного отдела гортани, а также перекрытию дыхательных путей) осуществляют криовоздействие с использованием выпуклого аппликатора на зону небных миндалин, боковых валиков, корня языка и задней стенки глотки. Про-

цедура повторяется 5-7 кратно с интервалом 2-4 раза в месяц.

При профилактической иммуностимулирующей криотерапии сначала проводят легкую местную анестезию путем обрызгивания оболочки глотки 10% лидокаином, а уже затем осуществляют криовоздействие на эту зону. Для большинства пациентов осуществляют локальное замораживание лимфоидных гранул, боковых валиков, сосуды задней стенки глотки. Указанная процедура представляет собой разновидность профилактических мероприятий для снижения количества простудных заболеваний, ОРВИ и гриппа и проводится в среднем два раза в год.

Методика регенеративной криотерапии при синдроме апноэ и храпе состоит в локальном охлаждающем воздействии на мышцы мягкого неба и небного язычка аппликатором, охлажденным до температуры - 40 °С с минутной экспозицией. Охлаждение этих зон активизирует регенеративные процессы в них и улучшает сократительную способность мышечных волокон. Проведение регенеративной криотерапии легко реализуется в поликлиниках, дополнительной квалификации за исключением освоения методики криогенного лечения для практикующего врача не требуется.

К противопоказаниям по применению ТЭУ относятся острые воспалительные процессы в верхних дыхательных путях.

### **6.3.6 Термоэлектрическое устройство для термопунктуры**

Разработано ТЭУ для термопунктуры, структурная схема которого изображена на рисунке 6.42, а внешний вид - на рисунке 6.43.

Прибор содержит элемент теплового воздействия 1, присоединенный к ручке - держателю 2, два термодатчика 3 и 4, размещенные на элементе температурного воздействия 1, соединенные с устройством управления 5, обеспечивающем питание электрической энергией и контроль работы элемента теплового воздействия 1.

Элемент теплового воздействия 1 выполнен тонкостенным, цилиндриче-

ским, из металла с высоким коэффициентом теплопроводности, нижнее основание которого имеет тепловой контакт с первым спаем ТЭМ 6, а верхнее основание – имеет отверстие в центре, диаметр которого немного превышает диаметр тепловыравнивающей пластины 7 в форме диска, расположенной на одном уровне с верхним основанием и приведенной в тепловой контакт со вторым спаем ТЭМ 6. Дополнительно элемент теплового воздействия 1 заполнен теплоизоляционным веществом 8.

Устройство работает следующим образом.

Для проведения медицинских процедур необходимо установить устройство в рабочее положение, прижав посредством ручки – держателя 2 элемент теплового воздействия 1 к активной точке на поверхности кожи, и осуществить его питание электрической энергией блоком управления 5. При питании электрической энергией ТЭМ 6, являющегося рабочим компонентом элемента теплового воздействия 1, между его первым и вторым спаями возникнет разность температур, пропорциональная величине протекающего электрического тока. Эта разность температур сохранится между верхним основанием элемента теплового воздействия 1 и тепловыравнивающей пластиной 7, имеющими тепловой контакт с первым и вторым спаями ТЭМ 6 соответственно. Локализация температурного воздействия на конкретный участок кожи будет осуществлена за счет поддержания постоянного градиента температуры на границе сопряжения тепловыравнивающей пластины 7 и верхнего основания элемента теплового воздействия 1. Поддержание постоянного градиента температуры во время осуществления раздражающего воздействия на участок кожи осуществляется при помощи блока управления 5, изменяющего величину электрической энергии, питающей ТЭМ 6 в соответствии с сигналами, поступающими от термодатчиков 3 и 4.

Использование теплоизоляционного вещества 8 в элементе температурного воздействия 1 необходимо для устранения перетоков тепла с его боковой поверхности на ТЭМ 6.

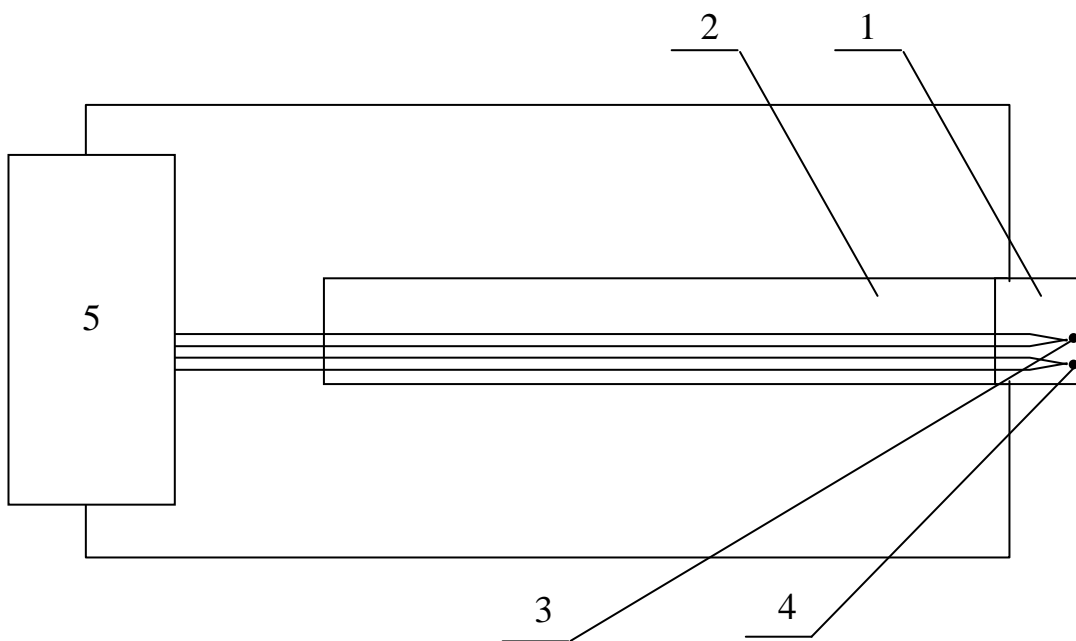


Рисунок 6.42 - Структурная схема ТЭУ для термопунктуры



Рисунок 6.43 - Внешний вид ТЭУ для термопунктуры

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения диссертационной работы решена важная научно-прикладная проблема, состоящая в разработке и исследовании охлаждающих систем, выполненных на базе высокоточных ТЭБ, как слоистой, так и классической конструкции.

Разработан новый метод создания термоэлектрических охлаждающих аппаратов, заключающийся в использовании ТЭБ слоистой конструкции, в которой за счет специального исполнения значительно снижены механические напряжения, являющиеся следствием теплового расширения (сжатия) материалов.

Созданы математические модели, описывающие работу слоистых ТЭБ и систем на их основе. Разработана математическая модель слоистого ТЭ, построенная на основе решения двумерной нестационарной задачи теплопроводности и термоупругости для многослойной системы сложной конфигурации, учитывающая тепловое расширение и сжатие материалов. Получены зависимости, позволяющие определить термомеханические напряжения и деформации в слоистых ТЭ и осуществить их сравнение с характеристиками ТЭ классической П-образной конструкции. Показано, что слоистое исполнение ТЭ в значительной мере снижает величину термомеханических напряжений, возникающих в ТЭБ.

Предложен метод теплоотвода от элементов РЭА работающих в режиме повторно-кратковременных тепловых нагрузок, состоящий в совместном использовании плавящихся рабочих веществ и высокоточных ТЭБ, дающий возможность повысить продолжительность цикла работы радиоэлектронного компонента за счет сокращения времени затвердевания рабочего агента. Создана математическая модель для расчета температурного режима работы элементов РЭА, подвергающихся повторно-кратковременным тепловым нагрузкам, при использовании разработанной системы теплоотвода. Модель реализована на основе решения «задачи Стефана» с использованием приближенного метода Лейбензона Л.С. В результате расчетов получены

данные об изменении величины температуры оболочки теплоотводящего устройства и, соответственно, РЭА, а также координаты границы раздела фаз во времени для различных веществ при их плавлении и затвердевании. результаты моделирования показали целесообразность использования ТЭБ для интенсификации процесса остывания и затвердевания рабочих веществ в случае отвода теплоты от элементов импульсной РЭА с низким уровнем скважности.

Разработан новый тип системы обеспечения температурного режима радиоэлектронных приборов, выполненных в виде электронных плат. Для организации эффективного отвода теплоты от таких приборов использована схема неравномерного охлаждения, реализованная на основе совместного использования плавящихся рабочих веществ и ТЭБ. Создана математическая модель, описывающая работу системы теплоотвода. Она построена на основе численного анализа температурного поля пластины с дискретными источниками и стоками тепловой энергии. Для указанной схемы отвода тепла построены зависимости температуры различных точек электронной платы от тока питания и потребляемой ТЭБ мощности при различных тепловых нагрузках, отслежено изменение температуры этих точек во времени. Установлено, что применение неравномерного отвода теплоты от электронной платы дает существенный выигрыш в энергетических показателях. При указанном подходе температурное поле электронной платы оказывается более однородным и охлаждение является более эффективным.

Разработана ТЭС для локального теплового воздействия на биологически активные точки человека, позволяющая проводить адаптивную регулировку физических параметров воздействия в соответствии с состоянием биологического объекта и обеспечивающая необходимую точность и надежность режимов работы. Разработанные теоретические основы расчета системы отличаются учетом «неплотности» контакта биологического объекта и источника теплоты. Для исследования различных режимов работы ТЭС, соответствующих

определенному типу лечебных процедур, создана ее нестационарная математическая модель.

Рассмотрена ТЭС, позволяющая осуществлять тепловое действие на поверхность тела человека в лечебных и профилактических целях. Исследование ТЭС осуществлено на основе анализа температурного поля пластины произвольной формы с дискретными источниками энергии.

Предложена и исследована ТЭС для внутриволостного теплового воздействия, предназначенная для применения в оториноларингологии, гинекологии, проктологии, урологии, косметологии. Разработана ее математическая модель, учитывающая теплофизические параметры объекта воздействия, а также условия эксплуатации.

Результаты натурных испытаний охлаждающих ТЭС подтвердили достаточную точность разработанных математических моделей и результатов теоретических исследований. Максимальное расхождение расчетных и экспериментальных данных не превысило 10 % на всем диапазоне измерений.

На основе проведенных исследований разработаны новые конструкции слоистых ТЭБ, ТЭУ для обеспечения температурных режимов работы РЭА и ее элементов, а также медицинского назначения, которые могут найти применение в радиоэлектронике, приборостроении, медицине и других отраслях промышленности. Ряд ТЭУ внедрен в производство, а также образовательный процесс высших учебных заведений, что подтверждено соответствующими актами.

Совокупность результатов исследований, полученных в диссертационной работе, дает возможность использовать их в качестве научной основы при проектировании охлаждающих ТЭС и приборов для различных областей техники. Практическая значимость проведенных работ подтверждается включением их в федеральные научно-технические программы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев, В.А. Проектирование тепловых аккумуляторов / В.А. Алексеев, В.В. Малоземов. - М.: МАИ, 2008. - 86 с.
2. Алексеев, В.А. Основы проектирования тепловых аккумуляторов космических аппаратов / В.А. Алексеев. - Курск: Наукком, 2016. - 248 с.
3. Алексеев, В.Ф. Принципы конструирования и автоматизации проектирования РЭУ / В.Ф. Алексеев. - Мн.: БГУИР, 2003. - 197 с.
4. Анатычук, Л.И. Термоэлектричество. Термоэлектрические преобразователи энергии / Л.И. Анатычук. - Киев, Черновцы: Институт термоэлектричества, 2003. - 376 с.
5. Анатычук, Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства. Справочник / Л.И. Анатычук. - Киев: Наукова Думка, 1979. - 768 с.
6. Анатычук, Л.И. Современное состояние и некоторые перспективы термоэлектричества / Л.И. Анатычук // Термоэлектричество. - 2007. - №2. - С. 7-20.
7. Анатычук, Л.И. Термоэлектрический прибор для лечения кожи / Л.И. Анатычук, Р.Р. Кобылянский, Ю.Н. Мочернюк // Термоэлектричество. - 2009. - № 4. - С. 93-100.
8. Анатычук, Л.И. Об использовании термоэлектрического охлаждения в дерматологии и косметологии / Л.И. Анатычук, О.И. Денисенко, Р.Р. Кобылянский, Т.Я. Каденюк // Термоэлектричество. - 2015. - № 3. - С.57-71.
9. Анатычук, Л.И. Охлаждение головного мозга человека термоэлектрическими средствами / Л.И. Анатычук, Р.Р. Кобылянский // Термоэлектричество. - 2016. - № 2. - С.45-54.
10. Анатычук, Л.И. Сравнительный анализ термоэлектрических и компрессионных тепловых насосов для индивидуального кондиционирования в условиях повышенной температуры окружающей среды / Л.И. Анатычук, А.В. Прибыла, Н.Н. Короп // Термоэлектричество. - 2016. - № 5. - С.95-98.
11. Анатычук, Л.И. Термоэлектрический прибор для диагностики воспалительных процессов и неврологических проявлений остеохондроза позво-



ночника человека / Л.И. Анатычук, О.Е. Юрик, Р.Р. Кобылянский // Термоэлектричество. – 2017. - №3. - С.63-71.

12. Анатычук, Л.И. Компьютерное моделирование и оптимизация динамических режимов работы термоэлектрического прибора для рефлексотерапии / Л.И. Анатычук, Л.Н. Вихор, Р.Р. Кобылянский // Термоэлектричество. – 2017. - №3. - С.47-54.

13. Андреев, П.Г. Основы проектирования электронных средств / П.Г. Андреев, И.Ю. Наумова. - Пенза: ПГУ, 2010. - 124 с.

14. Андреев, П.Г. Защита радиоэлектронных средств от внешних воздействий / П.Г. Андреев, И.Ю. Наумова. - Пенза: ПГУ, 2012. - 130 с.

15. Архаров, А.М. Конструкции микротеплообменников криогенных систем для охлаждения маломощных электронных устройств / А.М. Архаров, Е.В. Дилевская, С.И. Каськов, Ю.А. Шевич // Вестник МАХ. - 2008 - №1. - С.15-20.

16. Баранов, А. Ю. Лечение холодом / А.Ю. Баранов А. Ю., В.Н. Кидалов. - М: Апрель, 2000. - 160 с.

17. Баранов, А.Ю. Искусственный холод на службе здоровья / А.Ю. Баранов // Вестник Международной академии холода. - 2006. - № 1. - С.12-14.

18. Баранов, А.Ю. Перенос теплоты в объекте общего криотерапевтического воздействия / А.Ю. Баранов, Т.А. Малышева, А.В. Савельева, А.Ю. Сидорова // Вестник Международной академии холода. - 2012. - № 2. - С.35-40.

19. Баранов, А.Ю. Выбор схемы общего криотерапевтического воздействия / А.Ю. Баранов, Т.А. Малышева, А.В. Савельева, А.Ю. Сидорова // Вестник Международной академии холода. - 2012. - № 4. - С.40-44.

20. Белик, В.Д. Численно-аналитический метод решения нелинейного нестационарного уравнения теплопроводности / В.Д. Белик, Б.А. Урюков, Г.А. Фролов, Г.В. Ткаченко // Инженерно-физический журнал. - 2008. - №6. - С.1058-1062.

21. Билибин, К. И. Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры / К.И. Билибин, А.И. Власов, Л.В. Журавлева [ и д.р.] - М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. - 568 с.
22. Блохин, В.Г. Современный эксперимент: подготовка, проведение, анализ результатов / В.Г. Блохин. - М.: Радио и связь, 1997. - 232 с.
23. Боголюбов, В.М. Комбинирование и сочетание лечебных физических факторов / В.М. Боголюбов, В.С. Улащик // Физиотерапия, бальнеология и реабилитация. - 2004. - № 5. - С.39-46.
24. Боголюбов, В.М. Физиотерапия в реабилитации больных ревматоидным артритом / В.М. Боголюбов, В.Д. Сидоров // Физиотерапия, бальнеология и реабилитация. - 2012. - № 2. - С.3-9.
25. Булат, Л.П. Термоэлектрические охлаждение / Л.П. Булат. - СПб.: СПбГУНиПТ, 2002. - 147 с.
26. Булат, Л.П. Твердотельные охлаждающие системы / Л.П. Булат // Холодильный бизнес. - 2008. - № 8. - С.10-17.
27. Булат, Л.П. Прикладные исследования и разработки в области термоэлектрического охлаждения в России / Л.П. Булат // Холодильная техника. - 2009. - № 7. - С.34-37.
28. Булат, Л.П. Нанотехнологии в холодильной технике / Л.П. Булат // Холодильная техника. - 2010. - №2. - С.24-25.
29. Буренин, В.В. Новые конструкции рекуперативных теплообменных аппаратов для систем кондиционирования воздуха / В.В. Буренин // Холодильная техника. - 2010. - №1. - С.26-29.
30. Буренина, И.А. Современные методики криотерапии в клинической практике / И.А. Буренина // Вестник современной клинической медицины. - 2014. - т. 7. - С.57-61.
31. Варданян, Г.С. Прикладная механика : применение методов теории подобия и анализа размерностей к моделированию задач механики деформируемого твердого тела / Г.С. Варданян. - М.: Инфра-М, 2018. - 174 с.

32. Воронин, А.И. К вопросу о механической прочности ветвей термоэлементов на основе  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  / А.И. Воронин, А.С. Осилков, Т.А. Горбатовская // Доклады XI Межгосударственного семинара «Термоэлектрики и их применение». - Санкт-Петербург, 2008. - С.284-289.
33. Гаврильев, Р.И. Критерий хрупкого разрушения и долговечность материалов при термомеханическом воздействии / Р.И. Гаврильев // Инженерно-физический журнал. - 2008. - №2. - С.394-400.
34. Герцик, Г.Я. Методики и устройства для вспомогательного исследования акупунктурных точек и меридианов / Г.Я. Герцик, Ю.Н. Орлов, Ю.Г. Герцик [и др.] // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. - 2001. - № 10. - С.24-27.
35. Гершберг, И.А. Определение условий эффективного применения термоэлектрических модулей для охлаждения тепловыделяющих объектов / И.А. Гершберг, Ф.Ю. Тахистов // Доклады X Межгосударственного семинара «Термоэлектрики и их применение». - Санкт-Петербург, 2006. - С.173-179.
36. Граб, И.Д. Методы исследования систем охлаждения / И.Д. Граб, Ю.А. Сивагина // Молодой ученый. - 2014.- №2. - С.125-128.
37. Давыдкин, Н.Ф. Применение физиотерапии в комплексном лечении переломов трубчатых костей / Н.Ф. Давыдкин // Физиотерапия, бальнеология и реабилитация. - 2013. - № 3. - С.27-34.
38. Даниченко, М.Ю. Разработка криогенной системы и инструментов для хирургии и терапии / М.Ю. Даниченко // Медицинская техника. - 2007. - №6. - С.24-27.
39. Дилевская, Е.В. Численное решение нелинейных задач теплопроводности / Е.В. Дилевская, И.В. Станкевич, А.А. Попков-Мелентьев // Вестник МАХ. - 2009. - №2. - С.29-33.
40. Дилевская, Е.В. Исследование тепловых режимов мощных полупроводниковых преобразователей энергии / Е.В. Дилевская, С.И. Каськов, А.И. Леонтьев // Вестник МАХ. - 2008. - №4. - С.34-38.

41. Драбкин, И.А. Использование термоэлектрического охлаждения для электронных чипов / И.А. Драбкин // Доклады IX Межгосударственного семинара «Термоэлектрики и их применение». - Санкт-Петербург, 2004. - С.157-162.
42. Дударев, Ю.И. Температурное поле термоэлектрических охлаждающих систем в двумерном нестационарном случае / Ю.И. Дударев, М.З. Максимов, Е.П. Сабо, Г.С. Хагба, С.Ю. Дударева // Доклады VIII Межгосударственного семинара «Термоэлектрики и их применение». - Санкт-Петербург, 2002. - С.131-136.
43. Дульнев, Г.Н. Теория тепло- и массообмена / Г.Н. Дульнев. - СПб.: СПбНИУИТМО, 2012. - 195 с.
44. Дульнев, Г.Н. Методы расчета теплового режима приборов / Г.Н. Дульнев, В.Г. Парфенов, А.В. Сигалов. - М.: Радио и связь, 1990. - 312 с.
45. Евдулов, О.В. Охлаждение и термостабилизация электронной аппаратуры на основе термоэлектрических модулей / О.В. Евдулов // Известия вузов. Приборостроение. - 2000. - т. 43, №5. - С.7-12.
46. Ежов, В.В. Физиотерапия и физиопрофилактика как методы и средства сохранения и восстановления здоровья / В.В. Ежов // Физиотерапия, бальнеология и реабилитация. - 2011. - № 4. - С.33-36.
47. Елисеев, В.Н. Теплообмен и тепловые испытания материалов и конструкций аэрокосмической техники при радиационном нагреве / В.Н. Елисеев, В.А. Товстоногов. - М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. - 396 с.
48. Захаржевский, С.Б. Расчет изделий электроники на механические и тепловые воздействия в САПР CREO / С.Б. Захаржевский, А.Е. Курносенко. - М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2013. - 56 с.
49. Заяков, В.П. Прогнозирование показателей надежности термоэлектрических охлаждающих устройств / В.П. Заяков, Л.А. Киншова, В.Ф. Моисеев. - Одесса: Политехперіодика, 2009. - 118 с.
50. Зубкова, С.М. Роль тепловой компоненты в лечебном действии физических факторов / С.М. Зубкова // Физиотерапия, бальнеология и реабилитация. - 2011. - № 6. - С.3-10.

51. Зуев, А.С. Разработка пассивных систем охлаждения элементов радиоэлектронной аппаратуры с внутренними источниками теплоты в составе текстильного отделочного оборудования / А.С. Зуев, Е.Е. Корочкина // Фундаментальные исследования. – 2014. - № 9. - С.516-520.
52. Исмаилов, Т.А. Термоэлектрические системы для термостабилизации малогабаритной радиоэлектронной аппаратуры / Т.А. Исмаилов, О.В. Евдулов // Холодильная техника. - 2002. - №8. - С.19-20.
53. Исмаилов, Т.А. Моделирование процессов теплообмена в термоэлектрическом устройстве для охлаждения радиоэлектронной аппаратуры / Т.А. Исмаилов, О.В. Евдулов // Известия вузов. Приборостроение. - 2002. - №7. - С.58-62.
54. Исмаилов, Т.А. Термостабилизирующие устройства для радиоэлектронной аппаратуры / Т.А. Исмаилов, О.В. Евдулов, Ш.А. Юсуфов, Г.И. Аминов // Вестник МАХ. - 2002. - № 3. - С.7-11.
55. Исмаилов, Т.А. Приборы для локального температурного воздействия на человеческий организм / Т.А. Исмаилов, О.В. Евдулов, Ш.А. Юсуфов, Г.И. Аминов // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки, Новочеркасск. - 2003. - №2. - С.3-6.
56. Исмаилов, Т.А. Методика расчета системы охлаждения электронных плат и микросборок / Т.А. Исмаилов, О.В. Евдулов // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. - 2003. - т.6, №3. - С.65-68.
57. Исмаилов, Т.А. Математическая модель полупроводникового термоэлектрического устройства для теплового воздействия на стопу человека / Т.А. Исмаилов, О.В. Евдулов, М.А. Хазамова // Известия вузов. Приборостроение. - 2004. - т. 47, № 7. - С.43-49.
58. Исмаилов, Т.А. Модель термоэлектрической системы для криотермоаппликации / Т.А. Исмаилов, О.В. Евдулов, М.А. Хазамова // Вестник МАХ. - 2003. - № 3. - С.16-18.
59. Исмаилов, Т.А. Оптимизация способа подбора ветвей термоэлементов по максимальной термодинамической эффективности / Т.А. Исмаилов, О.В.

Евдулов, М.Г. Вердиев // Вестник Международной академии холода. - 2006. - № 3. - С.13-16.

60. Исмаилов, Т.А. Расчет теплового поля и поля термомеханических напряжений сильноточного термоэлемента слоистой конструкции / Т.А. Исмаилов, О.В. Евдулов, Д.В. Евдулов // Вестник МАХ. - 2008. - №4. - С.28-34.

61. Исмаилов, Т.А. Исследование системы охлаждения элементов радиоэлектронной аппаратуры, работающих в режиме повторно-кратковременных тепловыделений / Т.А. Исмаилов, О.В. Евдулов, М.М. Махмудова, Д.В. Евдулов // Известия вузов России. Радиоэлектроника. - 2008. - № 5. - С.52-59.

62. Исмаилов, Т.А. Проектирование сильноточных термоэлектрических батарей для холодильных установок средней мощности / Т.А. Исмаилов, О.В. Евдулов, Д.В. Евдулов, М.Г. Вердиев // Холодильная техника. - 2009. - №1. - С.26-28.

63. Исмаилов, Т.А. Расчет температурного поля зоны человеческого организма при локальном тепловом воздействии устройством на базе полупроводниковых термоэлектрических преобразователей / Т.А. Исмаилов, О.В. Евдулов, М.А. Хазамова // Вестник МАХ. - 2010. - № 1. - С.40-44.

64. Исмаилов, Т.А. Экспериментальный стенд для исследования системы неравномерного охлаждения электронных плат / Т.А. Исмаилов, О.В. Евдулов, И.А. Габитов // Ползуновский вестник. - 2011. - №3. - С.148-151.

65. Исмаилов, Т.А. Математическая модель термоэлектрической системы для локального теплового воздействия на руку человека / Т.А. Исмаилов, О.В. Евдулов, М.А. Хазамова, Р.А.-М. Магомадов // Термоэлектричество. - 2014. - № 1. - С.77-86.

66. Исмаилов, Т.А. Системы охлаждения элементов радиоэлектронной аппаратуры, работающих в режиме повторно-кратковременных тепловыделений / Т.А. Исмаилов, О.В. Евдулов, Д.В. Евдулов. - Махачкала: ИПЦ ДГТУ, 2014. - 120 с.

67. Исмаилов, Т.А. Результаты теоретических исследований системы охлаждения элементов РЭА, работающих в режиме повторно-кратковременных тепловыделений / Т.А. Исмаилов, О.В. Евдулов, Д.В. Евдулов // Термоэлектричество. - 2015. - № 6. - С.74-87.
68. Исмаилов, Т.А. Исследование термоэлектрической системы для локального замораживания тканей гортани / Т.А. Исмаилов, О.В. Евдулов, Т.А. Рагимова // Термоэлектричество. - 2015. - № 2. - С.86-94.
69. Исмаилов, Т.А. Системы отвода теплоты от элементов РЭА на базе плавящихся тепловых аккумуляторов / Т.А. Исмаилов, О.В. Евдулов, Д.В. Евдулов // Вестник ДГТУ. Технические науки. - 2015. - № 36. - С.38-44.
70. Исмаилов, Т.А. Термоэлектрическая система для проведения тепловых косметологических процедур на лице / Т.А. Исмаилов, О.В. Евдулов, У.И. Абдулхакимов, Д.В. Евдулов // Медицинская техника. - 2017. - №4. - С.38-42.
71. Исмаилов, Т.А. Системы охлаждения радиоэлектронной аппаратуры с использованием плавящихся тепловых аккумуляторов / Т.А. Исмаилов, О.В. Евдулов, Д.В. Евдулов, И.А. Габитов. - Махачкала: ИПЦ ДГТУ, 2018. - 100 с.
72. Каладзе, Н.Н. Влияние грязевых аппликаций и биорезонансной вибростимуляции на структурно-функциональное состояние эндотелия сосудов у экспериментальных животных с адьювантным артритом / Н.Н. Каладзе, А.К. Загорулько, Е.В. Сарчук // Физиотерапия, бальнеология и реабилитация. - 2013. - № 1. - С.14-19.
73. Камышная, Э.Н. Конструкторско-технологические расчеты электронной аппаратуры / Э.Н. Камышная, В.В. Маркелов, В.А. Соловьев. - М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. - 165 с.
74. Карташов, Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел / Э.М. Карташов. - М.: Высшая школа, 2001. - 550 с.
75. Касиян, А.И. Органические термоэлектрические материалы: современный уровень и перспективы / А.И. Касиян, И.И. Сандуляк // Термоэлектричество. – 2017. - №2. - С.11-20.

76. Кондратьев, Г.М. Прикладная физика. Теплообмен в приборостроении / Г.М. Кондратьев, Г.Н. Дульнев, Е.С. Платунов, Н.А. Ярышев . - СПб.: ГУИТМО, 2003. - 560 с.
77. Крищук, В.Н. Оптимизация оребренного канала в системах принудительного воздушного охлаждения / В.Н. Крищук, Г.Н. Шило, Н.А. Каспирович, Е.В. Огренич // Радиоэлектроника и телекоммуникации. - 2014. - №2. - С.34-37.
78. Кудрявцева, Н.С. Основы проектирования эффективных систем терморегулирования космических аппаратов / Н.С. Кудрявцева. - М.: МАИ, 2012. - 226 с.
79. Кузнецов, О.Ф. Криомассаж – эффективная технология восстановительной терапии / О.Ф. Кузнецов // Физиотерапия, бальнеология и реабилитация. - 2003. - № 5. - С.39-46.
80. Кузнецов, Г.В. Численное моделирование температурных полей узлов и блоков радиоэлектронной аппаратуры и электронной техники / Г.В. Кузнецов, М.А. Шеремет // Микроэлектроника. - 2009. - т. 38, №5. - С.344-352.
81. Кузнецов, Г.В. О возможности регулирования тепловых режимов типичного элемента радиоэлектронной аппаратуры или электронной техники с локальным источником тепла за счет естественной конвекции / Г.В. Кузнецов, М.А. Шеремет // Микроэлектроника. - 2010. - т. 39, №6. - С.452-467.
82. Лапп, С.К. Лечебные ванны и тепловые процедуры / С.К. Лапп. - М.: Феникс, 2004. - 155 с.
83. Лебедев, Ю.А. Исследование и разработка термоэлектрических теплообменных аппаратов / Ю.А. Лебедев, А.А. Арутюнян // Морской вестник. - 2014. - № 1 (49). - С.55-58.
84. Малкович, Б.Е.-Ш. Термоэлектрические модули на основе сплавов теллурида висмута / Б.Е.-Ш. Малкович // Доклады XI Межгосударственного семинара «Термоэлектрики и их применение». - Санкт-Петербург, 2008. - С.462-468.



85. Малкович, Б.Е.-Ш. Термоэлектрические охлаждающие приборы в медицине / Б.Е.-Ш. Малкович // Термоэлектрики и их применение Сб. докладов VII Межгосударственного семинара. - СПб: ФТИ РАН им. А.Ф.Иоффе, 2000. - С.343-348.
86. Макарова, Е.М. Физиотерапевтические факторы в комплексном восстановительном лечении военнослужащих с огнестрельными переломами нижних конечностей / Е.М. Макарова, И.Е. Юсупов, Э.А. Махмудов, И.В. Харламова, Е.В. Филатова, М.Ю. Герасименко // Физиотерапия, бальнеология и реабилитация. - 2008. - № 4. - С.18-21.
87. Марков, О.И. Предельные возможности низкотемпературного термоэлектрического охлаждения / О.И. Марков // Доклады XI Межгосударственного семинара «Термоэлектрики и их применение». - Санкт-Петербург, 2008. - С.54-63.
88. Мартюшев, С.Г. Два фактора, влияющие на интенсивность охлаждения тепловыделяющих элементов в герметичных блоках / С.Г. Мартюшев, М.А. Шеремет // Микроэлектроника. - 2014. - т.43, № 5. - С.390-398.
89. Новицкий, В.П. Оценка погрешности результатов измерений / В.П. Новицкий, И.А. Зорграф. - Л.: Энергоатомиздат, 1991. - 304 с.
90. Парахин, А.С. Расчет и исследование термоэлектрических охладителей / А.С. Парахин, В.Л. Налетов - Курган: КГУ, 2001. - 133 с.
91. Пат. 2229757 Рос. Федерация: МПК<sup>7</sup> H01L 23/36, H05K 7/20, Устройство для нагрева и охлаждения радиоэлектронной аппаратуры / Таланин Ю.В., № 2002120762; заявл. 29.07.2002; опубл. 27.05.2004, Бюл. № 15 - 4 с.
92. Пат. 2240478 Рос. Федерация: МПК<sup>7</sup> F25B 21/02, Термоэлектрическое устройство для контактного охлаждения поверхностей / Таланкин В.П., Таланкин В.В., № 2003109599; заявл. 04.04.2003; опубл. 10.09.2003, Бюл. № 25 - 6 с.
93. Пат. 2234907 Рос. Федерация: МПК<sup>7</sup> A 61 H 39/06, A 61 F 7/00, Устройство для термопунктуры / Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., № 2001131048; заявл. 16.11.2001; опубл. 27.08.2004, Бюл. № 24 - 4 с.

94. Пат. 2245693 Рос. Федерация: МПК<sup>7</sup> А61F 7/00, Полупроводниковое термоэлектрическое устройство для локального температурного воздействия на стопу человека / Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Аминов Г.И., Хазамова М.А., № 2002125785; заявл. 27.09.2002; опубл. 10.02.2005, Бюл. № 4 - 5 с.

95. Пат. 2245694 Рос. Федерация: МПК<sup>7</sup> А61F 7/00, Полупроводниковое термоэлектрическое устройство для локального температурного воздействия на стопу человека / Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Аминов Г.И., Хазамова М.А., Зарат А., № 2002125786; заявл. 27.09.2002; опубл. 10.02.2005, Бюл. № 4 - 5 с.

96. Пат. 2269184 Рос. Федерация: МПК<sup>7</sup> Н01L 35/28, Термоэлектрическая батарея / Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Вердиев М.Г., Меркухин Н.Е., № 2003134615; заявл. 28.11.2003; опубл. 27.01.2006, Бюл. № 3 - 5 с.

97. Пат. 2269183, Рос. Федерация: МПК<sup>7</sup> Н01L 35/28, Термоэлектрическая батарея / Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Вердиев М.Г., Меркухин Н.Е., № 2003134614; заявл. 28.11.2003; опубл. 27.01.2006, Бюл. № 3 - 5 с.

98. Пат. 2270495, Рос. Федерация: МПК<sup>7</sup> Н01L 35/28, Способ обеспечения функционирования термоэлектрической батареи / Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Вердиев М.Г., № 2003134613; заявл. 28.11.2003; опубл. 20.02.2006, Бюл. № 5 - 5 с.

99. Пат. 2280919, Рос. Федерация: МПК<sup>7</sup> Н01L 35/28, Термоэлектрическая батарея / Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Вердиев М.Г., № 2004112475; заявл. 23.04.2004; опубл. 27.07.2006, Бюл. № 21 - 5 с.

100. Пат. 2282274, Рос. Федерация: МПК<sup>7</sup> Н01L 35/28, Термоэлектрическая батарея / Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Вердиев М.Г., № 2004118468; заявл. 18.06.2004; опубл. 20.08.2006, Бюл. № 23 - 5 с.

101. Пат. 2282277, Рос. Федерация: МПК<sup>7</sup> Н01L 35/28, Термоэлектрическая батарея / Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Вердиев М.Г., № 2004118465; заявл. 18.06.2004; опубл. 20.08.2006, Бюл. № 23 - 5 с.

102. Пат. 2289869, Рос. Федерация: МПК<sup>7</sup> H01L 35/28, Термоэлектрическая батарея / Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Вердиев М.Г., № 2004112476; заявл. 23.04.2004; опубл. 20.12.2006, Бюл. № 35 - 5 с.

103. Пат. 2289869, Рос. Федерация: МПК<sup>7</sup> H05K 7/20, Охладитель силовых электронных модулей / Саленко С.Д., Кураев А.А., Зорин В.Б., Колоколкин Ю.Г., Коссов В.С., Киржнер Д.Л., № 2004126885; заявл. 06.09.2004; опубл. 10.04.2006, Бюл. № 10 - 5 с.

104. Пат. 2306494, Рос. Федерация: МПК<sup>7</sup> F24H 7/00, Теплоаккумулирующее устройство / Алексеев В.А., Чукин В.Ф., № 2005138820; заявл. 14.12.2005; опубл. 20.09.2007, Бюл. № 26 - 7 с.

105. Пат. 2313048, Рос. Федерация: МПК<sup>7</sup> F25B 21/02, F25D 19/00, Холодильник / Бабичев И.А., № 2006111565; заявл. 10.04.2006; опубл. 20.12.2007, Бюл. № 35 - 4 с.

106. Пат. 2319327, Рос. Федерация: МПК<sup>7</sup> H05K 7/20, H01L 23/34, G06F 1/20 Устройство для охлаждения электронных блоков / Каландаришвили А.Г. и др., № 2006132570; заявл. 12.09.2006; опубл. 10.03.2008, Бюл. № 7 - 5 с.

107. Пат. 2301510, Рос. Федерация: МПК<sup>7</sup> H05K 7/20 Система охлаждения элементов радиоэлектронной аппаратуры / Глушко В.М., Шубенцев А.В., Цыганюк С.В., № 2005123253; заявл. 21.07.2005; опубл. 20.06.2007, Бюл. № 17 - 6 с.

108. Пат. 2334378, Рос. Федерация: МПК<sup>7</sup> H05K 7/20 Устройство охлаждения элементов тепловыделяющей аппаратуры / Коченков А.Г., Лопатин А.А., Щелчков А.В., Яковлев А.Б., Осипова В.И., № 2007119508; заявл. 16.05.2007; опубл. 20.09.2008, Бюл. № 26 - 7 с.

109. Пат. 2315250, Рос. Федерация: МПК<sup>7</sup> F25B 21/02 Термоэлектрическое устройство повышенной эффективности с использованием тепловой изоляции / Белл Л., № 2003124958; заявл. 07.02.2002; опубл. 20.01.2008, Бюл. № 2 - 57 с.

110. Пат. 2325731, Рос. Федерация: МПК<sup>7</sup> H01L 35/28, H01L 35/34 Термоэлектрический модуль и способ его изготовления / Шматок Ю.И., № 2006129357; заявл. 14.08.2006; опубл. 27.05.2008, Бюл. № 15 - 12 с.

111. Пат. 2325896, Рос. Федерация: МПК<sup>7</sup> A61H 33/08, A61F 7/00, A61H 39/06 Устройство теплового воздействия на кожные покровы пациента / Баранов В.М. и др., № 2006122445; заявл. 26.06.2006; опубл. 10.06.2008, Бюл. № 16 - 10 с.

112. Пат. 2328663, Рос. Федерация: МПК<sup>7</sup> F25B 21/02 Неравновесная термоэлектрическая система для охлаждения и нагрева / Бэл Л., № 2004122111; заявл. 04.03.2002; опубл. 10.07.2008, Бюл. № 19 - 29 с.

113. Пат. 2335036, Рос. Федерация: МПК<sup>7</sup> H01L 35/28, Термоэлектрическая батарея / Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Вердиев М.Г., Евдулов Д.В., № 2006119714; заявл. 05.06.2006; опубл. 27.09.2008, Бюл. № 27 - 4 с.

114. Пат. 2334381, Рос. Федерация: МПК<sup>7</sup> H05K 7/20, Охладитель радиоэлектронной аппаратуры / Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Махмудова М.М., Габитов И.А., № 2007127166; заявл. 16.07.2007; опубл. 20.09.2008, Бюл. № 26 - 5 с.

115. Пат. 2334380, Рос. Федерация: МПК<sup>7</sup> H05K 7/20, Устройство для отвода теплоты от элементов радиоэлектронной аппаратуры / Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Махмудова М.М., № 2007126788; заявл. 12.07.2007; опубл. 20.09.2008, Бюл. № 26 - 5 с.

116. Пат. 2341833, Рос. Федерация: МПК<sup>7</sup> G12B 15/00, H01L 23/433, H05K 7/20, Устройство для охлаждения и термостабилизации элементов РЭА, работающих при циклических тепловых воздействиях / Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Габитов И.А., Махмудова М.М., № 2007127115; заявл. 16.07.2007; опубл. 20.12.2008, Бюл. № 35 - 5 с.

117. Пат. 2327237, Рос. Федерация: МПК<sup>7</sup> G12B 15/00, H05K 7/20, Система воздушного охлаждения / Москаленко С.В., Малышев В.А., № 2006111537; заявл. 07.04.2006; опубл. 20.06.2008, Бюл. № 17 - 6 с.

118. Пат. 2319326, Рос. Федерация: МПК<sup>7</sup> H05K 7/20, Устройство для охлаждения и термостабилизации элементов радиоэлектронной аппаратуры, работающих при циклических тепловых воздействиях / Исмаилов Т.А., Габитов И.А., Евдулов О.В., Вердиев М.Г., № 2005112475; заявл. 25.04.2005; опубл. 10.03.2008, Бюл. № 7 - 5 с.

119. Пат. 2373919, Рос. Федерация: МПК<sup>7</sup> A61H 39/06, Устройство для термопунктуры / Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., № 2005137274; заявл. 30.11.2005; опубл. 27.11.2009, Бюл. № 33 - 6 с.

120. Пат. 2345911, Рос. Федерация: МПК<sup>7</sup> B60N 2/56, Кресло с системой терморегуляции / Лапковский А.Я., Кузнецов А.А., Винокуров А.В., № 2007131840; заявл. 22.08.2007; опубл. 10.02.2009, Бюл. № 4 - 8 с.

121. Пат. 2346884, Рос. Федерация: МПК<sup>7</sup> B67D 1/08, F25B 21/02, Аппарат и бочонок для разлива алкогольных напитков с системой охлаждения / Воте А. и др., № 2005120633; заявл. 25.11.2003; опубл. 20.02.2009, Бюл. № 5 - 13 с.

122. Пат. 2351104, Рос. Федерация: МПК<sup>7</sup> H05K 7/20, Устройство для отвода тепла от элементов радиоэлектронной аппаратуры с повторно-кратковременными тепловыделениями / Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Махмудова М.М., № 2008101950; заявл. 18.01.2008; опубл. 27.03.2009, Бюл. № 9 - 4 с.

123. Пат. 2351105, Рос. Федерация: МПК<sup>7</sup> H 05 K 7/20, Устройство для отвода теплоты от элементов радиоэлектронной аппаратуры с повторно-кратковременными тепловыделениями / Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Махмудова М.М., № 2008101952; заявл. 18.01.2008; опубл. 27.03.2009, Бюл. № 9. - 4 с.

124. Пат. 2355958, Рос. Федерация: МПК<sup>7</sup> F25B 21/04, H01L 35/02, H01L 35/30, Компактные высокоэффективные термоэлектрические системы / Белл Л., № 2005108566; заявл. 07.08.2003; опубл. 20.05.2009, Бюл. № 14 - 32 с.

125. Пат. 2358357, Рос. Федерация: МПК<sup>7</sup> H01L 35/28, Термоэлектрическое устройство / Штерн Ю.И. и др., № 2007134623; заявл. 18.09.2007; опубл. 10.06.2009, Бюл. № 16 - 12 с.

126. Пат. 2364803, Рос. Федерация: МПК<sup>7</sup> F25B 21/02, Термоэлектрический модуль / Штерн Ю.И. и др., № 2007134625; заявл. 18.09.2007; опубл. 20.08.2009, Бюл. № 23 - 10 с.

127. Пат. 2365071, Рос. Федерация: МПК<sup>7</sup> H05K 7/20, Устройство для охлаждения электронных плат / Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Евдулов Д.В., Агаев М.У., № 2008129473; заявл. 17.07.2008; опубл. 27.08.2009, Бюл. № 24. - 5 с.

128. Пат. 2366127, Рос. Федерация: МПК<sup>7</sup> H05K 7/20, Устройство для охлаждения электронных плат / Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Евдулов Д.В., № 2008129471; заявл. 17.07.2008; опубл. 27.08.2009, Бюл. № 24. - 5 с.

129. Пат. 2366129, Рос. Федерация: МПК<sup>7</sup> H05K 7/20, Охладитель радиоэлектронной аппаратуры / Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Махмудова М.М., № 2008129508; заявл. 17.07.2008; опубл. 27.08.2009, Бюл. № 24. - 5 с.

130. Пат. 2374792, Рос. Федерация: МПК<sup>7</sup> H05K 1/00, H05K 7/20, Радиоэлектронный блок и способ его охлаждения / Кузин Г.Н., Полутов А.Г., Краснов М.А., Смирнов П. В., № 2008119387; заявл. 16.05.2008; опубл. 27.11.2009, Бюл. № 33. - 9 с.

131. Пат. 2386226, Рос. Федерация: МПК<sup>7</sup> H05K 7/20, Устройство для отвода тепла от тепловыделяющих систем (варианты) / Бурдин С.Г., № 2008151915; заявл. 29.12.2008; опубл. 10.04.2010, Бюл. № 10. - 15 с.

132. Пат. 2379790, Рос. Федерация: МПК<sup>7</sup> H01L 35/28, Термоэлектрическая батарея / Исмаилов Т.А., Евдулов Д.В., Евдулов О.В., № 2008150718; заявл. 22.12.2008; опубл. 20.01.2010, Бюл. № 2 - 7 с.

133. Пат. 2379789, Рос. Федерация: МПК<sup>7</sup> H01L 35/28, Термоэлектрическая батарея / Исмаилов Т.А., Евдулов Д.В., Евдулов О.В., Хазамова М.А., № 2008150802; заявл. 22.12.2008; опубл. 20.01.2010, Бюл. № 2 - 6 с.

134. Пат. 2388105, Рос. Федерация: МПК<sup>7</sup> H01J 45/00, H01L 35/00, Термоэлектрический преобразователь / Ключник В.Н., № 2009101058; заявл. 14.01.2009; опубл. 27.04.2010, Бюл. № 12 - 7 с.

135. Пат. 2417790, Рос. Федерация: МПК<sup>7</sup> А61Н 15/02, Способ безмедикаментозного обезболивания хронической боли опорно-двигательного аппарата человека / Кузнецов О.Ф., Кузнецов М.О., № 2009139486; заявл. 27.10.2009; опубл. 10.05.2011, Бюл. № 13 - 6 с.

136. Пат. 2429026, Рос. Федерация: МПК<sup>7</sup> А61М 21/00, А61F 13/02, Способ оздоровления и омоложения кожи / Шушарджан С.В. Сагателова К.П., Шушарджан Р.С., № 2008152205; заявл. 29.12.2008; опубл. 20.09.2011, Бюл. № 26 - 11 с.

137. Пат. 2429890, Рос. Федерация: МПК<sup>7</sup> А61N 5/067, Способ управления температурой поверхностного слоя кожи и подкожных слоев биоткани / Журба В.М., Митькин В.М., № 2010102825; заявл. 26.01.2010; опубл. 27.09.2011, Бюл. № 27 - 11 с.

138. Пат. 2425297, Рос. Федерация: МПК<sup>7</sup> F24H 7/02, Теплообменник / Алексеев В.А., № 2010102825; заявл. 16.03.2010; опубл. 27.07.2011, Бюл. № 21 - 9 с.

139. Пат. 2456783, Рос. Федерация: МПК<sup>7</sup> H05K 9/00, H05K 7/20, H05K 5/04, Экранированный корпус прибора с охлаждением / Дворецков А.М., Кардаш И.В., Кольчева Т.Н., № 2011112208; заявл. 30.03.2011; опубл. 20.07.2012, Бюл. № 20 - 11 с.

140. Пат. 2454196, Рос. Федерация: МПК<sup>7</sup> А61В 18/02, Способ выполнения криохирургических операций / Павлов В.Н., Малинин Н. Н., Семенова О.П., № 2007146901; заявл. 20.12.2007; опубл. 27.06.2012, Бюл. № 18 - 4 с.

141. Пат. 2528392, Рос. Федерация: МПК<sup>7</sup> H01L 23/38, H01L 23/373, Устройство охлаждения ИС / Зенин В.В., Колбенков А.А., Стоянов А.А., Шарпов Ю.В., № 2013109250; заявл. 01.03.2013; опубл. 20.09.2014, Бюл. № 26 - 10 с.

142. Пат. 2563450, Рос. Федерация: МПК<sup>7</sup> А61Н 33/12, Устройство туманообразователя для ухода за лицом / Чэнь Синь, Спренгерс Бьерн, Ха Ван Кей Рики, Ту Дзявэнь, № 2012156161; заявл. 23.05.2011; опубл. 20.09.2015, Бюл. № 26 - 17 с.

143. Пат. 2562509, Рос. Федерация: МПК<sup>7</sup> А61F 7/00, Н01L 35/28, F25B 21/02, Термоэлектрическое устройство для косметологических процедур на лицо человека / Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Хазамова М.А., Евдулов Д.В., Абдулхакимов У.И., Ахмедов Б.И., № 2014100200; заявл. 09.01.2014; опубл. 10.09.2015, Бюл. № 25 - 5 с.

144. Пат. 2562507, Рос. Федерация: МПК<sup>7</sup> А61F 7/00, Н01L 35/28, F25B 21/02, Термоэлектрическое устройство для косметологических процедур на лицо человека / Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Хазамова М.А., Евдулов Д.В., Абдулхакимов У.И., Камилова З.А., № 2014100201; заявл. 09.01.2014; опубл. 10.09.2015, Бюл. № 25 - 5 с.

145. Пат. 2604097, Рос. Федерация: МПК<sup>7</sup> Н05К 7/20, Теплоотводящее основание радиоэлектронного блока / Васильев А.В., Задорожный В.В., Ларин А.Ю., Омельчук И.С., Пойменов Д.Ю., Чернышев М.И., № 2015117505; заявл. 07.05.2015; опубл. 10.12.2016, Бюл. № 34 - 9 с.

146. Пат. 2576083, Рос. Федерация: МПК<sup>7</sup> А61Н 7/00, Способ повышения эффективности процедур косметического ухода за кожей / Фаустова Е.Е., № 2015104544, заявл. 11.02.2015; опубл. 27.02.2016, Бюл. № 6 - 15 с.

147. Пат. 2572451, Рос. Федерация: МПК<sup>7</sup> А61В 18/02, F25B 21/02, Криохирургический аппарат / Леушин В.Ю., Бобрихин А.Ф., Гудков А.Г., Цыганов Д.И., № 2014133457; заявл. 14.08.2014; опубл. 10.01.2016, Бюл. № 1 - 8 с.

148. Пилипенко, Н. В. Решение прямых и обратных задач теплопроводности на основе дифференциально – разностных моделей / Н.В. Пилипенко, Д.А. Гладских // Известия вузов. Приборостроение. - 2007. - т. 50, № 3. - С.538-544.

149. Полевой, А.А. Низкотемпературные технологии / А.А. Полевой // Холодильная техника. - 2012. - № 1. - С.52-54.

150. Пономаренко, Г. Н. Биофизические основы физиотерапии / Г.Н. Пономаренко, И.И. Турковский. - М.: Медицина, 2006. - 176 с.



151. Портнов, В.В. Локальная воздушная криотерапия: механизм действия и применение в практике / В.В. Портнов // Курортные ведомости. - 2009. - №2. - С.25-31.
152. Прибыла, А.В. Физические модели индивидуального кондиционирования для человека / А.В. Прибыла // Термоэлектричество. - 2016. - № 1. - С.18-44.
153. Сазонов, В.С. Неидеально-контактная задача нестационарной теплопроводности для двух полупространств / В.С. Сазонов // Инженерно-физический журнал. -2008. - №2. - С.373-383.
154. Самарский, А.А. Вычислительная теплопередача / А.А. Самарский, П.М. Вабшцевич. - М: Едиториал УРСС. - 2003. - 784 с.
155. Семенюк, В.А. Повышение надежности термоэлектрических охладителей / В.А. Семенюк, А.В. Антоненко // Термоэлектричество. - 2007. - № 4. - С.80-88.
156. Сергиенко, О.И. Экологические аспекты термоэлектрического охлаждения / О.И. Сергиенко, Л.П. Булат, С.Е. Копыльцова, В.А. Староверова, М.Е. Гужва, А.С. Виноградов // Термоэлектричество. - 2010. - № 4. - С.5-10.
157. Стефанюк, Е.В. Дополнительные граничные условия в нестационарных задачах теплопроводности / Е.В. Стефанюк, В.А. Кудинов // Теплофизика высоких температур. - 2009. - №2. - С.269-282.
158. Струтинский, М.Н. Компьютерные технологии в термоэлектричестве / М.Н. Струтинский // Термоэлектричество. - 2009. - № 4. - С.32-48.
159. Сулин А.Б. Термоэлектрические системы охлаждения. Анализ потерь и пути повышения эффективности / А.Б. Сулин // Холодильная техника. - 2009. - №8. - С.36-39.
160. Сулин, А.Б. Анализ энергетических характеристик комбинированных компрессионно-термоэлектрических систем охлаждения / А.Б. Сулин, И.Н. Богомоллов // Вестник МАХ. - 2009. - №1. - С.38-40.
161. Сушко, В. Ю. Метод выбора параметров многослойной защиты электронного устройства от мощного теплового воздействия / В.Ю. Сушко,

- В.А. Кораблев, А.В. Шарков // Известия вузов. Приборостроение. - 2006. - т. 49, № 3. - С.64-70.
162. Такенобу, Кадзикава Новейшие разработки в области технологии термоэлектрического генерирования электроэнергии в Японии / Кадзикава Такенобу, Фунаками Риодзи // Термоэлектричество. - 2016. - № 1. - С.5-17.
163. Тахистов, Ф. Ю. Методика расчета термоэлектрического термостата с неизотермической камерой / Ф.Ю. Тахистов // Известия вузов. Приборостроение. - 2007. - т. 50, № 1. - С.67-72.
164. Теория теплообмена / Под. ред. А.И. Леонтьева. - М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. - 464 с.
165. Трофимов, В.Е. Теплоаккумулирующая панель для поддержания микроклимата в помещении с радиоэлектронным оборудованием / В.Е. Трофимов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. - 2017. - № 3. - С.36-39.
166. Ушаков, Б.Н. Напряжения в композитных конструкциях / Б.Н. Ушаков, И.П. Фролов. - М.: Машиностроение, 2001. - 134 с.
167. Ушаков, А.А. Практическая физиотерапия / А.А. Ушаков. - М.: ООО Медицинское информационное агентство, 2009. - 612 с.
168. Физическая реабилитация / Под общей ред. проф. Попова С.Н. - Ростов н/Д.: Феникс, 2005. - 608 с.
169. Филин, С.О. Современное состояние и перспективы разработки и производства стационарных термоэлектрических холодильников / С.О. Филин, Б. Закшевский // Термоэлектричество. - 2008. - № 2. - С.74-88.
170. Филин, С.О. Сравнительный анализ энергетических характеристик современных термоэлектрических холодильников / С.О. Филин // Термоэлектричество. - 2017. - №6. - 67-76.
171. Ходарев, Н.В. Влияние общей воздушной криотерапии на антиоксидантный статус крови / Н.В. Ходарев, Н.Л. Жемчужнова, Е.В. Олемпиева, М.Н. Жинко, С.Г. Нешин // Физиотерапия, бальнеология и реабилитация. - 2012. - № 1. - С.32-35.

172. Цветков, О.Б. Глобальные проблемы холодильной техники / О.Б. Цветков, Ю.А. Лаптев // Вестник МАХ. - 2007. - №1. - С.3-4.
173. Черепанов, В.П. Защита радиоэлектронной аппаратуры от перегрузок / В.П. Черепанов, Е.И. Посысаев. - М.: РадиоСофт, 2015. - 216 с.
174. Шеремет, М.А. К вопросу о пассивном охлаждении герметичных элементов радиоэлектронной аппаратуры и электронной техники / М.А. Шеремет // Микроэлектроника. - 2013. - т. 42, № 6. - С.472-480.
175. Ши, Д. Численные методы в задачах теплообмена / Д. Ши. Пер. с англ. - М.: Мир, 1988. - 544 с.
176. Шило, Г.Н. Проектирование радиаторов с оптимальными массогабаритными параметрами / Г.Н. Шило, Н.П. Гапоненко, Е.В. Огренич // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. - 2011. - №1-2. - С.30-33.
177. Шучитангшу, Чаттерджи Термоэлектричество по индийскому сценарию / Чаттерджи Шучитангшу // Термоэлектричество. – 2016. - №6. - С.5-21.
178. Alekseev, V.A. Study of the heat exchange processes in heat storages with shape-stable composite phase-transitional materials / V.A. Alekseev, A.E. Karabin // Materials VII International seminar «Heat pipes, heat pumps, refrigeration, power sources». -Minsk, 2008. - P.360-366.
179. Bergman, T.L. Fundamentals of heat and mass transfer / T.L. Bergman, A.S. Lavine, F.P. Incropera, D.P. Dewitt. - New York: John Wiley & Sons, 2011. - 1076 p.
180. Chen, Y.-M., Thermal performance of sintered miniature heat pipes / Y.-M. Chen, S.-C. Wu, C.-I. Chu // Heat and mass transfer. - 2001. - №37. - P.611-612.
181. Etemoglu, A.B. A brief survey and economical analysis of air cooling for electronic equipment / A.B. Etemoglu // International communication in heat and mass transfer. - 2007. - v.34. - P.103-113.
182. Ginsburg, G.S. Personalized medicine: Revolutionizing drug discovery and patient care / G.S. Ginsburg, J.J. McCarthy // Trends biotechnol. - 2001. - №. 19. - P.491-496.

183. Filin, S.O. Modern state and prospects of development and production of stationary thermoelectric refrigerators / S.O. Filin, B. Zakrzewski // Journal of thermoelectricity. - 2008. - №2. - P.71-84.

184. Hamouche, A. Mixed convection air cooling of protruding heat source mounted in horizontal channels / A. Hamouche, R. Bessaih // International communication in heat and mass transfer. - 2009. - v.36. - P.4291-4302.

185. <http://www.crystalltherm.com>.

186. <http://ite.inst.cv.ua>.

187. <http://thermointech.ru>.

188. [http://www.komatsu\\_electronics.co.jp](http://www.komatsu_electronics.co.jp).

189. <http://www.kryotherm.spb.ru>.

190. <http://www.rifcorp.ru>.

191. <http://www.marlow.com>.

192. <http://www.termiona.ru>.

193. <http://www.melcor.com>.

194. <http://www.osterm.ru>.

195. <http://www.adv-engineering.ru>.

196. <http://www.rusnano.com/projects/portfolio/rmt>.

197. <http://www.thermat.jp>.

198. Hua, Zhang Effect of Chinese tuina massage therapy on resting state brain functional network of patients with chronic neck pain / Zhang Hua, Chen Hong, Wang Hao, Li Duoduo, Jia Baolin, Tan Zhongjian, Zheng Bin, Weng Zhiwen // Journal of traditional Chinese medical sciences. - 2015. - №2. - P.60-68.

199. Hyoung-Seuk, Choi Prediction of reliability on thermoelectric module through accelerated life test and physics - of - failure / Choi Hyoung-Seuk // Electronic materials letter. - 2011. - №7. - P.175-182.

200. Krukowska, Jolanta Impact of magneto stimulation on nerve and muscle electrical excitability in patients with increased muscle tone / Jolanta Krukowska, Adam Lukasiak, Jan Czernicki // Polish annals of medicine. - 2012 - №19. - P.15-20.

201. Jugel, A. Transport equation for semiconductors / A. Jugel. - Heidelberg: Springer, 2009. - 315 p.
202. Nagase, K. Development of durability testing for thermoelectric power generation module / K. Nagase, A. Yamamoto // Journal of Kinzoku materials science and technology. - 2016.- №3. - P.1347-1364.
203. Korzhuev, M.A. Non-standard Harman response at the separate measurement of stages of multicascade thermoelectric modules / M.A. Korzhuev, E.S. Avilov, I. YU. Nichezina // JEMS. - 2011. - v. 40, №5. - P.733-737.
204. Korzhuev, M.A. Thermoelectric nanostructures: pros and cons / M.A. Korzhuev // Thermoelectricity. - 2013. - №5. - P.10-21.
205. Lobunets, Y.M. Performance analysis of heat-exchange type thermoelectric generator / Y.M. Lobunets // Journal of thermoelectricity. - 2014. - №1. - P.52-58.
206. Lobunets, Y.M. Criteria for performance evaluation of thermoelectric energy converter / Y.M. Lobunets // Journal of thermoelectricity. - 2014. - №2. - P.65-78.
207. Madhusudhana, Rao G. Laminar conjugate mixed convection in a vertical channels with heat generating components / G. Madhusudhana Rao., G.S. Narasimham // International communication in heat and mass transfer. - 2007. - v.50. P.51-62.
208. Markov, O.I. On optimization of the charge carrier concentration in a cooling thermoelectric branch / O.I. Markov // Technical physics. – 2005. – v. 50, №6. - P.805-806.
209. Miroslav, Savic Actual temperature during and thermal response after whole-body cryotherapy in cryo-cabin / Savic Miroslav, Fonda Borut, Sarabon Nejc // Journal of thermal biology. - 2013. - № 38. - P.186-191.
210. Toshima, N. Thermoelectric performance of organic materials including hybrid system / N. Toshima // Journal of Kinzoku materials science and technology. - 2016. - №3. - P.103-109.

211. Patent KR 20100060222 (A) Device for skin beauty and medical treatment / Gim Yang Soo, 2010.
212. Patent JP 2012152307 (A) Beauty appliance / Hitachi Maxell, 2012.
213. Patent JP 2006130055 (A) Cryotherapy apparatus by Peltier module / element and temperature control method for cryotherapy by Peltier module element / Maruyama Shigenao, Yamaya Tomoyuki, Alba Setsuya, 2006.
214. Patent KR 20130043299 (A) Medical skin beauty care apparatus for heating and stimulating skin using thermoelectric module and ultra-sonic vibrator / Kim Ki Tae, 2013.
215. Patent KR 20010077967 (A) Facial treatment implement / Shimizu Hirohisa, 2001.
216. Patent CN 1640370 (A) Beauty cover / Myong Ha Kim, 2005.
217. Patent KR 20120090862 (A) An apparatus for hot and cold therapy which utilizes thermoelectric module / Kang Sung Mo, 2012.
218. Patent US 6311497 Device for cold and warm formentations / Young-Chun Chung, 2001.
219. Patent WO 2013164820 (A1) Cryocatheter with coolant fluid cooled thermoelectric module / Berger Avi, Hazan Avri, 2013.
220. Patent DE 10147563 Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen / Maurer Marcus, 2003.
221. Patent US 7037326 Skin cooling device using thermoelectric element / Hee-Young Lee, 2006.
222. Ping, Y. Approach on thermoelectricity realibility of board - level backplane based on the orthogonal experiment design / Y. Ping // International journal of materials and structural integrity. - 2010. - №4. - P.170-185.
223. Rowe, D.M. Thermoelectrics and its energy harvesting, materials, preparation and characterization / D.M. Rowe. - BocaRaton: CRC Press. - 2012. - 567 p.
224. Snarskii A.A., Bulat L.P. Anisotropic Thermoelements. Thermoelectric Handbook, Macro to Nano. Ed. by D.M. Rowe: CRC / A.A. Snarskii и L.P. Bulat - 2006 - 954 p.

225. Ssenoga, Twaha A comprehensive review of thermoelectric technology: Materials, applications, modeling and performance improvement / Twaha Ssenoga, Zhu Jie, An Yuying, Li Bo // Renewable and sustainable energy reviews. - 2016. - №65. - P.114-121.

226. Kuroki, T. Thermoelectric generation using waste heat in steel works / T. Kuroki, K. Kabeya, K. Makino, T. Kadjihara, H. Hachiuma, H. Matsuno, A. Fujibayashi // Journal of Electronic materials. - 2014. - №6. - P.2405-2410.

227. Tiffany, Field Massage therapy research review / Field Tiffany // Complementary therapies in clinical practice. - 2016. - № 24. - P.154-163.

228. Verhagen, John. Massage therapy has short-term benefits for people with common musculoskeletal disorders compared to no treatment: a systematic review / John Verhagen // Journal of physiotherapy. - 2015. - № 61. - P.106-116.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Награды и медали Международных и Всероссийских конкурсов и выставок, полученные по результатам диссертационного исследования







МИНИСТЕРСТВО  
ПРОМЫШЛЕННОСТИ И ТОРГОВЛИ  
РЕСПУБЛИКИ ДАГЕСТАН

## ДИПЛОМ

награждается

**Евдулов Олег Викторович**

Доцент кафедры теоретической и общей  
электротехники ФГБОУ ВО «ДГТУ»

*За I место*

*в Конкурсе изобретателей и рационализаторов  
2017 года в номинации  
«Лучший изобретатель Республики Дагестан»*

Министр



**Ю. Умавов**

г. Махачкала 2017 г.



**ITEX 15** 26<sup>th</sup> INTERNATIONAL INVENTION, INNOVATION  
MALAYSIA & TECHNOLOGY EXHIBITION

UNDER THE PATRONAGE OF THE MINISTER  
OF SCIENCE, TECHNOLOGY AND INNOVATION



# *Certificate of Award*

*This is to certify that*

**ISMAILOV TAGIR, YUSUFOV SHIRALI, EVDULOV OLEG,  
HAZAMOVA MADINA**

**RUSSIAN FEDERATION**

*has been awarded the*

**ITEX GOLD MEDAL**

*for the invention*

**THERMOELECTRIC INTENSIFIER HEAT TRANSFER**

*at the*

**26<sup>TH</sup> INTERNATIONAL INVENTION, INNOVATION &  
TECHNOLOGY EXHIBITION  
ITEX 2015**

**KUALA LUMPUR, MALAYSIA  
21 – 23 MAY 2015**



Academician Emeritus Professor  
Tan Sri Datuk Dr Augustine Ong Soon Hock  
President  
Malaysian Invention and Design Society



NATIONAL INSTITUTE OF  
INVENTICS, JASSY, ROMANIA

# Diploma

## GOLD MEDAL

### The Hamangia Thinker

Offered Mr / Ms

Ismailov Tagir Abdurashidovich,  
Khazamova Madina Abdulaevna,  
Evdulov Oleg Victorovich, Kamilova Zuri Anvarovna  
REANIMATION COMPLEX FOR NEWBORNS  
Daghestan State Technical University

THE XVII-TH INTERNATIONAL EXHIBITION  
OF RESEARCH, INNOVATION AND  
TECHNOLOGICAL TRANSFER

“INVENTICA 2013”

IASI, ROMANIA  
19- 21 JUNE 2013

General Manager  
Prof. Boris Plahteanu Ph.D



KOREA INVENTION PROMOTION ASSOCIATION



**SIIF** Seoul  
2014 International  
Invention Fair 2014

## Bronze Prize

presented to

**ISMAILOV TAGIR, EVDULOV OLEG, HAZAMOVA MADINA,  
MAGOMADOV RUSTAM**

from

**RUSSIA**

in recognition of excellent and creative efforts to invent

**THERMOELECTRIC DEVICE FOR THERMAL EFFECTS ON THE  
HUMAN HAND**

exhibited at the  
Seoul International Invention Fair 2014  
organized by the  
Korea Invention Promotion Association  
in Seoul, KOREA  
November 28th - December 1st, 2014

조 은 영

Cho Un-young  
President

Korea Invention Promotion Association



구 차 열

Koo Cha Yol  
Chairman

Korea Invention Promotion Association



SEOUL INTERNATIONAL INVENTION FAIR

# BRONZE PRIZE

presented to

ISMAILOV TAGIR / HAZAMOVA MADINA / EVDULOV OLEG /

EVDULOV DENIS / AJDEMIROVA MADINAT

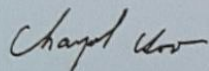
from

**RUSSIA**

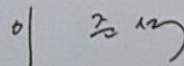
in recognition of excellent and creative efforts to invent

**THERMOELECTRIC DEVICES FOR THERMAL IMPACT ON HUMAN HAND**

exhibited at the  
Seoul International Invention Fair 2016  
organized by the  
Korea Invention Promotion Association  
in Seoul, KOREA  
December 1st - December 4th, 2016



Koo Cha-yol  
Chairman  
Korea Invention Promotion  
Association



Lee Joon-seok  
President  
Korea Invention Promotion  
Association





**NRCT**

*National Research Council of Thailand*

This is to certify that

*ISMAILOV Tagir, HAZAMOVA Madina, EVDULOY Oleg, EVDULOY Denis  
AND AJDEMIROVA Madinat*

has been awarded

**Gold Medal**

In recognition of creative efforts to invent

***Thermoelectric devices for thermal impact on human hand***

Exhibited at "Bangkok International Intellectual Property, Invention, Innovation  
and Technology Exposition"

On the occasion of "Thailand Inventors' Day 2017"  
2 - 6 February 2017

*Sirirug Songsvitalai*

(Professor Sirirug Songsvitalai, M.D., Ph.D.)

Secretary - General



# DIPLÔME

**G**inventions  
Geneva

## SALON INTERNATIONAL DES INVENTIONS GENÈVE

Après examen, le Jury International a décidé

de remettre à: ISMAILOV Tagir, YEVDULOV Oleg, YEVDULOV Denis

pour l'invention: Le développement fait référence aux moyens d'arrêter les saignements.



MÉDAILLE DE BRONZE  
BRONZE MEDAL  
BRONZEMEDAILLE

Genève, le 12 avril 2019

  
Le Président du Jury: David Toj

  
Le Président du Salon: Jean-Luc Vincent

XXI Московский международный  
Салон изобретений и инновационных технологий



«АРХИМЕД-2018»

ДИПЛОМ

Решением Международного Жюри  
награждается

**ЗОЛОТОЙ МЕДАЛЬЮ**

ДГТУ

за разработку «Термоэлектрическое устройство для  
проведения тепловых косметологических процедур»

(Исмаилов Тагир Абдурашидович,  
Евдулов Олег Викторович, Евдулов Денис Викторович,  
Гусейнов Гусейн Магомедзагирович)

Председатель  
Международного Жюри,  
лётчик-космонавт РФ,  
член-корреспондент РАН

Ю.М. Батулин

Президент Салона

Д.И. Зезюлин

Руководитель  
Федеральной службы  
по интеллектуальной  
собственности

Г.П. Ивлиев



**XX Московский международный  
Салон изобретений и инновационных технологий**



**«АРХИМЕД-2017»**

**ДИПЛОМ**

Решением Международного Жюри  
награждается

**ЗОЛОТОЙ МЕДАЛЬЮ**

ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный  
технический университет»

за разработку «Термоэлектрическое устройство  
для проведения тепловых косметологических  
процедур на лицо человека»

(Исмаилов Тагир Абдурашидович, Евдулов Олег Викторович,  
Камилова Зури Анваровна, Абдулхакимов Умар Ильманович,  
Хазамова Мадина Абдуллаевна)

Председатель  
Международного Жюри,  
лётчик-космонавт РФ,  
член-корреспондент РАН

Ю.М. Батурин

Президент Салона

Д.И. Зезюлин

Руководитель  
Федеральной службы  
по интеллектуальной  
собственности

Г.П. Ивлиев

**XX Московский международный  
Салон изобретений и инновационных технологий**



**«АРХИМЕД-2017»**

**ДИПЛОМ**

Решением Международного Жюри  
награждается

**СЕРЕБРЯНОЙ МЕДАЛЬЮ**

ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный  
технический университет»  
за разработку «УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОСТАНОВКИ  
КРОВОТЕЧЕНИЯ»

(Исмаилов Тагир Абдурашидович,  
Евдулов Олег Викторович, Евдулов  
Денис Викторович, Казумов Ревшан Шихович)

Председатель  
Международного Жюри,  
лётчик-космонавт РФ,  
член-корреспондент РАН



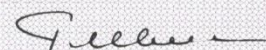
Ю.М. Батури

Президент Салона



Д.И. Зезюлин

Руководитель  
Федеральной службы  
по интеллектуальной  
собственности



Г.П. Ивлиев

**XVIII Московский международный  
Салон изобретений и инновационных технологий**



**«АРХИМЕД-2015»**

**ДИПЛОМ**

Решением Международного Жюри  
награждается

**ЗОЛОТОЙ МЕДАЛЬЮ**

**ФГБОУ ВПО «ДГТУ»**  
за разработку

*«Устройство для отвода теплоты от элементов РЭА,  
работающих в режиме повторно-кратковременных  
тепловыделений с использованием тепловых труб»*  
(Исмаилов Тагир Абдурашидович, Евдулов Олег Викторович,  
Юсуфов Ширали Абдулкадиевич, Рашидханов  
Арип Таймасханович)

**Председатель  
Международного Жюри,  
Президент Всероссийского  
общества изобретателей  
и рационализаторов**

**Ю.П. Пимошенко**

**Президент Салона**

**Д.И. Зезюлин**

**Врио руководителя  
Федеральной службы  
по интеллектуальной  
собственности**

**Л.Л. Кирий**

**XVII Московский международный  
Салон изобретений и инновационных технологий**



**«АРХИМЕД-2014»**

**ДИПЛОМ**

Решением Международного Жюри  
награждаются

**ЗОЛОТОЙ МЕДАЛЬЮ**

Исмаилов Т.А., Хазамова М.А.,  
Евдулов О.В., Евдулов Д.В., Айдемирова М.Р.  
за разработку «Термоэлектрическое  
устройство для теплового  
воздействия на руку человека»

Председатель  
Международного Жюри,  
Президент Всероссийского  
общества изобретателей  
и рационализаторов

Ю.П. Пимошенко

Президент Салона

Д.И. Зезюлин

Руководитель  
Федеральной службы  
по интеллектуальной  
собственности

Б.П. Симонов

XI МЕЖДУНАРОДНЫЙ  
САЛОН ПРОМЫШЛЕННОЙ  
СОБСТВЕННОСТИ



ИЗОБРЕТЕНИЯ,  
ПРОМЫШЛЕННЫЕ ОБРАЗЦЫ,  
ТОВАРНЫЕ ЗНАКИ

**«АРХИМЕД-2008»**

*ДИПЛОМ*

*Решением Международного Жюри  
награждается*

**СЕРЕБРЯНОЙ МЕДАЛЬЮ**

*ГОУ ВПО Дагестанский  
Государственный Технический Университет  
за разработку «Система охлаждения  
элементов РЭА, работающей в режиме  
повторно-кратковременных тепловыделений  
(Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Махмудова М.М.)*

**Председатель  
Международного Жюри,  
Президент Евразийской  
патентной организации**

**А.Н. Григорьев**

**Президент Салона**

**Д.И. Зезюлин**

**Руководитель  
Федеральной службы по  
интеллектуальной собственности,  
патентам и товарным знакам**

**Б.П. Симонов**

XI МЕЖДУНАРОДНЫЙ  
САЛОН ПРОМЫШЛЕННОЙ  
СОБСТВЕННОСТИ



ИЗОБРЕТЕНИЯ,  
ПРОМЫШЛЕННЫЕ ОБРАЗЦЫ,  
ТОВАРНЫЕ ЗНАКИ

**«АРХИМЕД-2008»**

*ДИПЛОМ*

Решением Международного Жюри  
награждается

**ЗОЛОТОЙ МЕДАЛЬЮ**

ГОУ ВПО Дагестанский  
Государственный Технический Университет  
за разработку «Термоэлектрическая батарея»  
(Исмаилов Т.А., Вердиев М.Г., Евдулов О.В.)

Председатель  
Международного Жюри,  
Президент Евразийской  
патентной организации

А.Н. Григорьев

Президент Салона

Д.И. Зезюлин

Руководитель  
Федеральной службы по  
интеллектуальной собственности,  
патентам и товарным знакам

Б.П. Симонов

XI МЕЖДУНАРОДНЫЙ  
АЛОН ПРОМЫШЛЕННОЙ  
СОБСТВЕННОСТИ



ИЗОБРЕТЕНИЯ,  
ПРОМЫШЛЕННЫЕ ОБРАЗЦЫ  
ТОВАРНЫЕ ЗНАКИ

**«АРХИМЕД-2008»**

*ДИПЛОМ*

*Решением Международного Жюри  
награждается*

**СЕРЕБРЯНОЙ МЕДАЛЬЮ**

*ГОУ ВПО «Дагестанский государственный  
технический университет»  
за разработку «Термоэлектрическое полупроводниковое  
устройство для локального замораживания тканей гортани»  
(Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Рагимова Т.А.)*

*Председатель  
Международного Жюри,  
Президент Евразийской  
патентной организации*

**А.Н. Григорьев**

*Президент Салона*

**Д.И. Зезюлин**

*Руководитель  
Федеральной службы по  
интеллектуальной собственности,  
патентам и товарным знакам*

**Б.П. Симонов**



5-АЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ  
И ИННОВАЦИОННЫХ РАЗРАБОТОК  
«ИЗМЕРЕНИЕ, МИР, ЧЕЛОВЕК - 2015»



# СЕРЕБРЯНАЯ МЕДАЛЬ

в номинации «Измерение, контроль, автоматизация в медицине и здравоохранении»

**награждается**

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Дагестанский государственный технический университет»

за разработку

«Термоэлектрическое устройство для проведения тепловых  
косметологических процедур на лицо человека с возможностью  
программирования температурного режима воздействия»

Авторы:

Исмаилов Тагир Абдурашидович  
Евдулов Олег Викторович  
Казумов Ревшан Шихович  
Абдулхакимов Умар Ильманович

Ректор  
Алтайского государственного  
технического университета  
им. И.И. Ползунова



А.А. Ситников

БАРНАУЛ 12-13 МАЯ 2015





5-АЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ  
И ИННОВАЦИОННЫХ РАЗРАБОТОК  
«ИЗМЕРЕНИЕ, МИР, ЧЕЛОВЕК - 2015»



# СЕРЕБРЯНАЯ МЕДАЛЬ

в номинации «Измерение, контроль, автоматизация в медицине и здравоохранении»

**награждается**

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Дагестанский государственный технический университет»

за разработку  
«Автоматизированная система для остановки кровотечения»

Авторы:

Исмаилов Тагир Абдурашидович  
Евдулов Олег Викторович  
Евдулов Денис Викторович  
Набиев Наби Абдулаевич

Ректор  
Алтайского государственного  
технического университета  
им. И.И. Ползунова



А.А. Ситников

БАРНАУЛ 12-13 МАЯ 2015



# XII МЕЖДУНАРОДНЫЙ САЛОН ИЗОБРЕТЕНИЙ И НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ «НОВОЕ ВРЕМЯ»

*Устойчивое развитие  
во время перемен!*



## ДИПЛОМ награждается Золотой медалью

**Т.А. Исмаилов, О.В. Евдулов, Д.В. Евдулов**  
(г. Махачкала, Российская Федерация)

**за разработку**

**ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ УСТРОЙСТВО  
ДЛЯ ОСТАНОВКИ КРОВОТЕЧЕНИЯ**

Член исполкома  
МФАИ (IFIA)

**В.К. Петряшев**

Президент  
Международного жюри  
Председатель  
Центрального совета ВОИР

**Ю.Ю. Манелис**

Генеральный  
менеджер Салона

**В.А. Куликов**

Севастополь, Российская Федерация  
28-30 сентября 2016 г.



# XII МЕЖДУНАРОДНЫЙ САЛОН ИЗОБРЕТЕНИЙ И НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ «НОВОЕ ВРЕМЯ»

*Устойчивое развитие  
во время перемен!*



## **ДИПЛОМ** награждается **Золотой медалью**

**Т.А. Исмаилов, М.А. Хазамова, О.В. Евдулов,  
Д.В. Евдулов, М. Р. Айдемирова**  
*(г. Махачкала, Российская Федерация)*

**за разработку  
ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ УСТРОЙСТВО  
ДЛЯ ТЕПЛОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ  
НА РУКУ ЧЕЛОВЕКА**

Член исполкома МФАИ (IFIA)	Президент Международного жюри	Генеральный менеджер Салона
	Председатель Центрального совета ВОИР	
<b>В.К. Петряшев</b>	<b>Ю.Ю. Манелис</b>	<b>В.А. Куликов</b>

**Севастополь, Российская Федерация  
28-30 сентября 2016 г.**



VII Межрегиональная выставка-ярмарка

«**ДАГПРОДЭКСПО-2009**»

17-19 сентября

Правительство Республики Дагестан  
Министерство экономики Республики Дагестан  
Министерство сельского хозяйства Республики Дагестан  
Республиканский выставочно-маркетинговый центр «Дагестан-ЭКСПО»

# ДИПЛОМ НАГРАЖДАЕТСЯ

**ГОУ ВПО «Дагестанский Государственный  
Технический Университет»**

за холодильную установку на базе сильноточных  
термоэлектрических батарей  
(Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Евдулов Д.В.)

Заместитель Председателя Правительства РД  
Министр сельского хозяйства РД  
Председатель Оргкомитета



Шихсаидов М.Ш.

Махачкала, 2009 г.



VII Межрегиональная выставка-ярмарка

«**ДАГПРОДЭКСПО-2009**»

17-19 сентября

Правительство Республики Дагестан  
Министерство экономики Республики Дагестан  
Министерство сельского хозяйства Республики Дагестан  
Республиканский выставочно-маркетинговый центр «Дагестан-ЭКСПО»

# ДИПЛОМ НАГРАЖДАЕТСЯ

**ГОУ ВПО «Дагестанский Государственный  
Технический Университет»**

за конструкцию биотехнической системы  
(Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Хазамова М.А.)

Заместитель Председателя Правительства РД  
Министр сельского хозяйства РД  
Председатель Оргкомитета



Шихсаидов М.Ш.

Махачкала, 2009 г.



VI Межрегиональная выставка-ярмарка  
«ДАГПРОДЭКСПО-2008»

25-27 сентября

Правительство Республики Дагестан  
Министерство экономики Республики Дагестан  
Республиканский выставочно-маркетинговый центр «Дагестан-ЭКСПО»

# ДИПЛОМ

НАГРАЖДАЕТСЯ

**ЗОЛОТОЙ МЕДАЛЬЮ**

**ГОУ ВПО ДГТУ**

*за*

*сильноточную слоистую  
термоэлектрическую батарею*

*(Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Евдулов Д.В.)*

Заместитель Председателя Правительства РД –  
Министр сельского хозяйства РД,  
Председатель Оргкомитета

Шихсаидов М.Ш.

Махачкала, 2008 г.



VI Межрегиональная выставка-ярмарка  
«**ДАГПРОДЭКСПО-2008**»

25-27 сентября

Правительство Республики Дагестан  
Министерство экономики Республики Дагестан  
Республиканский выставочно-маркетинговый центр «Дагестан-ЭКСПО»

# ДИПЛОМ

НАГРАЖДАЕТСЯ

СЕРЕБРЯНОЙ МЕДАЛЬЮ

**ГОУ ВПО ДГТУ**

*за*

*устройство для охлаждения  
электронных плат*

*(Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Агаев М.У.)*

Заместитель Председателя Правительства РД –  
Министр сельского хозяйства РД,  
Председатель Оргкомитета

Шихсаидов М.Ш.

Махачкала, 2008 г.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

### Акты внедрения результатов диссертационной работы

"УТВЕРЖДАЮ"

Технический директор

ОАО "Концерн КЭМЗ"

Атамов Н.С.



2018 г.

### АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов научных исследований доцента ФГБОУ ВО "Дагестанский государственный технический университет" Евдулова О.В. в ОАО "Концерн КЭМЗ"

Настоящий акт подтверждает использование в разработках ОАО "Концерн Кизлярский электромеханический завод" следующих результатов научных исследований доцента кафедры теоретической и общей электротехники ФГБОУ ВО "Дагестанский государственный технический университет" Евдулова Олега Викторовича:

- 1) конструктивное решение системы обеспечения температурного режима работы информационно-диагностического средства АРМ ДК-30, предусматривающее совместное использование плавящихся тепловых аккумуляторов и термоэлектрических батарей;
- 2) расчетные соотношения и результаты численного эксперимента системы обеспечения температурного режима работы информационно-диагностического средства АРМ ДК-30.

Использование указанных результатов улучшило энергетические и массогабаритные характеристики оборудования.

Главный конструктор  
ОАО "Концерн КЭМЗ"

Мусакаев З.И.



УТВЕРЖДАЮ

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной и  
инновационной деятельности

Общество с ограниченной  
ответственностью "Эрфольг"



ФГБОУ ВО "ДГТУ"

Г.Х. Ирзаев

Директор

Хаджиев Т.Р.

03 2019 г.

03 2019 г.

**АКТ**

**Внедрения результатов научно - исследовательских работ**

Мы, нижеподписавшиеся, Общество с ограниченной ответственностью "Эрфольг", директор Хаджиев Тимур Ризванович с одной стороны и представитель ФГБОУ ВО "Дагестанский государственный технический университет", проректор по научной и инновационной деятельности Ирзаев Гамид Хайбулаевич с другой стороны, составили настоящий акт о внедрении результатов научно-исследовательской работы на тему "Разработка устройств и систем для охлаждения на основе сильноточных термоэлектрических преобразователей энергии".

**В результате внедрения научно - исследовательских работ выполнено:**

Конструкторские, научно-исследовательские изыскания, разработана и изготовлена термоэлектрическая система для проведения тепловых процедур в косметологии, позволяющая обеспечить эффективное охлаждение и нагрев по заданной терапевтической программе.

**Вид внедрения результатов научно - исследовательских работ:**

Термоэлектрическая система для проведения тепловых процедур в косметологии.

**Экономический эффект:**

При внедрении указанной разработки в организации получен фактический экономический эффект в размере 117 тыс. руб.

От предприятия:  
Инженер ООО "Эрфольг"

От университета:  
Доцент кафедры "Теоретическая и  
общая электротехника" ФГБОУ ВО  
"Дагестанский государственный  
технический университет"

  
« 18 »

Рассаев И.

03 2019 г.

  
« 14 »

Евдулов О.В.

03 2019 г.

"УТВЕРЖДАЮ"

Директор ООО «НПФ Промавтоматика»

А.П. Лежнев

« 20 » декабря 2018г.



### АКТ

#### **О внедрении результатов диссертационной работы О.В. Евдулова на тему "Разработка устройств и систем для охлаждения на основе высоко-точных термоэлектрических преобразователей энергии"**

Мы, нижеподписавшиеся, ведущий инженер - ведущий электроник ООО "НПФ Промавтоматика" Щербаков Дмитрий Владимирович и ведущий инженер программист Иноземцев Алексей Михайлович, подтверждаем, что в Научно-производственной фирме "Промавтоматика" были внедрены следующие результаты исследований и разработки диссертанта О.В. Евдулова:

- метод неравномерного охлаждения электронных плат, состоящий в организации основного отвода теплоты от элементов РЭА в плавящийся тепловой аккумулятор и дополнительного теплосъема с наиболее тепловыделяющих объектов посредством термоэлектрических модулей;
- методика расчета системы неравномерного охлаждения электронных плат.

Указанные разработки нашли применение при обеспечении температурных режимов работы отдельных блоков программно-технического комплекса VisScada/RoboPlant автоматизированной системы управления технологическим процессом.

Ведущий инженер программист

А.М. Иноземцев

Ведущий инженер – электроник

Д.В. Щербаков



"УТВЕРЖДАЮ"

Генеральный директор

АО "ДНИИ "Волна"

Гаджиагаев В.А.

2019г.

### АКТ ВНЕДРЕНИЯ

**"Разработка устройств и систем для охлаждения на основе  
сильноточных термоэлектрических преобразователей энергии"**

Докторская диссертационная работа

Автор: Евдулов Олег Викторович

Настоящий акт подтверждает использование в разработках АО "Дербентский научно-исследовательский институт Волна" следующих результатов диссертационной работы Евдулова Олега Викторовича на тему "Разработка устройств и систем для охлаждения на основе сильноточных термоэлектрических преобразователей энергии" по специальности 05.04.03 - "Машины и аппараты, процессы холодильной и криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения":

- 1) конструктивное решение системы охлаждения РЭА, предусматривающее использование плавящихся тепловых аккумуляторов с дополнительным теплоотводом посредством термоэлектрических батарей;
- 2) расчетные соотношения и результаты натурных испытаний системы охлаждения бортовой РЭА, предусматривающее использование плавящихся тепловых аккумуляторов с дополнительным теплоотводом посредством термоэлектрических батарей.

Использование указанных результатов улучшило в плане энергетических и массогабаритных показателей характеристики авиационной аппаратуры внутренней связи и оповещения для гражданских самолетов различных типов.

Главный инженер

Н.Ф. Сафарбеков

«УТВЕРЖДАЮ»

Глав врач  
ГБУ "Республиканский  
кожно-венерологический  
диспансер"

Ганатов С.Г.

« 06 » 02 2019 г.

## АКТ

### о клинической апробации и внедрении результатов НИР

**Настоящим актом подтверждается**, что результаты диссертационного исследования доцента кафедры теоретической и общей электротехники ФГБОУ ВО "Дагестанский государственный технический университет" Евдулова О.В. "Разработка устройств и систем для охлаждения на основе сильноточных термоэлектрических преобразователей энергии" применены в клинической практике ГБУ "Республиканский кожно-венерологический диспансер" Министерства здравоохранения Чеченской Республики в период с 09 января 2019 г. по 23 января 2019г.

**Объект внедрения:** термоэлектрическое устройство для теплового воздействия на отдельные зоны тела человека и методики проведения процедур с его использованием.

#### **Результаты клинической апробации.**

Проведено 18 процедур 5 пациентам, из них 2 пациентам с дерматитом, 2 пациентам - с акне, 1 пациенту на стадии послеоперационной реабилитации.

В ходе апробации приборов выявлены следующие положительные результаты:

- 1) усиление лечебного эффекта за счет равномерного и контрастного теплового воздействия на отдельные участки кожи пациентов;
- 2) уменьшение продолжительности заживления пораженных участков;
- 3) простота обслуживания прибора.

В ходе апробации устройства осложнений не наблюдалось.

#### **Результаты внедрения.**

Разработано термоэлектрическое устройства для теплового воздействия на отдельные зоны тела человека, повышающее эффективность оздоровительных процедур в лечебной практике.

Заведующий поликлиникой, к.м.н. \_\_\_\_\_



Нашхоев М.Р.

"Утверждаю"  
Директор АМНО «Центр  
медицины высоких технологий»  
д.м.н., профессор  
Исмаилов М.И.



*ИИ*

*04*

2019 г.

### АКТ о клинической апробации и внедрении результатов НИР

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационного исследования доцента кафедры теоретической и общей электротехники ФГБОУ ВО "Дагестанский государственный технический университет" Евдулова О.В. "Разработка устройств и систем для охлаждения на основе сильноточных термоэлектрических преобразователей энергии" применены в клинической практике АМНО «Центр медицины высоких технологий» в период с января 2018 г. по март 2019 г.

**Объект внедрения:** термоэлектрические устройства для теплового воздействия на отдельные зоны человеческого организма и методики проведения процедур с их использованием.

#### Результаты клинической апробации.

Было проведено 19 процедур 6 пациентам с различными заболеваниями. Из них 2 пациента с ревматическим артритом не в стадии обострения, один пациент - с атеросклерозом, 3 пациента на стадии послеоперационной реабилитации.

В ходе апробации приборов выявлены следующие положительные моменты:

- 1) повышение лечебного эффекта за счет эффективного контрастного теплового воздействия на отдельные зоны человеческого организма;
- 2) широкий диапазон регулировки температуры физиотерапевтического воздействия (от +12°C до +42°C с точностью  $\pm 1^\circ\text{C}$ );
- 3) простота обслуживания устройств.

В ходе апробации устройств не наблюдалось ни одного случая осложнения.

#### Результаты внедрения.

Разработаны термоэлектрические устройства для теплового воздействия на отдельные зоны человеческого организма, повышающие эффективность физиотерапевтических процедур в медицинской практике.

Зам. директора по лечебной  
и клинико-экспертной работе

*Железная Л.Н.*

Железная Л.Н.



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО  
ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«ДАГЕСТАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
(ФГБОУ ВО «ДГТУ»)

пр. И.Шамиля, 70, г. Махачкала, РД, 367026  
тел.: (8-8722) 62-37-61, факс 62-37-97  
E-mail: dstu@dstu.ru

ОКПО 02069504 ОГРН 1020502629180

ИНН/КПП 0562044246/054101001  
29.05.19 № 955

На \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ 2019 г.

Председателю диссертационного  
совета Д 212.052.06

Д.т.н., профессору  
Исмаилову Т.А.

Настоящим сообщаем, что исследования по тематике диссертационной работы "Разработка устройств и систем для охлаждения на основе высокоточных термоэлектрических преобразователей энергии" доцента кафедры теоретической и общей электротехники ФГБОУ ВО "Дагестанский государственный технический университет" Евдулова Олега Викторовича использовались при выполнении гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых МК-8389.2006.8 "Исследование высокоточных термоэлектрических батарей для систем охлаждения радиоэлектронной аппаратуры" в период с 2006 по 2007 гг.

Проректор по НИИД,  
к.т.н., доцент

Ирзаев Г.Х.



**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО  
ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«**ДАГЕСТАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**»  
(ФГБОУ ВО «ДГТУ»)

пр. И.Шамиля, 70, г. Махачкала, РД, 367026

тел.: (8-8722) 62-37-61, факс 62-37-97

E-mail: dstu@dstu.ru

ОКПО 02069504 ОГРН 1020502629180

ИНН/КПП 0562044246/056101001

29.05.19 № 953

На \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ 2019 г.

**Председателю диссертационного  
совета Д 212.052.06**

**Д.т.н., профессору  
Исмаилову Т.А.**

Настоящим сообщаем, что исследования по тематике диссертационной работы "Разработка устройств и систем для охлаждения на основе сильноточных термоэлектрических преобразователей энергии", доцента кафедры теоретической и общей электротехники ФГБОУ ВО "Дагестанский государственный технический университет" Евдулова Олега Викторовича использовались при выполнении Государственного контракта ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг. №12471 от 19.11.2009 г. "Исследование и разработка системы неравномерного отвода теплоты от элементов радиоэлектронной аппаратуры" в период с 2009 по 2011 гг.

**Проректор по НИИД,  
к.т.н., доцент**

**Ирзаев Г.Х.**



**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО  
ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
**«ДАГЕСТАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
(ФГБОУ ВО «ДГТУ»)**

пр. И.Шамиля, 70, г. Махачкала, РД, 367026

тел.: (8-8722) 62-37-61, факс 62-37-97

E-mail: [dstu@dstu.ru](mailto:dstu@dstu.ru)

ОКПО 02069504 ОГРН 1020502629180

ИНН/КПП 0562044246/054101001

29.05.19 № 954

На \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ 2019 г.

**Председателю диссертационного  
совета Д 212.052.06**

**Д.т.н., профессору  
Исмаилову Т.А.**

Настоящим сообщаем, что исследования по тематике диссертационной работы "Разработка устройств и систем для охлаждения на основе сильноточных термоэлектрических преобразователей энергии" доцента кафедры теоретической и общей электротехники ФГБОУ ВО "Дагестанский государственный технический университет" Евдулова Олега Викторовича использовались при выполнении Государственного контракта ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг. №П1655 от 15.09.2009 г. "Исследование и разработка холодильных установок на базе сильноточных термоэлектрических батарей слоистой конструкции" в период с 2009 по 2011 гг.

**Проректор по НИИД,  
к.т.н., доцент**

**Ирзаев Г.Х.**



СОГЛАСОВАНО

Проректор по НИИД



ФГБОУ ВО "ДГТУ",

доцент

И.Х. Ирзаев

2019 г.

УТВЕРЖДАЮ

Врио ректора



ФГБОУ ВО "ДГТУ"

доцент

Н.С. Суракатов

2019 г.

### АКТ

#### внедрения результатов НИР в учебный процесс

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы Евдулова Олега Викторовича "Разработка устройств и систем для охлаждения на основе высокоточных термоэлектрических преобразователей энергии", выполненной в научно-исследовательской лаборатории полупроводниковых термоэлектрических приборов и устройств кафедры теоретической и общей электротехники ФГБОУ ВО "Дагестанский государственный технический университет", внедрены в учебный процесс на основании решения кафедры теоретической и общей электротехники (ТиОЭ) (протокол №7 от 15 марта 2019 г.) и решения Совета факультета компьютерных технологий, вычислительной техники и энергетики (КТВТиЭ) (протокол №7 от 21 марта 2019 г.) ФГБОУ ВО "Дагестанский государственный технический университет".

Вид внедренных результатов - разработаны математические модели и конструкции термоэлектрических охлаждающих устройств, проведены их теоретические исследования и экспериментальные испытания.

**Форма внедрения.** Указанные результаты включены в курсы лекций по дисциплинам "Преобразование возобновляемых видов энергии и установки на их основе", "Современные проблемы электроэнергетики", а также использовались в качестве наглядного пособия для проведения практических и лабораторных занятий по дисциплине "Новые источники и средства передачи электроэнергии" по направлению 13.04.02 – "Электроэнергетика и электротехника".

Заведующий кафедрой ТиОЭ,  
д.т.н., профессор

Декан факультета КТВТиЭ,  
к.т.н., доцент

и. 

Исмаилов Т.А.



Юсуфов Ш.А.

СОГЛАСОВАНО

Проректор по НиИД ФГБОУ ВО

"ДГТУ",

к.т.н., доцент

Г.Х. Ибраев

«04» \_\_\_\_\_ 2019 г.



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе и  
инновациям

ФГБОУ ВО "ГГНТУ" имени акад.

М.Д. Миллионщикова,

к.т.н.

М.Я. Пашаев

«03» \_\_\_\_\_ 2019 г.



**АКТ**

**внедрения результатов НИР в учебный процесс**

**Настоящим актом подтверждается,** что результаты диссертационной работы Евдулова Олега Викторовича "Разработка устройств и систем для охлаждения на основе сильноточных термоэлектрических преобразователей энергии", выполненной в научно-исследовательской лаборатории полупроводниковых термоэлектрических приборов и устройств кафедры теоретической и общей электротехники ФГБОУ ВО "Дагестанский государственный технический университет", внедрены в учебный процесс на основании решения кафедры "Электротехника и электропривод" и Ученого Совета Института прикладных информационных технологий (протокол №5 от 28.01.2019 г. заседания кафедры "Электротехника и электропривод" и протокол №3 от 24.01.2019г. заседания Ученого Совета института прикладных информационных технологий) ФГБОУ ВО «Грозненский государственный нефтяной технический университет имени акад. М.Д. Миллионщикова» .

**Вид внедренных результатов** - полупроводниковые термоэлектрические охлаждающие системы, предназначенные для теплового воздействия на объект по заданной программе, их математические модели.

**Форма внедрения.** Указанные результаты включены в курсы лекций по дисциплинам "Теплотехника и гидравлика", "Электрические и электронные аппараты", а также использованы при формировании учебных лабораторных стендов для выполнения лабораторных работ по дисциплине "Электрические и электронные аппараты" по направлению 13.03.02 - Электроэнергетика и электротехника.

Заведующий кафедрой ЭиЭ,

к.т.н.

Директор ИПИТ,

д.п.н., профессор



Магомадов Р.А.

Алисултанова Э.Д.