

На правах рукописи



Насрулаев Абдула Магомедович

**Исследование и разработка термоэлектрической системы для извлечения
иностраных объектов из тела человека методом примораживания**

Специальность

2.4.8. Машины и аппараты, процессы холодильной и криогенной техники

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Махачкала - 2022

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:

- Баранов Александр Юрьевич - доктор технических наук, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», ординарный профессор Образовательного центра «Инженерные энергоэффективные системы».

- Васильев Евгений Николаевич - кандидат физико-математических наук, Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», старший научный сотрудник.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)».

Защита диссертации состоится «6» декабря 2022 г. в 12⁰⁰ 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» <http://www.dstu.ru/>. Сведения о защите и автореферат диссертации размещены на официальном сайте ВАК Министерства образования и науки РФ <https://vak.minobrnauki.gov.ru>.

Дата рассылки автореферата « ____ » _____ 2022 г.

**Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.т.н., доцент**

Юсуфов Ш.А.

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Одним из главных аспектов сохранения жизни и здоровья человека при той или иной чрезвычайной ситуации является оперативное и своевременное хирургическое вмешательство, которое в большинстве случаев включает в себя оперативное удаление инородных объектов (ИО) из тела. Данное обстоятельство определяется тем фактом, что попадание в тело человека ИО вызывает дискомфорт, болезненные ощущения и в будущем может привести к воспалительному процессу, заражению и нагноению. Отдельное внимание заслуживают поражения человека при его ранении с оставшимися в ране частями пуль, шрапнели, осколками гранат, сколами холодного оружия и т.д. Наличие на перечисленных объектах микрофлоры приводит также к заражению, нагноению и некрозу ткани. Поэтому разработка технических средств и процедур, связанных с извлечением ИО из тела человека, является актуальной и практически значимой задачей.

На сегодняшний день для осуществления мероприятий по извлечению ИО из тела человека применяются различные механические приспособления (пинцеты, щипцы, иглы, крючки различной конфигурации и т.п.). В тех случаях, когда ИО представляет собой ферромагнитное тело, могут использоваться специальные наконечники с магнитами. Однако использование данных технических средств для извлечения ИО из тела человека приводит к дополнительным повреждениям контактирующих с ним зон, что создает болезненные ощущения при проведении процедур по их извлечению. Кроме этого при использовании приспособлений данного типа недостаточна вероятность успешного итога процесса извлечения объекта из человеческого организма - возможно соскальзывание захватывающего механизма, сложность или невозможность захвата ИО, что также сказывается на продолжительности и болезненности процедуры.

В этих условиях актуальным является разработка и исследование новых методов и технических средств, позволяющих с высокой эффективностью производить оперативное извлечение ИО из человеческого организма, в том числе в полевых условиях. В качестве таких систем перспективным представляется использование приспособлений и устройств, реализующих методику примораживания ИО к специальному зонду, в которых источником холода является термоэлектрический модуль (ТЭМ), а непосредственно закрепление объекта на зонде осуществляется путем образования между ними так называемого ледяного моста при заledenении специальной влажной губки. Достоинством таких приборов является высокая надежность и прочность сцепления ИО и устройства, отсутствие риска обморожения тканей, высокое быстродействие, низкая стоимость, универсальность, экологическая безопасность. Настоящая диссертационная работа и посвящена их всестороннему изучению.

Степень разработанности темы исследования. Исследование прикладного использования термоэлектрического преобразования энергии, в частности в медицинской практике, нашло отражение в научных трудах ряда

отечественных и зарубежных ученых. Среди них следует отметить работы Иоффе А.Ф., Стильбанса Л.С., Бурштейна А.И., Коленко А.Е., Иорданишвили Е.К., Привина М.Р., Каганова М.А., Анатычука Л.И., Исмаилова Т.А., Зорина И.В., Вайнера А.Л., Коломойца Н.В., Булата Л.П., Семенюка В.А., Голдсмида Г., Кадзикава Т., Дрессельхаус М., Гуревича Ю., Шарпа Д., Чена Л. и др. В данных работах описаны возможности использования термоэлектрических преобразователей энергии в приборостроении, электронной технике, теплофизике, здравоохранении, системах обеспечения микроклимата. Анализируя данные работы и отмечая их несомненную значимость, необходимо указать на отсутствие исследований по разработке технических средств для извлечения ИО из полости тела методом примораживания. Данное обстоятельство определяет цель, задачи и направление настоящего исследования.

Цель и задачи диссертационной работы. Целью диссертационной работы является создание термоэлектрической системы (ТЭС) для извлечения ИО из человеческого организма методом примораживания, исследование протекающих в ней теплофизических процессов на основе разработанной математической модели, внедрение результатов в медицинскую практику.

Задачами диссертационной работы являются:

1. Критический анализ существующих способов и средств извлечения ИО из тела человека с определением возможности использования для этих целей охлаждающих термоэлектрических устройств (ТЭУ).

2. Разработка тепловой модели ТЭС для извлечения ИО из тела человека методом примораживания.

3. Создание математической модели ТЭС для извлечения ИО из тела человека методом примораживания.

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

5. Экспериментальная проверка полученных теоретических результатов путем проведения натуральных испытаний разработанной ТЭС.

6. Разработка новых конструкций систем для извлечения ИО из тела человека на основе проведенных исследований.

7. Практическая реализация результатов работы.

Научная новизна диссертационной работы заключается в:

1. Методе извлечения ИО из человеческого организма, состоящем в примораживании объекта к холодной поверхности ТЭМ через влажную губку, выполняющую роль ледяного моста, с последующим изъятием его из полости тела.

2. Математической модели ТЭС для извлечения ИО из тела человека методом примораживания, реализованной на основе решения задачи нестационарной теплопроводности при ее введении в человеческий организм, учитывающей наличие объектов с различными теплофизическими параметрами и сложные условия теплообмена на границах сред, а также расчета процесса заледенения влажной губки при фазовом переходе воды в лед при различных величинах холодопроизводительности ТЭМ.

3. Сведениях о закономерностях протекания теплофизических процессов при введении ТЭС в человеческий организм и заледенении влажной губки при различных электро- и теплофизических параметрах ТЭМ.

4. Конструкциях устройств для извлечения ИО из тела человека методом примораживания, отличающихся использованием в них в качестве источника холода ТЭМ.

Теоретическая значимость исследования состоит в:

– разработке положений, расширяющих границы применимости ТЭС в лечебной практике при оказании первой медицинской помощи в части улучшения их функциональных и надежность характеристик;

– формулировке гипотезы, подтвержденной результатами теоретических и экспериментальных исследований о возможности повышения эффективности извлечения ИО из тела человека путем использования их примораживания к ТЭС;

– тепловой и математической моделях, описывающих электро- и теплофизические процессы в разработанной ТЭС;

– результатах численного эксперимента, дающих новые знания о теплофизических процессах, протекающих в ТЭС;

– модернизации методики проектирования охлаждающих ТЭС для медицины за счет использования при расчетах разработанной математической модели.

Практическая значимость работы определяется:

– разработанными конструкциями устройств для извлечения ИО из тела человека методом примораживания, позволяющими повысить надежность, эффективность, а также комфортность оказания медицинской помощи;

– внедрением результатов исследований в лечебную практику и учебный процесс;

– рекомендациями по эксплуатации разработанных приборов в медицинских учреждениях.

Методология и методы исследования. В процессе решения поставленных в диссертационной работе задач использованы принципы системного подхода, методы теплофизического и математического моделирования, теория фазовых переходов веществ, численные методы решения систем дифференциальных уравнений, математическая статистика, методы натуральных испытаний и обработки результатов эксперимента на ПЭВМ.

Положения, выносимые на защиту:

1. Установлено, что эффективным методом извлечения ИО из человеческого организма является его предварительное примораживание к холодной поверхности ТЭМ, повышающее надежность и прочность его фиксации при изъятии из полости тела.

2. Определено, что при составлении математической модели ТЭС для извлечения ИО из тела человека методом примораживания необходимо решение нестационарной задачи теплопроводности при введении системы в человеческий организм, а также расчет процесса заледенения влажной губки

при фазовом переходе воды в лед, определение электро- и теплофизических характеристик ТЭМ.

3. Согласно результатам исследований установлено, что при эксплуатации ТЭС температура близлежащих к ней тканей находится в тех пределах, при которых исключены ожоги и переохлаждение человека.

4. Выявлено, что повысить быстродействие системы возможно: выводом на рабочий режим ТЭС до введения в человеческий организм; использованием более мощного ТЭМ, рассчитанного на высокие токи питания; путем повышения коэффициента теплопроводности губки за счет использования соответствующих материалов, либо принятии специальных конструктивных мер, ведущих к повышению ее коэффициента теплопроводности; уменьшением температуры холодных спаев модуля при использовании более эффективной системы теплоотвода.

Степень достоверности результатов исследования. Разработанный в диссертационной работе метод извлечения ИО из человеческого организма, тепловая и математическая модели, а также конструкции устройств достоверны ввиду корректного использования математического аппарата, методов экспериментальных исследований, а также хорошей сходимости результатов натуральных испытаний опытного образца ТЭС и численного эксперимента.

Апробация результатов работы. Работа в целом и ее отдельные результаты докладывались и обсуждались на 22-й Международной научно-технической конференции «Измерение, контроль, информатизация» (Барнаул, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет», 2021 г.), X Международной НТК «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке» (Санкт-Петербург, Университет ИТМО, 2021 г.), Всероссийских молодежных НПК «Программно-техническое обеспечение автоматизированных систем» (Барнаул, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет», 2020 и 2021 г.г.), 14 Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов (с международным участием) «Будущее машиностроения» (Москва, МГТУ им. Э.Н. Баумана, 2021 г.), 42 Итоговой научно-технической конференции преподавателей, сотрудников, аспирантов и студентов ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет» (Махачкала, 2021 г.), научно-технических семинарах кафедры теоретической и общей электротехники ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет» с 2018 по 2021 г.г. Разработка «Термоэлектрическое устройство для извлечения инородных объектов из тела человека» удостоена золотой медали 8 Международной выставки «Измерения, мир, человек - 2018» (Барнаул, АлтГТУ), разработка «Устройство для извлечения инородных объектов из тела человека на базе термоэлектрического охладителя» - серебряной медали 10 Международной выставки «Измерения, мир, человек - 2020» (Барнаул, АлтГТУ), разработка «Термоэлектрическое устройство для извлечения инородных объектов из тела человека» - серебряной медали Международной выставки НИ-ТЕСН (Россия, Санкт-Петербург, 2022 г.).

Результаты исследований внедрены в практику производства ООО «Эрфольг» (г. Грозный), клиническую практику ГБУ РД «Республиканская

клиническая больница им. А.В. Вишневого» (г. Махачкала), учебный процесс ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 работ, в том числе 1 статья в журнале, входящем в базу данных Scopus, 4 статьи в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 6 докладов и тезисов докладов на научных конференциях, 2 патента РФ на полезную модель.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 124 наименования и приложения. Основная часть работы изложена на 112 страницах машинописного текста, содержит 51 рисунок.

2. КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении рассмотрена актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, определена научная новизна, а также теоретическая и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе «Методики и технические средства для извлечения инородных объектов из тела человека» рассмотрены существующие методы извлечения ИО из тела человека, а также устройства и системы для их реализации. Проведенный литературный обзор показал, что в настоящее время извлечение ИО из тела человека производится в основном хирургическим методом с использованием различного оборудования, в состав которого входят разнообразные механические приспособления. В случае извлечения ферромагнитных ИО могут быть также применены намагниченные зонды. Методики проведения операций по извлечению посторонних тел также являются разнообразными. Они зависят от местоположения ИО объекта, его формы, размеров и состава и включают в себя такие мероприятия, как отыскание местоположения ИО, приведение его в наиболее удобное для извлечения положение и непосредственно выем из тела человека.

Анализируя данные методики по извлечению ИО из тела человека и технические средства для их реализации необходимо отметить их недостаточную надежность, связанную, прежде всего с качеством фиксации постороннего объекта в приспособлении, зависимость от квалификации персонала, проводящего операцию, болезненность и продолжительность процедуры. Поэтому представляет интерес разработка новых технических средств для извлечения ИО из тела человека и методик, реализованных на их основе. В этих условиях перспективным является использование методики локального примораживания ИО к специальному зонду с охлажденным наконечником. Надежность фиксации ИО в извлекающем приспособлении в данном случае будет обеспечиваться за счет высокой степени сцепления наконечника зонда и объекта при их примораживании друг к другу. В качестве источника холода в зонде может быть использован компактный ТЭМ, обладающий высоким ресурсом работы, надежностью, экологичностью, обеспечивающий требуемую мощность для надежной фиксации ИО на извлекающем приспособлении.

На основе литературного обзора определены задачи исследования, состоящие в разработке и изучении ТЭС для извлечения ИО из тела человека.

Во второй главе «Математическая модель термоэлектрической системы для извлечения инородных объектов из тела человека методом примораживания» представлены результаты математического моделирования системы.

Тепловая модель прибора изображена на рисунке 1.

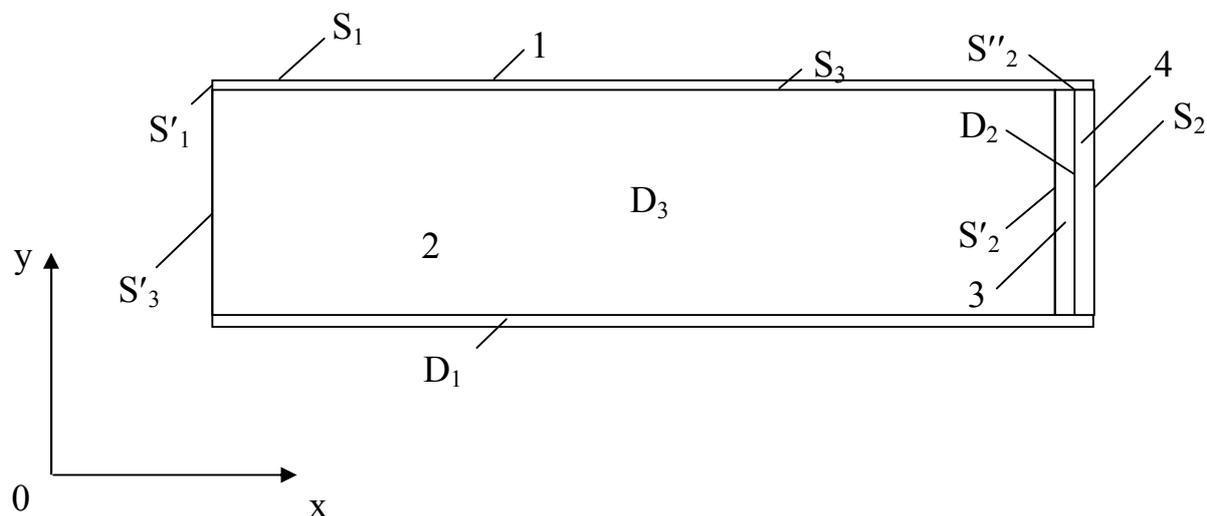


Рисунок 1 - Тепловая модель ТЭС для извлечения ИО из тела человека

На рисунке 1 обозначено: полая пластмассовая трубка - 1, подвижный зонд с помощью направляющих имеющий возможность перемещаться вдоль трубки, выполняющий также функции съема теплоты с горячих спаев ТЭМ - 2, ТЭМ - 3, влажная губка - 4, область соответствующая воздушному зазору - D_1 , ТЭМ - D_2 , подвижному зонду - D_3 ; поверхность стенки трубки ТЭС, контактирующая с телом человека (биологическим объектом) - S_1 , окружающей средой - S'_1 ; поверхность ТЭС, контактирующая с влажной губкой - S_2 , зондом - S'_2 , воздушным зазором - S''_2 ; поверхность зонда, контактирующая с воздушным зазором - S_3 , окружающей средой - S'_3 . При выполнении операции по извлечению ИО из тела человека трубка вводится в полость, с помощью зонда ТЭМ холодной поверхностью через губку приводится к контакт с объектом, происходит их сцепление за счет примораживания, затем производится извлечение ИО объекта за счет перемещения зонда в обратном направлении.

При математическом моделировании устройства решены три задачи, первая из которых состоит в расчете теплофизических процессов при введении прибора в полость тела, вторая - исследовании процесса фазового перехода при замерзании влажной губки, третья - определении параметров ТЭМ.

Ввиду того, что величина воздушного зазора предполагается незначительной и тепловые процессы, происходящие в устройстве носят непродолжительный характер, предполагается, что во всех элементах прибора процесс теплопередачи осуществляется только за счет теплопроводности.

При данном условии математическое описание теплофизических процессов, протекающих в системе при ее внедрении в организм человека, без учета влажной губки (процессы, происходящие в ней при наличии фазового перехода, ведущие к примораживанию ИО к зонду, рассматриваются при решении второй расчетной задачи) в обобщенном виде может быть представлено следующим образом:

$$\begin{aligned}
 a_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + a_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} &= \frac{\partial T_1}{\partial \tau} \text{ при } x, y \in D_1, \\
 a_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + a_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} + \frac{Q_{\text{ТЭМ}}}{c_2 \rho_2} &= \frac{\partial T_2}{\partial \tau} \text{ при } x, y \in D_2, \\
 a_3 \frac{\partial^2 T_3}{\partial x^2} + a_3 \frac{\partial^2 T_3}{\partial y^2} &= \frac{\partial T_3}{\partial \tau} \text{ при } x, y \in D_3, \\
 T_1, T_2, T_3 &= T_{\text{вг}} = T_{\text{ср}}, \text{ при } \tau = 0, \\
 \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial n_1} &= \alpha_{\text{бo}} (T_{\text{бo}} - T_1) \text{ при } x, y \in S_1, \\
 \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial n_2} - q_{\text{x.ТЭМ}} &= \lambda_{\text{вг}} \frac{\partial T_{\text{вг}}}{\partial n_2} \text{ при } x, y \in S_2, \\
 \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial n'_2} + q_{\text{г.ТЭМ}} &= \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial n'_2} \text{ при } x, y \in S'_2, \\
 \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial n''_2} + q_{\text{г.ТЭМ}} &= \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial n''_2} \text{ при } x, y \in S''_2, \\
 \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial n_3} &= \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial n_3} \text{ при } x, y \in S_3, \\
 \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial n'_1} &= \alpha_{\text{ср}} (T_1 - T_{\text{ср}}), \\
 \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial n'_3} &= \alpha_{\text{ср}} (T_3 - T_{\text{ср}}).
 \end{aligned} \tag{1}$$

где $T_1, T_2, T_3, T_{\text{вг}}, T_{\text{бo}}$ – температуры стенки трубки, ТЭМ, зонда, влажной губки, биологического объекта; a_1, a_2, a_3 – коэффициенты теплопроводности стенки трубки, ТЭМ, зонда; $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_{\text{вг}}$ – коэффициенты теплопроводности стенки трубки, ТЭМ, зонда, влажной губки; c_1, c_2, c_3 – удельная теплоемкость стенки трубки, ТЭМ, зонда; ρ_1, ρ_2, ρ_3 – плотность стенки трубки, ТЭМ, зонда; $Q_{\text{ТЭМ}}$ – количество теплоты Джоуля, выделяемое за единицу времени в единице объема ТЭМ; $q_{\text{x.ТЭМ}}$ – холодопроизводительность ТЭМ; $q_{\text{г.ТЭМ}}$ – теплопроизводительность ТЭМ; $\alpha_{\text{бo}}$ – коэффициент теплообмена между стенкой трубки и биологическим объектом; $\alpha_{\text{ср}}$ – коэффициент теплообмена ТЭС с окружающей средой; $T_{\text{ср}}$ – температура окружающей среды; $n_1, n'_1, n_2, n'_2, n''_2, n_3, n'_3$ – нормали к поверхностям $S_1, S'_1, S_2, S'_2, S''_2, S_3, S'_3$ соответственно; $n_i = (xh_i + yz_i)$; h, z – единичные вектора: $i=1 \dots 7$.

Непосредственно процесс примораживания ИО к ТЭС производится путем возникновения между ним и холодной поверхностью ТЭМ ледяного моста, образуемого при замерзании влажной губки. Поэтому для решения второй задачи необходимо рассмотреть процесс фазового превращения воды в лед в губке. Предполагается, что в начальный момент времени губка представляет собой псевдожидкую фазу, характеризующуюся характеристиками: теплопроводностью $\lambda_{\text{вг.ж}}$, теплоемкостью $c_{\text{вг.ж}}$, плотностью $\rho_{\text{вг.ж}}$, теплотой замерзания $v_{\text{вг}}$, а также температурой кристаллизации $T_{\text{вг.кр}}$. При этом по ее поверхности равномерно распределен тепловой поток $q_{\text{х.ТЭМ}}$. Тогда математическое описание задачи расчета теплообмена при замерзании влажной губки выглядит следующим образом:

$$c_{\text{вг.тв}} \rho_{\text{вг.тв}} \frac{\partial T_{\text{вг.тв}}}{\partial \tau} = \lambda_{\text{вг.тв}} \frac{\partial^2 T_{\text{вг.тв}}}{\partial x^2}, \quad (2)$$

$$T_{\text{вг.тв}}(\xi, \tau) = T_{\text{вг.кр}} = \text{const}. \quad (3)$$

$$c_{\text{вг.ж}} \rho_{\text{вг.ж}} \frac{\partial T_{\text{вг.ж}}}{\partial \tau} = \lambda_{\text{вг.ж}} \frac{\partial^2 T_{\text{вг.ж}}}{\partial x^2}, \quad (4)$$

$$\lambda_{\text{вг.ж}} \left. \frac{\partial T_{\text{вг.ж}}}{\partial x} \right|_{x=\xi} - \lambda_{\text{вг.тв}} \left. \frac{\partial T_{\text{вг.тв}}}{\partial x} \right|_{x=\xi} = -\rho_{\text{вг.ж}} v_{\text{вг}} \frac{d\xi}{d\tau}. \quad (5)$$

$$\lambda_{\text{вг.тв}} \left. \frac{\partial T_{\text{вг.тв}}}{\partial x} \right|_{x=0} = q_{\text{х.ТЭМ}}, \quad (6)$$

где $T_{\text{вг.тв}}$ - температура льда; $c_{\text{вг.тв}}$, $\rho_{\text{вг.тв}}$, $\lambda_{\text{вг.тв}}$ - теплоемкость, плотность и теплопроводность льда; τ - время; где ξ - граница раздела псевдожидкой фазы и льда в губке; где $T_{\text{вг.ж}}$ - температура псевдожидкой фазы.

Температура $T_{\text{вг.ж}}$ на глубине $h_{\text{вг}}$ соответствует температуре человеческого тела (309,6 К).

При решении третьей задачи связь между $q_{\text{х.ТЭМ}}$ и параметрами ТЭМ (геометрическими, электро- и теплофизическими), а также величиной питающего тока, напряжением и мощностью определяется в соответствие с известными выражениями, полученными, например в работах Булата Л.П., Анатычука Л.И., Коленко А.Е. и др.

Расчет уравнений (1)-(6) произведен численными методами конечных элементов и разностей (расчеты реализованы в пакетах прикладных программ Elcut и Mathcad). Получены графики изменения температуры в различных точках ТЭС при введении ее в организм человека для извлечения ИО в зависимости от мощности ТЭС, параметров материалов модуля, внешних условий, определена продолжительность замерзания влажной губки для различных величин $q_{\text{х.ТЭМ}}$. За исходные принимались следующие параметры: $\lambda_1=0,159$ Вт/(м·К), $\lambda_2=1,5$ Вт/(м·К), $\lambda_3=121$ Вт/(м·К), $\lambda_{\text{вг}}=0,133$ Вт/(м·К), $\rho_1=1350$ кг·м⁻³, $\rho_2=7700$ кг·м⁻³, $\rho_3=8500$ кг·м⁻³, $c_1=1200$ Дж·кг⁻¹·К⁻¹, $c_2=124$ Дж·кг⁻¹·К⁻¹, $c_3=377$ Дж·кг⁻¹·К⁻¹, $a_1=9,8 \cdot 10^{-8}$ м²/с, $a_2=1,57 \cdot 10^{-6}$ м²/с, $a_3=3,78 \cdot 10^{-5}$ м²/с, $T_{\text{ср}}=293$ К, $\alpha_{\text{ср}}=10$ Вт·м⁻²·К⁻¹, $\alpha_{60}=10$ Вт·м⁻²·К⁻¹, $R_{\text{ТЭМ}}=1,54$ Ом, $\lambda_{\text{вг.ж}}=0,599$ Вт/(м·К), $\rho_{\text{вг.ж}}=992,2$ кг·м⁻³, $c_{\text{вг.ж}}=4183$ Дж·кг⁻¹·К⁻¹, $\lambda_{\text{вг.тв}}=2,6$ Вт/(м·К), $\rho_{\text{вг.тв}}=919$ кг·м⁻³,

$c_{\text{вг.тв}}=2150 \text{ Дж}\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$, $T_{\text{вг.кр}}=273 \text{ К}$, $v_{\text{вг}}=332,4\cdot 10^3 \text{ Дж/кг}$, $h_{\text{вг}}=3 \text{ мм}$, предполагалось использование ТЭМ типа ТВ-38-1.0-0.8CHR (производитель ООО Криотерм, г. Санкт-Петербург).

В результате численного эксперимента получены графики изменения температуры в различных точках ТЭС при введении ее в организм человека для извлечения ИО в зависимости от мощности ТЭС, параметров материалов модуля, внешних условий, определена продолжительность замерзания влажной губки для различных величин холодопроизводительности ТЭМ.

На рисунке 2 показано двумерное температурное поле ТЭС (с соответствующими размерами) при ее введении в тело человека на глубину 50 мм для холодопроизводительности ТЭМ 7000 Вт/м^2 при выходе прибора на стационарный режим.

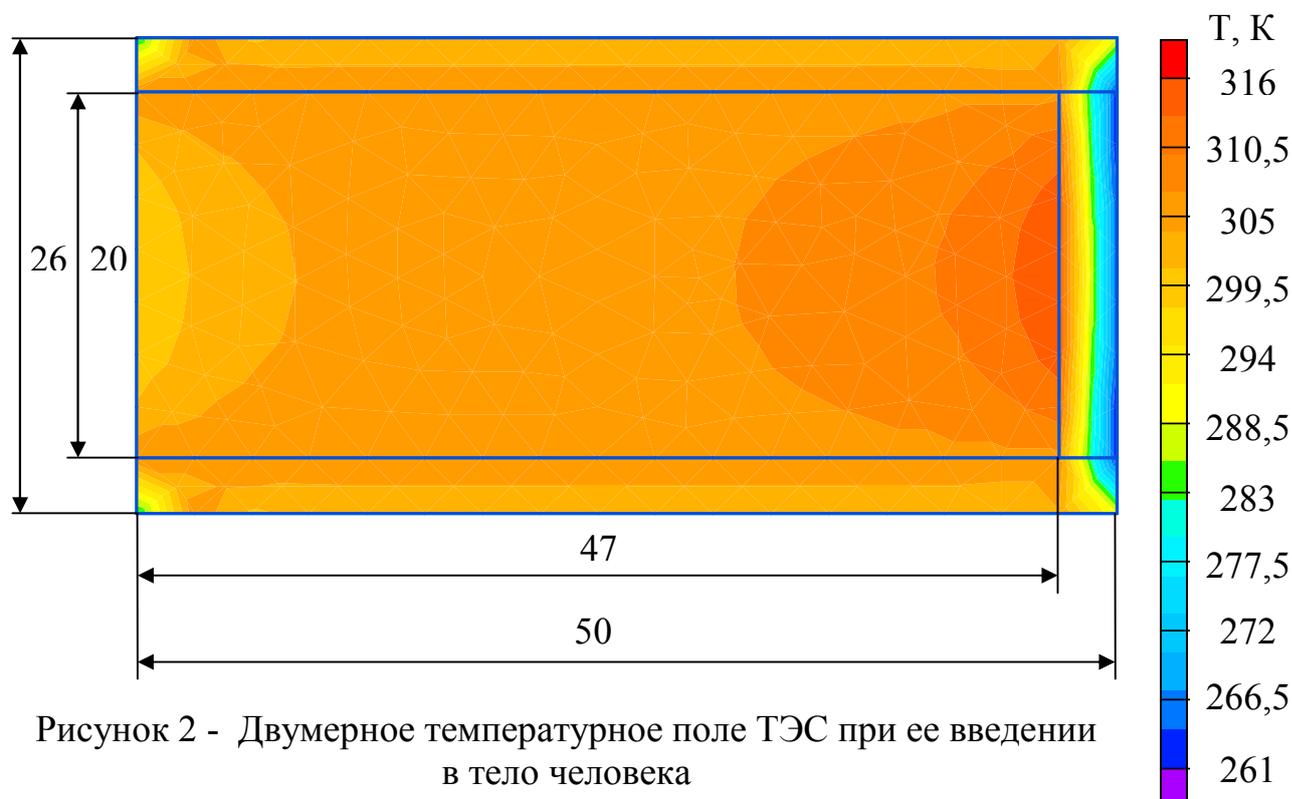


Рисунок 2 - Двумерное температурное поле ТЭС при ее введении в тело человека

Согласно представленным данным распределение температуры по ТЭС достаточно неоднородно. Со стороны холодных спаев ТЭМ температура существенно меньше, чем в остальных точках, а со стороны горячих - выше что объясняется поглощением и выделением теплоты Пельтье. При этом температура по зонду изменяется относительно незначительно, что связано с высокой теплопроводностью материала, из которого он изготовлен (латуни). Из результатов расчета следует, что с увеличением теплового потока на холодных спаях ТЭМ температура на соответствующей поверхности снижается. Так при величине $q_{\text{х.ТЭМ}}=7000 \text{ Вт/м}^2$ данная температура составляет чуть более 263 К и увеличивается примерно на 2,5 К при уменьшении $q_{\text{х.ТЭМ}}$ на 500 Вт/м^2 .

Анализируя распределение температуры по оси у необходимо отметить, что ее значение по поверхности ТЭМ практически не меняется. Это позволяет рассматривать задачу о промерзании влажной губки только в одной

пространственной координате, по ее толщине, существенно упростив расчет теплообмена, связанного с фазовым переходом вещества. Другой важной информацией, следующей из результатов расчета, является то, что использовании ТЭС при данных мощностях ТЭМ не ведет к переохлаждению близлежащих зон человеческого организма. В зазорах между стенкой трубки ТЭС и ТЭМ (3 мм) температура меняется достаточно быстро и уже на расстоянии 1,5 мм от края модуля становится равной 277 К, что, учитывая кратковременность проведения процедуры по извлечению ИО, практически не влияет на состояние тканей.

Помимо этого представленные данные показывают, что наличие перегрева зонда за счет выделяющейся на горячих спаях ТЭМ теплоты, практически не сказывается на температуре тканей биологического объекта. В зоне их контакта со стенкой трубки ТЭС температура составляет 312 К, что ненамного превышает температуру человеческого тела, т. е. риск ожога при использовании разработанной системы на практике отсутствует. Таким образом стенка трубки ТЭС и воздушный зазор выполняют роль надежной тепловой изоляции.

Для оценки общей продолжительности образования ледяного моста между ИО и ТЭУ произведен расчет времени, необходимого для полного заледенения влажной губки в зависимости от холодопроизводительности ТЭМ при ее различных толщинах. Результаты численного эксперимента представлены на рисунке 3 (кривая 1 - $h_{\text{вг}}=3$ мм, 2 - $h_{\text{вг}}=4$ мм, 3 - $h_{\text{вг}}=5$ мм).

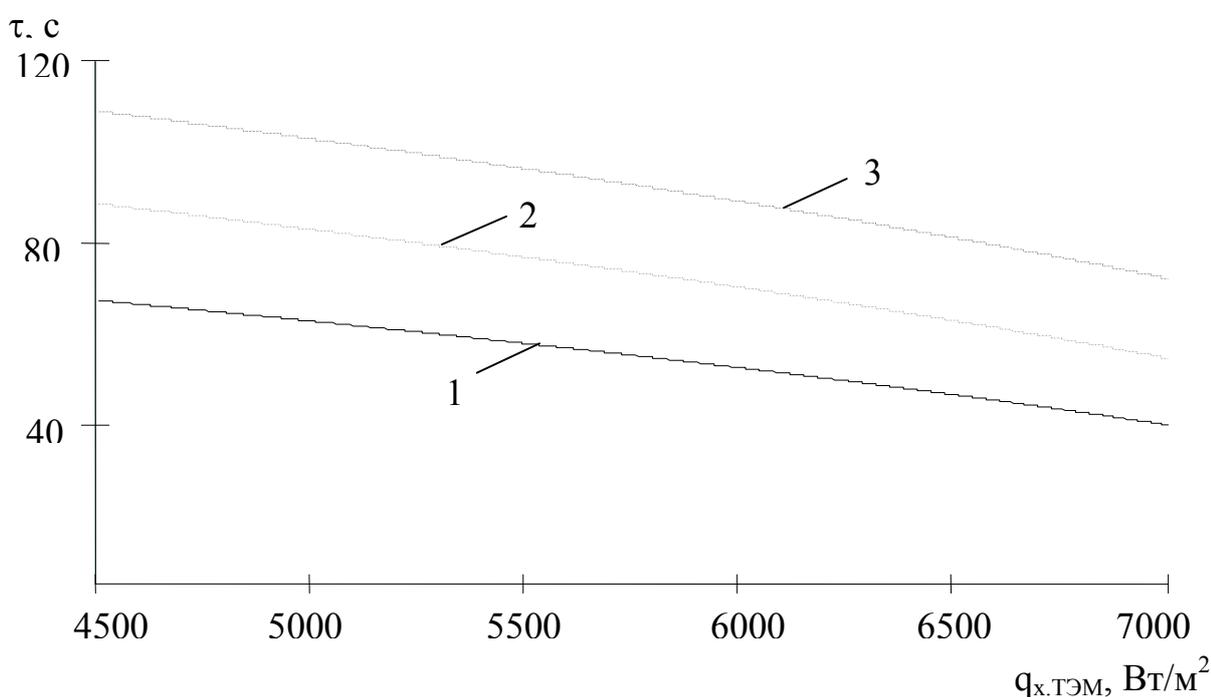


Рисунок 3 - Продолжительность полного замерзания влажной губки в зависимости от холодопроизводительности ТЭМ при различных $h_{\text{вг}}$

В соответствии с полученными данными следует, что при увеличении толщины губки растет длительность ее заледенения при неизменных значениях $q_{\text{х.ТЭМ}}$. Полученные графики показывают, что в среднем при увеличении

толщины губки на 1 мм время, необходимое для ее полного заледенения время увеличивается в 1,6 раз в диапазоне $q_{х.ТЭМ}$ от 4500 Вт/м² до 7000 Вт/м². При этом для максимального значения холодопроизводительности ТЭМ, равного 7000 Вт/м² для губки толщиной 3 мм, составляет 40 с.

Полученные данные позволяют сделать вывод о необходимости использования в ТЭС набора съемных ТЭМ различной мощности и эксплуатации того или иного типа последних в зависимости от габаритных размеров и массы ИО.

На основе численного эксперимента определено, что для необходимого диапазона мощностей ТЭС могут быть использованы стандартные ТЭМ, промышленно выпускаемые российскими фирмами производителями. В частности, как было указано выше, расчеты проводились для ТЭМ типа ТВ-38-1.0-0.8CHR. В соответствии с результатами численного эксперимента рабочий диапазон мощностей ТЭМ типа ТВ-38-1.0-0.8 CHR будет находиться в пределах от 3 до 8,5 Вт при среднем перепаде температур между спаями 55 К. При этом ток питания составляет 2÷6 А при потребляемой мощности от 10 до 35 Вт. Холодильный коэффициент изменяется в пределах от 0,2 до 0,58.

В третьей главе «Экспериментальные исследования термоэлектрической системы для извлечения инородных объектов из тела человека» представлены результаты натурных испытаний опытного образца ТЭС. Эксперимент проводился на специальном стенде, структурная схема которого показана на рисунке 4.

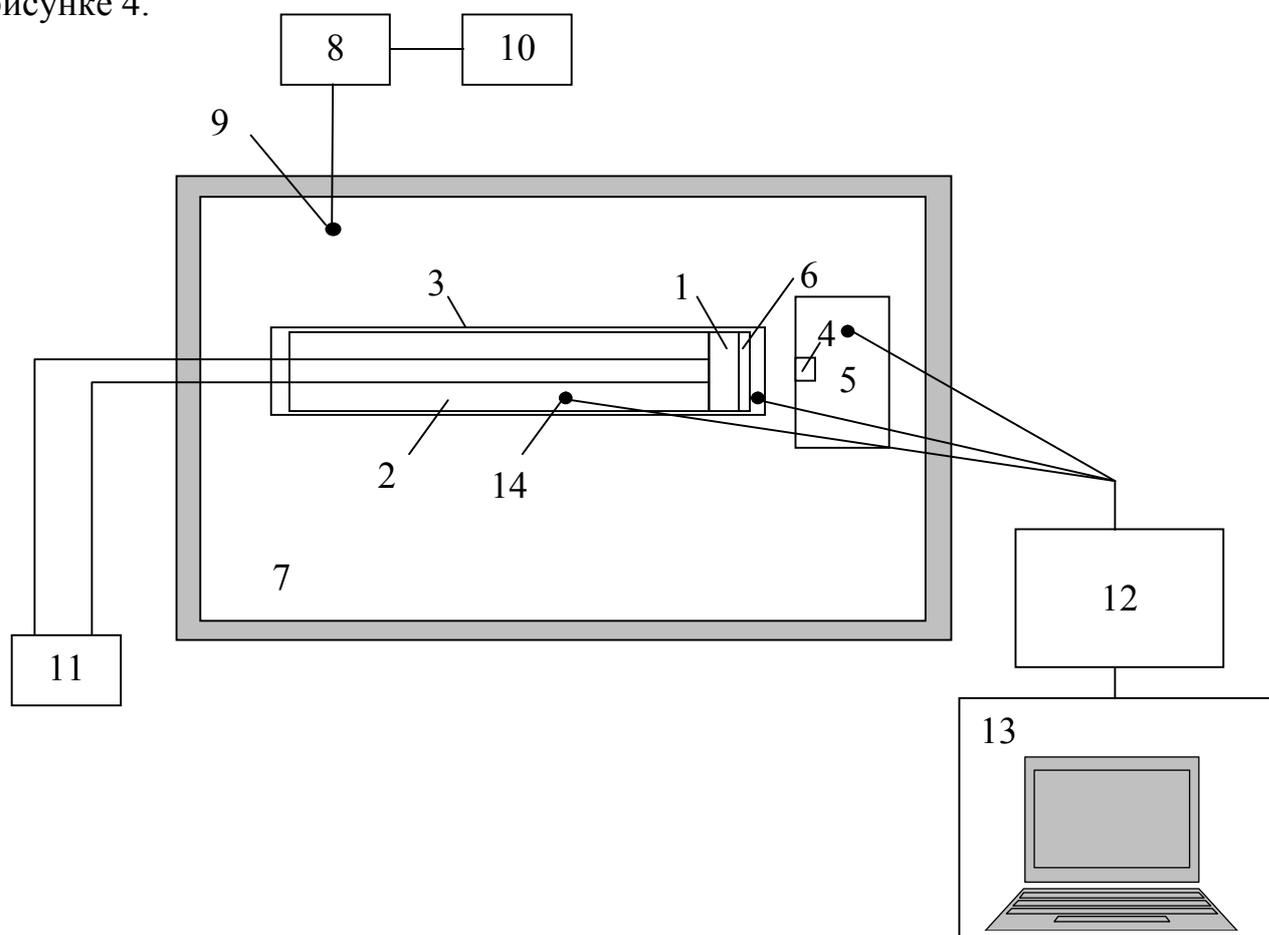


Рисунок 4 - Принципиальная схема экспериментального стенда

Объектом экспериментальных исследований являлся опытный образец системы, состоящий из исполнительного элемента - ТЭМ 1, закрепленного на торцевой поверхности латунного зонда 2, имеющего возможность перемещаться по направляющим в специальной пластиковой трубке 3. Зонд имеет цилиндрическую форму с сквозным отверстием вдоль центральной продольной оси, через которое производится вывод электрических контактов ТЭМ. При проведении натурных испытаний опытный образец ТЭС приводился в плотный механический и тепловой контакт с объектом воздействия - ИО (дюралюминиевый диск диаметром 15 мм и толщиной 4 мм) 4, находящемся в имитаторе биологического объекта 5.

Имитатор биологического объекта представлял собой некоторый объем, заполненный силиконом, внутри которого на определенной глубине размещался ИО. На поверхности ТЭМ, предназначенной для контакта с ИО 4 помещалась влажная губка 6, при полном промерзании выполняющая функцию ледяного моста между извлекаемым объектом и модулем.

Опытный образец ТЭС находился в климатической камере 7 с термостатируемым рабочим объемом. Температура и относительная влажность воздуха в камере регулировались управляющим блоком 8, связанным с датчиками температуры и влажности 9, показания которых выводились на соответствующее цифровое табло 10. Питание ТЭМ осуществлялось источником электрической энергии 11. Величины питающего электрического тока и напряжения в источнике энергии контролируются встроенными в него амперметром и вольтметром. Для измерения температуры в требуемых точках системы использовался многоканальный измеритель температуры ИРТМ 2402/МЗ 12, подключенный к ПЭВМ 13.

В ходе эксперимента определялись ток и напряжение на ТЭМ, температура в контрольных точках опытного образца ТЭС, температура в объеме климатической камеры. Одновременно проводилось визуальное наблюдение за процессом образования ледяного моста и примораживания ИО к ТЭС. Непосредственное фиксирование температуры осуществлялось медь-константановыми термопарами 14.

Получены графики изменения во времени температуры холодных и горячих спаев ТЭМ, в центре зонда при токах питания ТЭМ 4 А, 5 А, 6 А для работы системы в холостом режиме (без тепловой нагрузки). Как следует из приведенных зависимостей временной ход температурных кривых соответствует полученным ранее теоретическим результатам. С увеличением тока питания ТЭМ увеличивается его мощность, уменьшается температура холодных спаев, увеличивается температура горячих спаев и зонда, выполняющего роль теплоотвода. В частности при токе питания 6 А температура холодных спаев ТЭМ составляет 263 К, горячих - 320, зонда - 315 К при выходе системы на стационарный режим работы. Уменьшение тока питания ТЭМ соответственно приводит к повышению температуры холодных спаев и уменьшению температуры горячих спаев модуля. Снижение тока питания ТЭМ с 6 до 4 А увеличивает температуру холодных спаев до 268 К, а горячих - уменьшает до 316,5 К.

При контакте ТЭС с ИО за счет присоединенной теплоемкости температура холодных спаев ТЭМ увеличивается, при этом температура горячих спаев и зонда остается практически неизменной. Его наличие повышает температуру холодных спаев приблизительно на 3 К. В общем случае изменение температуры холодных спаев ТЭМ и, соответственно, протекание процесса заледенения губки будет напрямую зависеть от размеров ИО и его теплофизических параметров. При проведении эксперимента ИО представлял собой дюралюминиевый диск диаметром 15 мм и толщиной 4 мм, поэтому его наличие привело к относительно небольшому увеличению температуры холодных спаев модуля. Извлечение же более габаритных ИО из низкотеплопроводного материала может существенно сказаться на режиме работы системы.

Исследованы динамические характеристики ТЭС. Согласно результатам измерений, они достаточно высокие. Так, время выхода на режим холодных и горячих спаев ТЭМ составляет порядка 25 с, при этом температура в центре зонда стабилизируется примерно через 6 мин.

При визуальном наблюдении фиксировалась продолжительность полного заледенения влажной губки в зависимости от тока питания ТЭМ. В соответствие с результатами измерений при изменении тока питания ТЭМ с 4 до 6 А длительность полного промерзания влажной губки, и, соответственно, примораживания ИО к ТЭМ изменяется в пределах от 67 К до 40 с. Таким образом при использовании принятого типа ТЭМ продолжительность всей процедуры извлечения ИО из человеческого организма при токе питания 6 А занимает приблизительно 65 с. Увеличить это время возможно несколькими путями. Во-первых, выводом на рабочий режим ТЭС до введения в человеческий организм, во-вторых, использованием более мощного ТЭМ, рассчитанного на более высокие токи питания, в-третьих, путем повышения коэффициента теплопроводности губки за счет использования соответствующих материалов, либо принятии специальных конструктивных мер, ведущих к повышению коэффициента теплопроводности губки, в-четвертых, уменьшением температуры холодных спаев модуля при использовании более эффективной системы теплоотвода. Все перечисленные меры дадут возможность повысить быстродействие ТЭС, что в свою очередь, даст возможность оперативного проведения процедуры по извлечению ИО из тела человека, повысит комфортность и безболезненность данной операции.

По результатам экспериментов проведено сопоставление расчетных и опытных данных. Отличие опытных данных и расчета не превысило 8 %.

В четвертой главе «Разработка устройств для извлечения инородных объектов из тела человека» описаны конструкции приборов для извлечения ИО из полостей человеческого организма. Разработано три конструктивных варианта ТЭС, отличающиеся способом съема теплоты с горячих спаев ТЭМ. На рисунке 5, *а* - теплосъем производится за счет цельнометаллического радиатора, *б* - полого радиатора, заполненного плавящимся рабочим веществом, *в* - предварительно захолаживаемого цельнометаллического радиатора.



а)

б)

в)

Рисунок 5 - Внешний вид конструктивных варианты ТЭС для извлечения ИО из тела человека

Для каждой конструкции ТЭС произведен расчет соответствующей системы теплосъема, который показал целесообразность ее применения на практике.

В заключении сформулированы основные выводы и полученные научные результаты по диссертационной работе в целом.

В приложении к диссертации представлены акты внедрения результатов работы, награды и медали Международных и Всероссийских выставок, полученных диссертантом по результатам диссертационного исследования.

3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В процессе решения задач, поставленных в диссертационной работе, получены следующие основные результаты.

1. На основе анализа литературных источников установлено, что эффективным методом извлечения ИО из тела человека, позволяющим сократить продолжительность и повысить эффективность данного процесса, является метод основанный на примораживании последнего к охлажденному зонду.

2. Показано, что целесообразным для его реализации является использование в качестве источника холода в зонде ТЭМ, а процесс примораживания ИО к зонду следует осуществлять через влажную губку.

3. Разработана математическая модель ТЭС для извлечения ИО из тела человека методом примораживания, основанная на решении задачи теплопроводности, в том числе при фазовом переходе, с учетом теплофизических характеристик биологического объекта, ИО, ТЭМ.

4. В результате численного эксперимента получены графики изменения температуры в различных точках ТЭС при введении ее в организм человека для

извлечения ИО в зависимости от мощности ТЭС, параметров материалов модуля, внешних условий, определена продолжительность замерзания влажной губки для различных величин холодопроизводительности ТЭМ. При этом установлено, что в системе может быть использован стандартный ТЭМ мощностью от 4500 до 7000 Вт/м² при продолжительности процесса примораживания ИО к системе соответственно от 120 до 40 с.

5. Разработан опытный образец, экспериментальный стенд и методика проведения натуральных испытаний ТЭС для извлечения ИО из тела человека методом примораживания.

6. Доказана адекватность разработанной математической модели путем проведения комплекса натуральных испытаний, в результате которых расхождение полученных расчетных и экспериментальных не превысило 8 %.

7. Результаты диссертации внедрены в производство, лечебный процесс медицинского учреждения и учебный процесс вуза.

4. ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

1. Насрулаев, А.М. Математическая модель термоэлектрического устройства для извлечения инородных объектов из тела человека методом примораживания / Т.А. Исмаилов, О.В. Евдулов, А.М. Насрулаев // Медицинская техника. - 2021. - №3. - С. 49-52.

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

2. Насрулаев, А.М., Термоэлектрическая система для извлечения инородных объектов из тела человека / О.В. Евдулов, А.М. Насрулаев, С.Г. Магомедова, И.Ш. Миспахов, Н.А. Набиев // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. - 2019. - т. 46, №1. - С. 32-41.

3. Насрулаев, А.М. Температурное поле термоэлектрической системы для извлечения инородных объектов при ее введении в тело человека / А.М. Насрулаев, О.В. Евдулов // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. - 2020. - т. 47, №4. - С. 27-36.

4. Насрулаев, А.М. Математическое моделирование и теоретические исследования термоэлектрической системы для извлечения инородных объектов из тела человека методом примораживания / Т.А. Исмаилов, О.В. Евдулов, А.М. Насрулаев // Вестник Международной академии холода. - 2021. - №1. - С. 94-101.

5. Насрулаев, А.М. Конструкции термоэлектрических устройств для извлечения инородных объектов из тела человека методом примораживания / А.М. Насрулаев, О.В. Евдулов, Р.Ш. Казумов // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. - 2021. - т. 48, №3. - С. 16-25.

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

6. Насрулаев, А.М. Экспериментальный стенд для измерения характеристик термоэлектрической системы для извлечения инородных объектов из тела

человека методом примораживания / О.В. Евдулов, А.М. Насрулаев // Программно-техническое обеспечение автоматизированных систем (ПТОАС-2020): материалы Всероссийской молодежной НПК под ред. А.Г. Якунина, 16 декабря 2020 г. - Барнаул: АГТУ. - 2021. - С. 75-77.

7. Насрулаев, А.М. Автоматизированное устройство для извлечения инородных объектов из человеческого организма / О.В. Евдулов, А.М. Насрулаев // Измерение, контроль, информатизация: материалы 22-й Международной НТК, 21 мая 2021 г. - Барнаул: АГТУ. - 2021. - С. 41-43.

8. Насрулаев, А.М. Результаты математического моделирования термоэлектрической системы для извлечения инородных объектов из тела человека в пакете прикладных программ Mathcad / О.В. Евдулов, А.М. Насрулаев // Программно-техническое обеспечение автоматизированных систем (ПТОАС-2021): материалы Всероссийской молодежной НПК под ред. А.Г. Якунина, 9 декабря 2021 г. - Барнаул: АГТУ. - 2021. - С. 70-72.

9. Насрулаев, А.М. Термоэлектрическое устройство для извлечения инородных объектов из тела человека с использованием для отвода теплоты от горячих спаев термоэлементов плавящихся рабочих веществ / О.В. Евдулов, А.М. Насрулаев // Неделя науки - 2021: материалы XXXXII Итоговой научно-технической конференции преподавателей, сотрудников, аспирантов и студентов ДГТУ, 17-22 мая 2021 г. - Махачкала: ДГТУ, 2021. - С. 24-26.

10. Насрулаев, А.М. Математическое моделирование теплофизических процессов в термоэлектрическом устройстве для извлечения инородных объектов из тела человека методом примораживания / А.М. Насрулаев, О.В. Евдулов // Будущее машиностроения: сборник докладов 14 Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов (с международным участием), 21-24 сентября 2021 г. - М.: МГТУ им. Э.Н. Баумана, 2021. - С. 497-501.

11. Насрулаев, А.М. Термоэлектрическое устройство для извлечения инородных объектов из тела человека / О.В. Евдулов, А.М. Насрулаев, Д.В. Евдулов // Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке: сборник трудов X Международной НТК, 27-29 ноября 2021 г. - СПб.: Университет ИТМО, 2021. - С. 4-7.

IV. Полученные объекты интеллектуальной собственности:

12. Пат. 208170, Рос. Федерация: МПК⁷ А61F 7/10 Термоэлектрическое устройство для извлечения инородных объектов из тела человека / Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Насрулаев А.М., № 2021112909; заявл. 30.04.2021; опубл. 07.12.2021, Бюл. №34. - 4 с.

13. Пат. 209702, Рос. Федерация: МПК⁷ А61F 7/10 Термоэлектрическое устройство для извлечения инородных объектов из тела человека / Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Насрулаев А.М., № 2021112899; заявл. 30.04.2021; опубл. 18.03.2022, Бюл. №8. - 4 с.