

На правах рукописи



Абдулхакимов Умар Ильманович

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ОХЛАЖДАЮЩЕЙ
ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ТЕПЛОВЫХ
КОСМЕТОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕДУР**

Специальность 2.4.8

Машины и аппараты, процессы холодильной и криогенной техники

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Махачкала - 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования "Дагестанский государственный технический университет".

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент Евдулов Олег Викторович

Официальные оппоненты:

- Марков Олег Иванович, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой экспериментальной и теоретической физики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева".

- Шакуров Алексей Валерьевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Э 4 - холодильная и криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)".

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО»

Защита диссертации состоится "24" октября 2023 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета 24.2.295.02 в ФГБОУ ВО "Дагестанский государственный технический университет", 367026, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля 70, диссертационный зал административного корпуса, кабинет 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО "Дагестанский государственный технический университет" www.dstu.ru. Сведения о защите и автореферат диссертации размещены на официальном сайте ВАК Министерства науки и высшего образования РФ <https://vak.minobrnauki.gov.ru>.

Автореферат разослан "___" _____ 2023 г.

**Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент**



Юсуфов Ш.А.

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. На сегодняшний день в медицинской и косметологической практике все большее распространение получают методы, связанные с локальным нагревом и охлаждением отдельных областей человеческого организма (термо- и криотерапия). Их активное использование напрямую связано с возможностью влияния на состояние энергетического баланса организма. При тепловом воздействии происходит расширение кровеносных и лимфатических сосудов, что улучшает кровообращение и движение лимфы во многих внутренних органах человека. Это способствует активизации обмена веществ и качественному насыщению организма кислородом и питательными веществами. Локальный нагрев стимулирует окисление жира, очищает организм, выводя через пот вредные токсины и другие продукты жизнедеятельности. Локальное охлаждение обладает омолаживающим эффектом, разглаживает морщины, устраняет распространение угревой сыпи и акне, целюлитные отложения, сглаживает рубцы, удаляет кожистые образования, папилломы и доброкачественные опухоли. Охлаждающие маски снимают отечность лица, моделируют его форму, разглаживают морщины и улучшают цвет. Умеренная гипотермия дает положительный эффект при лечении алопеции. Контрастный тепловой массаж применяется для укрепления корней волос, эффективно лечит себорею.

Применение теплового воздействия на тело в целом или его частей постоянно совершенствуется, дифференцируется и в настоящее время представляет собой ряд апробированных методик, каждая из которых имеет свои показания. Использование теплового воздействия в медицине и терапевтической косметологии в настоящее время осуществляется в двух основных направлениях. Первое состоит в нагреве и охлаждении всего организма в целом, второе - локальном тепловом воздействии на его отдельные зоны, в том числе имеющие паталогические отклонения. При этом для первого варианта применяются мощные тепловые и холодильные машины, работающие на пароконвексионном и абсорбционном принципе, криосауны и криобассейны, а для второго - тепловые агрегаты с меньшей тепло- и холодопроизводительностью, в основу которых, в том числе, положены альтернативные методы преобразования энергии.

В данных условиях выявлено, что для проведения охлаждающих косметологических процедур на отдельные области человеческого организма перспективным является применение термоэлектрических систем (ТЭС), позволяющих с высокой эффективностью осуществлять тепловое воздействие, отличающихся высокой надежностью работы, малыми габаритными размерами и высокой экологичностью, практически неограниченным ресурсом эксплуатации. При этом следует отметить, что в данном направлении в настоящее время имеется существенный недостаток исследований, связанных с аппаратной частью охлаждающих средств, оптимизации их характеристик в соответствии со специфическими условиями использования. Это обстоятельство определяет актуальность проведения диссертационного

исследования, связанного с разработкой и исследованием охлаждающей ТЭС, предназначенной для проведения терапевтических косметологических процедур.

Степень разработанности проблемы. Начиная с момента развития А.Ф. Иоффе теории применения полупроводников при создании термоэлементов и устройств на их основе вопросы прикладного использования охлаждающих ТЭС в медицине нашли отражение во многих научных работах. К ним следует отнести научные труды таких ученых, как Л.С. Стельбанса, А.Е. Коленко, Е.К. Иорданишвили, Л.И. Анатычука, Т.А. Исмаилова, И.В. Зорина, А.Л. Вайнера, В.А. Семенюка, Ю.Н. Цветкова, Г. Голдсмида, Т. Кадзикава, М. Дрессельхаус, Ю. Гуревича, Л. Чена и др. В их исследованиях рассмотрены вопросы приложения термоэлектрических устройств (ТЭУ) и систем в физиотерапии, невропатологии, офтальмологии, хирургии, гематологии, анестезиологии, реаниматологии, отоларингологии, стоматологии. Описаны конструкции ТЭС, разработаны их модели, оптимизированы параметры приборов, проведены экспериментальные исследования опытных образцов. Анализируя данные работы и отмечая их несомненную значимость, необходимо указать на ограниченность исследований по разработке технических средств для реализации охлаждающих процедур в косметологии, отличающихся высокими эксплуатационными возможностями, а также возможностью реализации большого спектра тепловых косметологических процедур. Данное обстоятельство определяет цель, задачи и направление настоящего исследования.

Цель и задачи диссертационной работы. Целью диссертационной работы является создание охлаждающей ТЭС для проведения тепловых косметологических процедур, разработка математической модели системы и исследование протекающих в ней электро- и теплофизических процессов, внедрение результатов в медицинскую и косметологическую практику.

Задачами диссертационной работы являются:

1. Критический анализ существующих методов теплового воздействия на отдельные области поверхности тела человека с определением рациональных режимов работы ТЭС в косметологической практике для различных условий эксплуатации.

2. Разработка тепловой модели охлаждающей ТЭС для терапевтической косметологии.

3. Создание математической модели охлаждающей ТЭС для терапевтической косметологии.

4. Проведение численного эксперимента по разработанной математической модели с соответствующим анализом полученных результатов.

5. Проведение комплекса экспериментальных исследований опытного образца охлаждающей ТЭС для подтверждения адекватности полученных теоретических данных.

6. Разработка новых конструкций охлаждающих ТЭУ для реализации различного рода тепловых косметологических процедур на основе проведенных исследований.

7. Практическая реализация результатов работы.

Научная новизна диссертационной работы заключается в:

1. Методе локального теплового воздействия, реализованном на основе ТЭС специальной конструкции, отличающемся тем, что он дает возможность обеспечить как равномерное охлаждение, так и контрастное тепловое воздействие на отдельные зоны поверхности тела человека с высокой точностью регулировки, требуемой объектом воздействия и частотой переключения режимов.

2. Математической модели для исследования теплофизических процессов, происходящих в системе ТЭС - объект воздействия, отличающейся тем, что она основана на решении трехмерной нестационарной задачи теплопроводности для поверхности сложной конфигурации с локальными источниками и стоками теплоты, учитывающей наличие как равномерного охлаждения, так и контрастного теплового воздействия на биологический объект, теплопритоки из окружающей среды, параметры объекта.

3. ТЭУ для проведения тепловых косметологических процедур, отличающихся возможностью реализации различных режимов охлаждающего и контрастного теплового воздействия на поверхность тела человека, в том числе учитывающих его морфологию.

Теоретическая значимость исследования состоит в:

- разработке положений, расширяющих границы применимости тепловых процедур в терапевтической косметологии, возможности создания новых систем для реализации локального охлаждения участков поверхности тела человека с улучшенными функциональными характеристиками;

- изложении гипотезы, подтвержденной как результатами расчетов, так и эксперимента, о возможности эффективного проведения как равномерных охлаждающих, так и контрастных тепловых косметологических процедур с учетом морфологии объекта воздействия за счет применения разработанной системы;

- полученных соотношениях, описывающих теплофизические процессы в ТЭС и объекте воздействия при реализации тепловых косметологических процедур;

- результатах численного эксперимента, дающих новые знания о теплофизических процессах, происходящих как в системе воздействия, так и в биологическом объекте;

- модернизации методики проектирования технических средств для проведения охлаждающих и контрастных тепловых косметологических процедур за счет использования при расчетах разработанной математической модели, учитывающей теплофизические характеристики объекта воздействия, а также его сложную геометрическую форму.

Практическая значимость работы определяется:

- разработанными ТЭУ для охлаждающего и контрастного теплового воздействия на поверхность тела человека в косметологических целях, позволяющими повысить комфортность, надежность и эффективность процедур, учитывающими морфологию объекта воздействия;

- внедрениями результатов исследований в производственный и учебный процесс;

- перспективами использования результатов работы на практике, в первую очередь, в организациях и учреждениях, занимающихся разработкой аппаратуры для косметологии;

- рекомендациями по эксплуатации разработанной системы на практике.

Методология и методы исследования. В диссертации использован комплексный подход к изучению тепловых процессов в косметологии, включающий в себя применение различных методов и подходов из области математики, физики и компьютерных наук, теория теплопроводности твердых тел и конвективного теплообмена, методы численного решения систем дифференциальных уравнений, проектирования охлаждающих ТЭС, экспериментальных исследований и обработки результатов измерений на ЭВМ.

Положения, выносимые на защиту.

1. Установлено, что эффективным методом проведения тепловых косметологических процедур является метод, основанный на использовании ТЭС специальной конструкции, дающий возможность осуществлять как равномерное локальное охлаждение, так и контрастное тепловое воздействие на участок поверхности тела человека с высокой точностью регулировки и частотой переключения режимов.

2. Определено, что при составлении математической модели охлаждающей ТЭС для проведения косметологических процедур необходимо решение трехмерной нестационарной задачи теплопроводности для системы сложной конфигурации, особенностью которой является учет наличия локальных источников и стоков теплоты, сложных условий теплообмена, энергетических и геометрических параметров термoeлектрических модулей (ТЭМ), входящих в состав системы.

3. При разработке систем для проведения охлаждающих и контрастных тепловых косметологических процедур установлено, что эффективным является использование в качестве источника теплоты в них стандартных ТЭМ, осуществляющих различные режимы теплового воздействия, а также учет морфологии поверхности тела человека.

Степень достоверности результатов исследования. Корректное использование математического аппарата, методов экспериментальных исследований, а также достижение хорошей сходимости результатов натуральных испытаний опытного образца ТЭС и численного эксперимента доказывают достоверность полученных результатов. Полученные данные не расходятся с результатами исследований современных российских и зарубежных ученых, посвященных применению теплового фактора в медицине и косметологии.

Апробация результатов работы. Работа в целом и ее отдельные результаты докладывались и обсуждались на III Всероссийской НПК "Молодежь, наука, инновации" (Грозный, ГГНГУ, 2014), XVI Международной НТК "Измерение, контроль, информатизация" (Барнаул, АлтГТУ, 2015 г.), VII Международной НТК "Низкотемпературные и пищевые технологии в 21 веке" (Санкт-Петербург, НИУ ИТМО, 2015 г.), XV Межгосударственной

конференции "Термоэлектрики и их применение" (Санкт-Петербург, ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, 2017 г.), XVIII Международной НТК "Измерение, контроль, информатизация" (Барнаул, АлтГТУ, 2017 г.), VII Всероссийской НТК "Состояние и перспективы развития термоэлектрического приборостроения" (Махачкала, ДГТУ, 2020 г.), XXXVIII Итоговой НТК преподавателей, сотрудников, аспирантов и студентов Дагестанского государственного технического университета "Неделя науки - 2017", научно-технических семинарах кафедры теоретической и общей электротехники ФГБОУ ВО "Дагестанский государственный технический университет" с 2012 по 2018 гг. Разработка "Термоэлектрическое устройство для проведения тепловых косметологических процедур на лицо человека" удостоена золотой медали XX Московского международного Салона изобретений и инновационных технологий "Архимед - 2017", разработка "Термоэлектрическое устройство для проведения тепловых косметологических процедур на лицо человека с возможностью программирования температурного режима воздействия" серебряной медали 5 Международной выставки "Измерения, мир, человек - 2015" (Барнаул, АлтГТУ).

Результаты исследований внедрены в практику производства ООО "Эрфолы" (г. Грозный), клиническую практику ГБУ "Республиканский кожно-венерологический диспансер" (г. Грозный), учебный процесс ФГБОУ ВО "Грозненский государственный нефтяной технический университет".

Публикации. По теме диссертации опубликовано 16 работ, в том числе 2 статьи в журналах, входящих в базу данных Scopus, 3 статьи в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 7 докладов и тезисов докладов на научных конференциях, 3 патента на изобретение Российской Федерации.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 114 наименований и приложения. Основная часть работы изложена на 117 страницах машинописного текста, содержит 61 рисунок.

2. КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, определены цель и задачи исследования, указана научная новизна, а также теоретическая и практическая значимость работы.

В первой главе "Методики и технические средства для проведения тепловых косметологических процедур" рассмотрены существующие в терапевтической косметологии способы и средства теплового воздействия на отдельные зоны человеческого организма, в том числе с применением ТЭУ. В результате литературного обзора установлено, что для данных целей широко применяются лечебные грязи, согревающие и охлаждающие компрессы, аппликации, ванны, нагретая соль, бани и сауны, инфракрасное прогревание, криомассаж, криодеструкция, криоэлектрофорез, криодермабразия, пилинг,

криолиполиз и др. Подобного рода процедуры используются против излишнего отложения жиров в "проблемных зонах" тела, как способ устранения целлюлита, рубцов или шрамов, старения кожных покровов, появления морщин, анемии кожи, для лечения акне, себореи, алопеции, повышенного жиросжигания, удаления бородавок и т.п.

Проведенный анализ литературных источников показал, что на сегодняшний день в практике проведения косметологических процедур, связанных с локальным охлаждением и нагревом отдельных областей поверхности тела человека, есть определенный недостаток в технических средствах, позволяющих его эффективно реализовывать. В основном данное обстоятельство связано с отсутствием эффективных, малогабаритных, надежных систем и приборов, имеющих возможность проведения как локального охлаждения поверхности тела человека до уровня температур 285-288 К с высокой точностью и экспозицией, а также осуществлять контрастное тепловое воздействие как в пространстве, так и во времени с высокой частотой смены режимов.

В данных условиях установлено, что применение ТЭС, в силу указанных ранее преимуществ термoeлектрического метода преобразования энергии, позволяет реализовать разнообразные оздоровительные и эстетические методики, используемые в косметологической практике. При этом могут быть применены различные схемы теплового воздействия с соответствующим чередованием нагрева и охлаждения областей человеческого организма, а также локализацией холодных и горячих зон с формированием температурного поля объекта воздействия различной конфигурации. Выявлено, что оптимизировать характеристики ТЭС, реализующей локальное охлаждение, а также контрастное тепловое воздействие на поверхность тела человека в части энергетических, экономических и массогабаритных показателей можно только путем учета специфики косметологических процедур и условий эксплуатации прибора. Отсутствие исследований по ТЭУ, выполняющих данные функции, является препятствием для более широкого внедрения термoeлектрического охлаждения в практику терапевтической косметологии.

На основе изучения современной литературы, посвященной использованию теплоты в терапевтической косметологии, а также в соответствии с поставленными задачами, определен базовый вариант охлаждающей ТЭС для проведения тепловых косметологических процедур. В качестве него предложена структура, включающая в себя высокотеплопроводное основание малой толщины, на которое установлены стандартные ТЭМ. Данное основание при проведении процедур приводится в тепловой контакт с поверхностью тела человека через антисептическую пленку, а съем теплоты с горячих спаев термомодулей обеспечивается за счет воздушного, либо жидкостного теплоотвода. Путем питания ТЭМ электрическим током одинаковой, либо различной полярности, производится равномерное охлаждение поверхности тела человека или контрастное в пространстве и времени тепловое воздействие.

Во второй главе "Математическая модель охлаждающей

термоэлектрической системы для тепловых косметологических процедур" рассмотрена математическая модель системы. Модель построена на основе решения двух задач: определения требуемых величин теплового потока от исполнительного элемента ТЭС - набора ТЭМ и расчета основных характеристик последних. Решение первой задачи произведено на основе анализа температурного поля пластины произвольной формы, представляющей собой объект воздействия, с дискретными источниками энергии (ТЭМ). С учетом представления источников и стоков теплоты в виде ступенчатой функции задача расчета температурного поля поверхности тела человека при воздействии на него рассматриваемой ТЭС для трехмерного нестационарного случая имеет вид:

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \lambda + q_{ТЭМ}(x, y, z) + q_{ср} + q_{\delta_0} = c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau}, \quad (1)$$

$$q_{ТЭМ}(x, y, z) = \sum_{i=1}^I q_{ТЭМ_i}(x, y, z), \quad (2)$$

$$q_{ТЭМ_i}(x, y, z) = \begin{cases} \frac{Q_{ТЭМ_i}}{V_{ТЭМ_i}} & \text{в области стока} \\ 0 & \text{вне области стока} \end{cases}, \quad (3)$$

$$V_{ТЭМ_i} = \iiint_{V_{ТЭМ_i}(x,y,z)} V_{ТЭМ_i}(x, y, z) dx dy dz, \quad (4)$$

$$q_{ср} = \alpha(T - T_{ср}), \quad (5)$$

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

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

где T - температура в любой точке биологического объекта воздействия; $T_{ср}$ - температура окружающей среды; τ - время; λ - эффективный коэффициент теплопроводности биологического объекта воздействия; α - коэффициент теплоотдачи в окружающую среду ($\alpha = \text{const}$); c - теплоемкость биологического объекта воздействия; ρ - плотность биологического объекта воздействия; $q_{ТЭМ}(x, y, z)$ - суммарное количество теплоты, выделяемое в единице объема в единицу времени всеми локальными истоками или стоками теплоты, $q_{ТЭМ_i}(x, y, z)$ - количество теплоты, выделяемое в единице объема в единицу времени i -м истоком или стоком теплоты (ТЭМ); $Q_{ТЭМ_i}$ - мощность i -го локального истока или стока теплоты; $V_{ТЭМ_i}$ - объем, занимаемый i -м стоком или истоком теплоты; $q_{ср}$ - мощность теплопритоков на единицу объема из окружающей среды; q_{δ_0} - количество теплоты, выделяемое в единице объема в единицу времени биологическим объектом; n - нормаль к поверхности контакта ТЭС и биологического объекта воздействия; $n = (xh + yg + zk)$, h, g, k - единичные вектора.

Решение уравнений (2.5)-(2.10) численным методом конечных элементов

дало возможность рассчитать температурное поле участка поверхности тела человека при тепловом воздействии посредством ТЭС, а также определить изменение его температуры во времени при различных мощностях ТЭМ, а также условий теплообмена с окружающей средой.

Численный эксперимент осуществлялся с учетом существующих режимов проведения тепловых терапевтических процедур на человеческий организм. В модели системы предполагалось использование 6 стандартных ТЭМ, расположенных в два ряда. Размеры ТЭМ: длина - 40 мм, ширина - 40 мм, высота - 4,8 мм. Параметры биологического объекта следующие: $\lambda = 0,6$ Вт/(м·К), $C = 3458$ Дж/(кг·К), $\rho = 1041$ кг/м³, мощность тепловыделений 15 Вт. Температура всех точек ТЭС в начальный момент времени равняется температуре окружающей среды, составляющей 295 К, температура биологического объекта - 309,6 К.

Получены трехмерные, двумерные и одномерные температурные поля биологического объекта при воздействии на него ТЭС, работающей в режиме равномерного охлаждения и контрастного теплового воздействия при выходе прибора в стационарный режим, а также изменение температуры его контрольных точек во времени. На рисунке 1 в качестве примера показано трехмерное температурное поле биологического объекта при его равномерном охлаждении термоэлектрическим прибором при мощности одного ТЭМ 12 Вт.

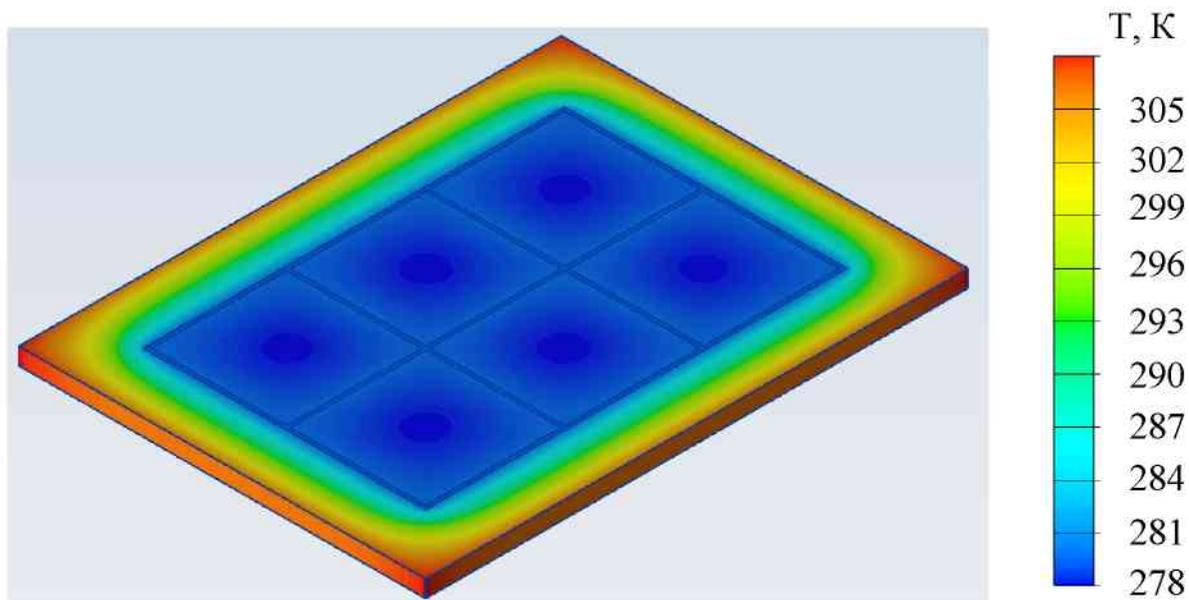


Рисунок 1 - Трехмерное температурное поле биологического объекта при его равномерном охлаждении

Согласно полученным данным температура поверхности тела человека снижается в области, непосредственно сопряженной с ТЭС до температуры 280-281 К. При этом наблюдается некоторый градиент температуры (приблизительно до 1 К) по поверхности воздействия, что связано с конечным значением коэффициента теплопроводности основания и ТЭМ. Температура

поверхности тела человека от границы ее контакта с ТЭС быстро увеличивается и на расстоянии приблизительно 16 мм становится практически равной 309,6 К. Данное обстоятельство очевидно и связано с малой величиной коэффициента теплопроводности биологического объекта, равной 0,6 Вт/(м·К). При увеличении мощности ТЭМ, входящих в ТЭС, понижается температура биологического объекта. Так при увеличении мощности ТЭМ с 8 до 12 Вт наблюдается снижение температуры поверхности тела человека с 284 до 280 К. При этом температура в центральном ТЭМ несколько ниже температуры остальных термомодулей (примерно на 0,5 К). Данное обстоятельство определяется взаимным влиянием ТЭМ, которое максимально для ТЭМ, расположенного в центре. Однако ввиду того, что такое незначительное расхождение температур по площади воздействия (0,5 К для центрального ТЭМ и 1 К по всей поверхности теплового воздействия) не сказывается на лечебном аспекте процедур, им можно пренебречь.

Помимо равномерного охлаждения поверхности тела человека часто практикуются тепловые косметологические процедуры, связанные с контрастным воздействием на биологический объект. Представляет интерес исследование подобных режимов работы ТЭС. Двумерные температурные поля биологического объекта для случаев коридорного и шахматного расположения холодных и горячих зон представлены на рисунках 2-3 (мощность ТЭМ в каждом из случаев составляет 12 Вт).

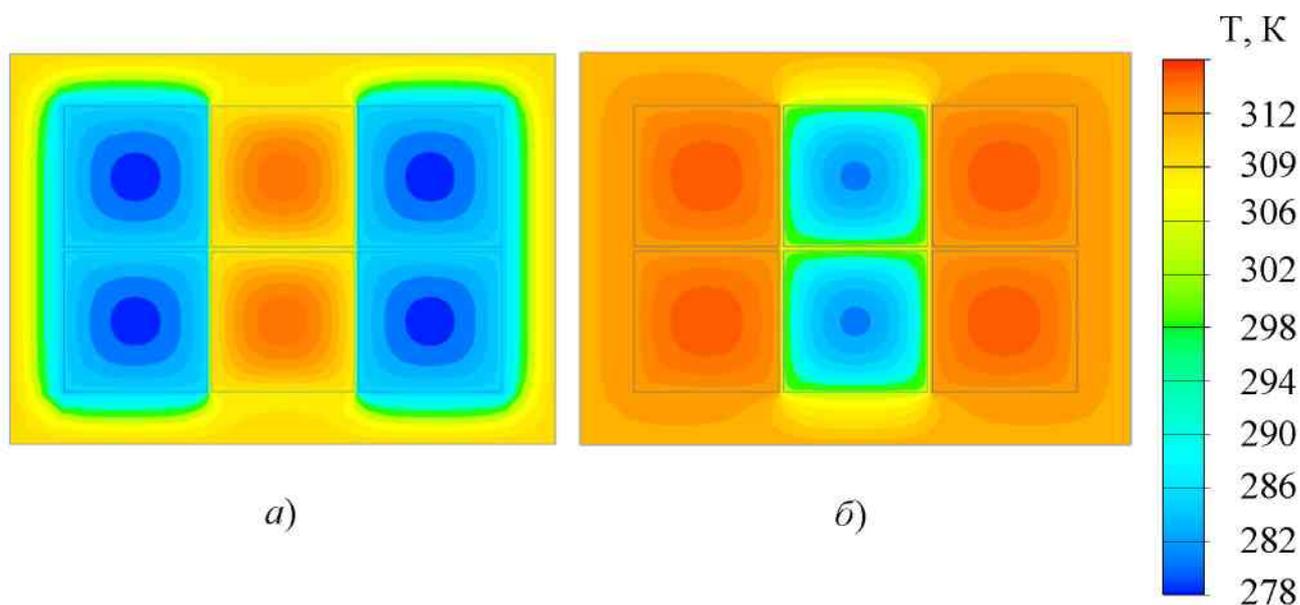


Рисунок 2 - Двумерное температурное поле биологического объекта при контрастном воздействии с коридорным расположением холодных и горячих зон

Согласно расчетным зависимостям следует, что обеспечить требуемый уровень контрастного теплового воздействия с понижением и повышением температуры зон возможно путем использования ТЭМ тех же мощностей, что и для равномерного охлаждения участка человеческого тела. Так для обеспечения

коридорного расположения горячих и холодных зон по вертикали при температурах последних 280 К и 310,5 К достаточно применение ТЭМ мощностью 12 Вт. Также, как и для случая равномерного охлаждения поверхности тела человека, при контрастном воздействии имеет место взаимное влияние соседних ТЭМ, работающих в режиме охлаждения и нагрева. При расчетах установлено, что такое взаимное влияние повышает (понижает) температуру участков с различной температурой примерно на 3-4 К.

В данной ситуации для оптимизации энергетических характеристик ТЭС имеет смысл использование различных режимов ТЭМ. Так, например, работа ТЭМ, расположенных в центре ТЭС может быть реализована путем эксплуатации в режиме максимального холодильного коэффициента, а функционирование термомодулей, находящихся по бокам - в режиме максимальной холодопроизводительности.

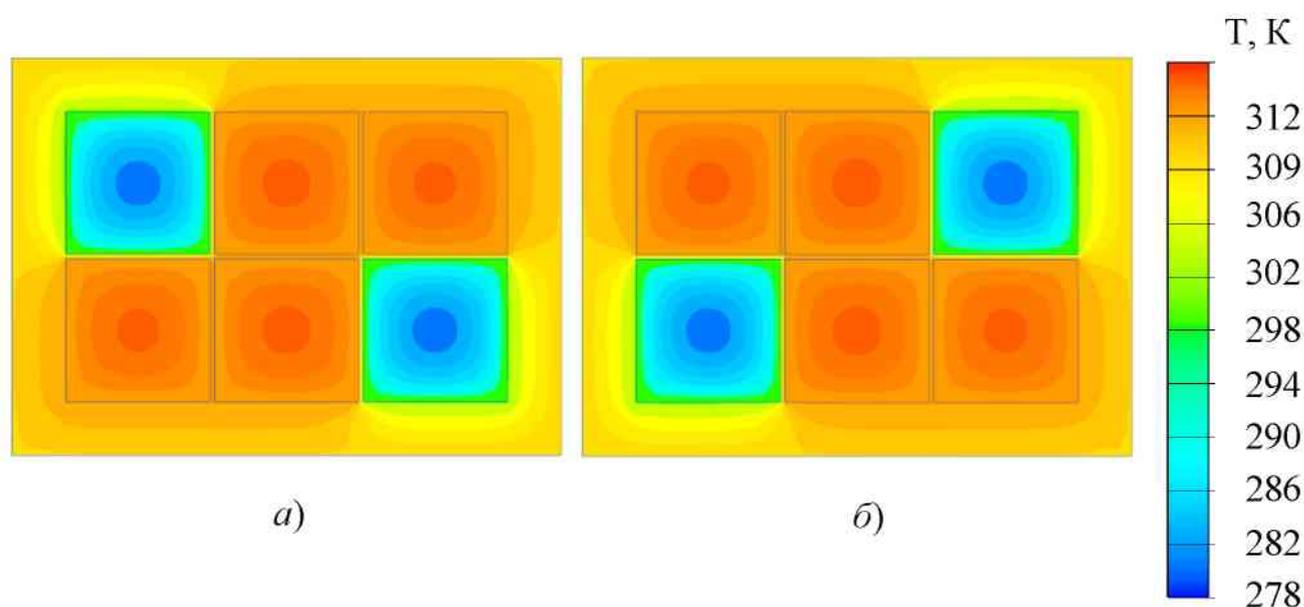


Рисунок 3 - Двумерное температурное поле биологического объекта при контрастном воздействии с шахматным расположением холодных и горячих зон

Для анализа инерционности исследуемой ТЭС получены графики зависимости изменения температуры под центром ТЭС, работающей в режиме охлаждения для различных $Q_{ТЭМ}$ и контрастного теплового воздействия во времени (нагрев - охлаждение и охлаждение - нагрев) при $Q_{ТЭМ}=12$ Вт. Согласно полученным данным длительность выхода системы на стационарный режим работы лежит в относительно небольших пределах. Для случая, соответствующего приведенным зависимостям, время, необходимое для стабилизации температуры биологического объекта, находится в пределах 400 с. Данное обстоятельство необходимо учитывать при проведении косметологических процедур, то есть целесообразным является включение системы до проведения процедур для вывода ее на рабочий режим и уже затем воздействие на пациента.

Другим вариантом является применение форсированных режимов работы ТЭМ в термоэлектрическом приборе в начале его функционирования. В этом случае на первоначальном этапе для питания ТЭМ используются максимальные токи, соответствующие режиму максимальной холодопроизводительности термоэлементов. После этого сила питающего тока термомодулей уменьшается и все они выводятся, например, на режим максимального холодильного коэффициента. В этом случае продолжительность выхода на требуемый уровень охлаждения ТЭС значительно уменьшается. Однако для данного варианта работы ТЭС необходимо использование программируемого источника постоянного электрического тока, обеспечивающего различные режимы работы прибора. Так как на данный момент использование такого элемента не представляет существенных сложностей, то применение исследуемой ТЭС совместно с таким блоком является наиболее предпочтительным вариантом.

На основе анализа полученных значений тепловых потоков, формируемых ТЭС, эквивалентных величине холодо- и теплопроизводительности ТЭМ, может быть произведен расчет характеристик последних, составляющий вторую задачу, решаемую при построении модели системы. Искомыми величинами в данном случае являются геометрические размеры термоэлементов, входящих в состав модуля, величина питающего электрического тока, потребляемая электрическая энергия. Подробное описание методики расчета данных характеристик ТЭМ приведено, например, в работах Анатычука Л.И., Коленко А.Е. При этом в большинстве случаев в ТЭС могут быть использованы ТЭМ стандартного типа, подбор которых осуществляется с использованием специальных пакетов прикладных программ. Для исследуемого варианта ТЭС применены стандартные ТЭМ, производимые ООО "Криотерм", расчет которых произведен по программе Thermoelectric system calculation той же фирмы. Установлено, что для решаемых задач может быть использованы стандартные ТЭМ типа ТВ-127-1,4-2,5 со следующими характеристиками: рабочий диапазон мощностей - 8-17 Вт при среднем перепаде температур между спаями 45 К, ток питания - 1,5-3,5 А при потребляемой мощности от 20 до 80 Вт, холодильный коэффициент - 0,1-0,5.

В третьей главе "Экспериментальные исследования охлаждающей термоэлектрической системы для тепловых косметологических процедур" представлены результаты натурных испытаний разработанной системы. Эксперименты проводились с целью подтверждения адекватности моделей физическому процессу, а также для проверки правильности сделанных на их основе выводов.

В качестве объекта исследований выступал опытный образец термоэлектрического прибора, в состав которого входило основание с закрепленными на нем с помощью специальных креплений ТЭМ. Общее количество ТЭМ составляло шесть, а их расположение на основании осуществлялось в два ряда. Основание с закрепленными на нем термомодулями приводилось в тепловой контакт с имитатором биологического объекта. Он представлял собой силиконовую пластину толщиной 5 мм и площадью 0,02 м². В качестве ТЭМ использовались ТЭМ типа ТВ-127-1,4-2,5.

Измерения проводились в климатической камере с диапазоном рабочих температур - 283-343 К при погрешности термостатирования 1 К и относительной влажности 30-98%. Питание ТЭМ осуществлялось источником электрической энергии с возможностью визуального наблюдения за изменением силы тока и напряжения встроенными в него амперметром и вольтметром. Для снятия температурных характеристик использовался многоканальный измеритель температуры ИРТМ 2402/МЗ 10, подключенный к ПЭВМ.

В процессе эксперимента получены графики зависимости изменения температуры имитатора биологического объекта во времени под центром ТЭС, работающей в режиме охлаждения для значений силы тока питания ТЭМ 2 А, 2,5 А, 3 А. В соответствии с результатами измерений при таких величинах тока питания термомодулей температура имитатора биологического объекта снижается до 286,5 К, 284,5 К, 282,5 К. При этом длительность выхода структуры ТЭС - биологический объект воздействия на стационарный режим работы в полной мере соответствует полученным ранее результатам математического моделирования и составляет примерно 400 с.

Для исследования потерь, связанных с конечными величинами коэффициентов теплопроводности входящих в структуру ТЭС - биологический объект составных частей, а также определения температуры холодных и горячих спаев ТЭМ получены графики, на которых представлены зависимости изменения во времени температуры в контрольных точках, а именно биологического объекта, холодного и горячего спаев ТЭМ при токе питания термомодуля 3 А. В соответствии с экспериментальными данными перепад температур между холодными спаевыми ТЭМ и имитатором биологического объекта составляет 3,5 К. Такая разница температур связана с неплотностью контакта поверхности ТЭМ и биологического объекта, конечных величин коэффициентов теплопроводности всех частей структуры термоэлектрический прибор - поверхность теплового воздействия, а также наличием теплопритоков из внешней среды. Для уменьшения теплового сопротивления между биологическим объектом воздействия и ТЭС необходимо применение специальной теплопроводной пасты, нанесенной на поверхность объекта воздействия, либо аналогичной прослойки (теплопроводная паста и прослойка должны быть антисептическими и соответствовать существующим медицинским стандартам), а также использование более совершенной теплоизоляции, исключающей теплопритоки из окружающей среды к объекту воздействия во время процедур.

Надежность функционирования разработанной ТЭС во многом будет зависеть от эффективного теплосъема с горячих спаев ТЭМ. С этой целью получены графики зависимости изменения температуры опорных спаев ТЭМ во времени при равномерном охлаждении имитатора биологического объекта для различных значений тока питания термомодулей. Из них следует, что значение температуры горячих спаев используемого типа ТЭМ находится в приемлемых пределах практически вплоть до максимального значения тока питания (при токе питания 3,5 А температура горячего спаев ТЭМ составляет 322 К). Данное

обстоятельство определяет достаточно эффективный теплосъем в рассматриваемых условиях с горячих спаев ТЭМ и дает основание полагать о надежной работе разработанного прибора при проведении тепловых косметологических процедур.

По результатам экспериментов проведено сопоставление расчетных данных и результатов измерений. Представленные данные определяют удовлетворительную сходимость результатов численного моделирования и эксперимента. Наибольшее отклонение расчетных от измеренных значений не превышает 9 %.

В четвертой главе "Разработка термоэлектрических устройств для тепловых косметологических процедур" описаны конструкции устройств для теплового воздействия в косметологии. Первый конструктивный вариант предназначен для проведения тепловых процедур на отдельные участки тела человека вообще, описание его конструкции приведено выше. Вторая конструкция применяется для теплового воздействия на лицо человека и имеет две модификации. Их внешний вид изображен на рисунках 4-5.



Рисунок 4 - Внешний вид воздействующей части ТЭС для проведения тепловых косметологических процедур на лицо



Рисунок 5 - Внешний вид воздействующей части ТЭС для проведения тепловых косметологических процедур на щечную область

Модификации прибора отличаются охватом области воздействия, в первом случае это вся поверхность лица, а во втором - только щечная область. В состав обеих конструкций входит основание 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 - ТЭМ, контактирующие с тепловыравнивающими пластинами. ТЭМ подключаются к программируемому источнику постоянного тока, реализующему различные режимы работы модулей (охлаждение, нагрев, их чередование) в зависимости от вида косметологической процедуры.

В заключении сформулированы основные выводы по диссертационной работе в целом.

3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

При решении поставленных в диссертации задач получены следующие научные результаты:

1. На основе критического анализа современных методов и технических средств для проведения тепловых косметологических процедур установлена целесообразность применения термоэлектрических преобразователей энергии в качестве исполнительного элемента для их реализации ввиду таких их преимуществ, как экологичность, бесшумность, надежность, возможность простого перехода от режима охлаждения к режиму нагрева и наоборот.

2. Предложена охлаждающая ТЭС для проведения тепловых косметологических процедур, исполнительными элементами в которой являются ТЭМ, дающие возможность сочетать в едином приборе режимы охлаждения и нагрева, а также осуществлять контрастное тепловое воздействие как по поверхности тела человека, так и во времени с возможностью точной регулировки температурного уровня воздействия, а также обеспечения требуемой процедурами частоты переключения режимов.

3. Разработана математическая модель для исследования теплофизических процессов, происходящих в системе ТЭС - биологический объект, реализованная на основе решения трехмерной нестационарной задачи теплопроводности для поверхности сложной конфигурации с локальными источниками и стоками теплоты, учитывающая как единовременное охлаждение поверхности тела человека, так и контрастное тепловое воздействие, теплопритоки из окружающей среды, параметры объекта.

4. Разработана методика расчета ТЭМ, входящих в состав ТЭС, позволяющая определить их ток питания, геометрические параметры и потребляемую мощность.

5. Получены трехмерные, двумерные и одномерные стационарные и нестационарные температурные поля отдельных зон биологического объекта как при равномерном охлаждении, так и контрастном тепловом воздействии, на основе которых в соответствии с определенными величинами холодо- и теплопроизводительности ТЭМ осуществляется подбор оптимальных электрических и массогабаритных характеристик последних.

6. Доказана адекватность разработанной математической модели экспериментальным путем, при этом сопоставление экспериментальных и теоретических данных показало, что их расхождение не превышает 9 %.

7. На основе проведенных исследований разработаны конструкции ТЭУ для тепловых косметологических процедур, внедренные в лечебную, производственную и учебную практику.

4. ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

I. Публикации в научных изданиях, включенных в международную базу библиографических данных Scopus::

1. Абдулхакимов, У.И. Модель термоэлектрического устройства для проведения тепловых косметологических процедур / Т.А. Исмаилов, У.И. Абдулхакимов, Д.В. Евдулов, О.В. Евдулов, Н.А. Набиев // Термоэлектричество. - 2016. - т. 38, № 5. - С. 80-86.

2. Абдулхакимов, У.И. 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.

II. Статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК:

3. Абдулхакимов, У.И. Модель термоэлектрической системы для проведения тепловых косметологических процедур / О.В. Евдулов, У.И. Абдулхакимов // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. - 2015. - № 38. - С. 28-37.

4. Абдулхакимов, У.И. Математическое моделирование процессов теплообмена в термоэлектрической системе для охлаждающих косметологических процедур / У.И. Абдулхакимов, О.В. Евдулов // Грозненский естественнонаучный бюллетень. - 2022. - № 3. - С. 97-103.

5. Абдулхакимов, У.И. Расчет термоэлектрического блока в составе системы для проведения тепловых физиотерапевтических процедур / О.В. Евдулов, М.А. Хазамова, У.И. Абдулхакимов, И.Ю. Гамзалова, И.А. Габитов // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. - 2022. - т. 49, № 4. - С. 6-15.

III. Статьи, опубликованные в других научных журналах и изданиях:

6. Абдулхакимов, У.И. Экспериментальные исследования термоэлектрической системы для проведения тепловых косметологических процедур / Т.А. Исмаилов, О.В. Евдулов, У.И. Абдулхакимов // Материалы III Всероссийской научно-практической конференции "Молодежь, наука, инновации". - Грозный: ГГНТУ, 2014. - С. 74-83.

7. Абдулхакимов, У.И. Тепловая и математическая модели термоэлектрической системы для тепловых процедур в косметологии / У.И. Абдулхакимов, Ш.А. Юсуфов, Г.С. Аслаханов // Материалы III Всероссийской научно-практической конференции "Молодежь, наука, инновации". - Грозный: ГГНТУ, 2014. С. 128-131.

8. Исмаилов Т.А., Абдулхакимов У.И., Евдулов О.В. Измерение рабочих характеристик термоэлектрического устройства для проведения тепловых косметологических процедур // Материалы 16 Международной НТК "Измерение, контроль, информатизация". - Барнаул: АГТУ, т.2, 2015. - С. 83-87.

9. Исмаилов Т.А., Абдулхакимов У.И., Евдулов О.В., Хазамова М.А. Конструкция устройства для проведения тепловых косметологических процедур на базе полупроводниковых термоэлектрических преобразователей // Материалы 7 Международной НТК "Низкотемпературные и пищевые технологии в 21 веке". - С.-Пб.: НИУ ИТМО, 2015. - С. 449-452.

10. Исмаилов Т.А., Абдулхакимов У.И., Евдулов Д.В., Евдулов О.В. Термоэлектрическая система для проведения тепловых косметологических процедур // Материалы XV Межгосударственной конференции "Термоэлектрики и их применение". - СПб.: ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, 2017. - С. 263-266.

11. Исмаилов Т.А., Абдулхакимов У.И., Евдулов О.В. Автоматизированная система для проведения контрастных тепловых процедур в косметологической практике // Измерение, контроль, информатизация. Материалы 18-й Международной научно-технической конференции. - Барнаул: АГТУ. - 2017. - С. 150-154.

12. Евдулов О.В., Абдулхакимов У.И. Применение термоэлектрических преобразователей энергии для проведения тепловых косметологических процедур // Сборник материалов XXXVIII итоговой научно-технической конференции преподавателей, сотрудников, аспирантов и студентов Дагестанского государственного технического университета "Неделя науки - 2017". Под редакцией Т.А. Исмаилова. - 2017. - С. 49-50.

13. Абдулхакимов У.И. Теоретические исследования термоэлектрической системы для проведения тепловых косметологических процедур // Труды Грозненского государственного нефтяного технического университета им. академика М.Д. Миллионщикова. - 2018. - № 16-17. - С. 54-64.

III. Полученные объекты интеллектуальной собственности:

14. Пат. 2562509, Рос. Федерация: МПК⁷ 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.

15. Пат. 2562507, Рос. Федерация: МПК⁷ 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.

16. Пат. 25721847, Рос. Федерация: МПК⁷ А61F 7/00, Термоэлектрическое устройство для проведения косметологических процедур на лице / Исмаилов Т.А., Магомадов Рустам А.-М., Абдулхакимов У.И., Магомадов Руслан А.-М., Амхаев Т.Ш., Садаев С.С., № 2015106703; заявл. 26.02.2015; опубл. 27.12.2015, Бюл. № 36 - 5 с.