

На правах рукописи



Аминова Ирина Юрьевна

**СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА ТЕПЛОГО
ВОЗДЕЙСТВИЯ В ОФТАЛЬМОЛОГИИ НА ОСНОВЕ
ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**

**Специальность: 05.04.03 - Машины и аппараты, процессы холодильной и
криогенной техники, систем кондиционирования
и жизнеобеспечения»**

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

Махачкала 2005

Работа выполнена в Дагестанском государственном техническом университете

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор Исмаилов Т.А.

Научный консультант:

доктор медицинских наук, профессор Алиев А-Г.Д.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Магомедов Д.А.,
кандидат технических наук, доцент Губа А.В.

Ведущая организация –

Государственное учреждение
научно-производственное объединение
"Дагестанский центр микрохирургии глаза"

Защита диссертации состоится "20" декабря 2005г. в 14⁰⁰ на заседании диссертационного совета К 212.052.01 Дагестанского государственного технического университета по адресу: 367015, Махачкала, пр. И.Шамиля, 70.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Дагестанского государственного технического университета.

Автореферат разослан "17" ноября 2005г.

Отзывы на автореферат присылать по адресу: 367015, РД, Махачкала, пр. И.Шамиля, 70, ученому секретарю диссертационного совета, к.т.н. Евдулову О.В.

Ученый секретарь
диссертационного совета, к.т.н.



Евдулов О.В.

2007-4

6643

2396722

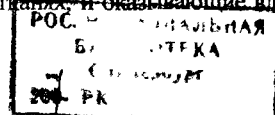
ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Открытие эффектов Пельтье и Зеебека заложило основы термоэлектрических преобразователей тепловой и электрической энергии в твердотельных устройствах, не использующих жидких и газообразных рабочих веществ и не имеющих движущихся частей. Развитие твердотельных преобразователей, которое сдерживалось низкой эффективностью термоэлектрических явлений в металлах, получило мощный импульс благодаря работам А.Ф.Иоффе и его школы в области разработки высокоэффективных полупроводниковых материалов (1950-е годы). Вместе с тем, в последние годы созданы новые предпосылки, определившие существенное повышение интереса к термоэлектрическим преобразователям. В первую очередь это связано с экологическими ограничениями на использование хлор-фторсодержащих рабочих веществ в парокомпрессионных холодильных машинах. Кроме того, появились обнадеживающие результаты исследований, направленных на повышение эффективности термоэлектрического вещества. Если за последние 30 лет эффективность термоэлектриков повысилась не более чем на 20%, то в исследованиях сверхрешеток с квантовыми ямами (QWSL-структур) удалось добиться увеличения термоэлектрической добротности сразу в 3-6 раз по сравнению с исходными материалами. Ожидается, что в ближайшем будущем будет достигнуто значение $z = 4$. Это существенно потеснит парокомпрессионное охлаждение в диапазоне холодопроизводительности вплоть до 500 Вт.

За последние два десятилетия проведен достаточно большой объем теоретических и экспериментальных исследований полупроводниковых термоэлектрических систем (ТЭС). Накопленный опыт по эксплуатации, обеспечению надежности и работоспособности в специфических условиях и другим технико-экономическим показателям подтверждает возможность широкого использования ТЭС.

Одной из областей применения термоэлектрических преобразователей энергии на сегодняшний день является медицина. Термоэлектрические устройства позволяют реализовать немедикаментозное лечение целого ряда заболеваний. Современное медикаментозное лечение столкнулось с таким феноменом, как постоянное приспособление инфекционных и вирусных микроорганизмов к существующим лечебным препаратам. Это требует поиска более сильных медикаментов, к которым, в свою очередь, появляется устойчивость у новых модификаций микроорганизмов. Однако сильнодействующие медицинские препараты часто имеют те или иные побочные эффекты, ограничивающие их применение. В связи с этим наиболее перспективным направлением исследований является восстановление утраченных функций и мобилизация защитных сил самого организма, что достигается с помощью различных физиотерапевтических внешних воздействий.

В современной офтальмологии физиотерапия является одним из существенных компонентов комплексного лечения больных с различными заболеваниями глаз. Действие лечебных физических факторов на живой организм обусловлено преобразованием их энергии (электрической, механической, тепловой и др.) в биологический процесс. Основу трансформации поглощенной энергии составляют физико-химические сдвиги, происходящие в клетках и тканях и оказывающие влия-



ние на биофизические, биохимические и физиологические процессы. Здесь надо отметить главенствующее влияние теплового воздействия. Энергия физического фактора может переходить в тепло, что послужило основанием к выдвижению тепловой теории в качестве теории первичного действия физических факторов.

Наряду с использованием повышенных температур в физиотерапии также широко применяется охлаждающее воздействие. Холодовое воздействие, включая местные механизмы терморегуляции, в первую очередь влияет на усиление защитных сил организма. В ответ на сигналы о снижении температуры тканей через механизм центральной нервно-эндокринной регуляции организма включаются механизмы несократительного термогенеза, что обуславливает ускорение обменных процессов. Вследствие этого температура в глубжележащих тканях повышается, что в свою очередь через систему терморепторов внутренних органов и центральную нервную систему приводит к компенсаторному увеличению микроциркуляции крови. Увеличивается проветривание функционирующих и количество действующих капилляров.

Существующие в настоящее время устройства для физиотерапии офтальмологических заболеваний не всегда обеспечивают возможность дозированной регуляции теплового воздействия, а если и обеспечивают, то только в сторону повышения температуры тканей. Понижения температуры глазного яблока достигают такими средствами, как пакетики со льдом, холодные примочки и компрессы. В этой ситуации, использование термоэлектрических модулей (ТЭМ) является наиболее перспективным в силу их использования в режиме реверса, когда устройство может быть использовано для теплового и "холодового" воздействия. А для адаптивного изменения параметров воздействия в ответ на изменение состояния биологического объекта требуется разработка именно биотехнической системы (БТС) теплового воздействия на глаз человека.

Актуальность рассматриваемой в работе проблемы непосредственно связана с необходимостью разработки и всестороннего исследования полупроводниковых ТЭС для контрастного воздействия на глазное яблоко человека теплом умеренно низкого и высокого потенциала.

Цель работы. Целью диссертационной работы является исследование и разработка биотехнической системы для теплового воздействия на передний отрезок глазного яблока человека, повышающей эффективность физиопроцедур для терапии различных офтальмологических заболеваний.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать БТС теплового воздействия на передний отрезок глазного яблока человека.
2. Разработать метод проведения лечебного теплового воздействия на передний отрезок глазного яблока человека.
3. Разработать теоретические основы ТЭС теплового воздействия на передний отрезок глазного яблока человека.
4. Провести экспериментальную проверку полученных теоретических результатов путем физического моделирования.
5. На основе проведенных исследований разработать различные конструктивные

варианты новых ТЭС для теплового воздействия на передний отрезок глазного яблока человека и внедрить их в терапевтическую практику.

Методы исследования. В процессе решения поставленных задач использованы принципы системного подхода, теория теплопроводности и конвективного теплообмена, теория фазовых переходов веществ, математическая статистика, численные методы решения дифференциальных уравнений и систем дифференциальных уравнений, методы машинной обработки экспериментальных данных.

Научная новизна. При решении задач, поставленных в диссертационной работе, получены следующие новые научные результаты:

1. Разработан метод теплового воздействия на передний отрезок глазного яблока человека, удовлетворяющий всем гигиеническим и лечебно-биологическим требованиям по точности регулировки температуры и временных параметров процедуры.
2. Предложена математическая модель теплового поля глазного яблока человека при тепловом воздействии на его передний отрезок, учитывающая сложную структуру глазного яблока и тепловые потоки от цилиарного тела и глазного дна.
3. Предложена математическая модель ТЭС для теплового воздействия на передний отрезок глазного яблока человека с термостабилизацией опорного спая ТЭМ, осуществляющейся рабочим веществом, имеющим стабильную температуру плавления.
4. Разработана ТЭС для теплового воздействия на передний отрезок глазного яблока человека, отличающаяся от аналогов возможностью регулировки температурных и временных параметров воздействия с чередованием теплового и "холодового" факторов.

Практическая ценность – разработан универсальный метод теплового воздействия на глаз человека и система для его реализации, сочетающая в себе как нагрев, так и охлаждение переднего отрезка глазного яблока умеренно высокими и низкими температурами, которые найдут применение в лечении целого ряда офтальмологических заболеваний.

Внедрение результатов. Разработанные в диссертационной работе методы, математические модели и устройства использовались при выполнении Федеральной целевой программы "Интеграция науки и высшего образования России" (Гос. контракт № Л0026/2034 от 01.11.2002г.).

Основные результаты диссертационной работы внедрены в клиническую практику клиники офтальмологии имени профессора Х.О.Булача (г. Махачкала), в клиническую практику ГУ НПО "Дагестанский центр микрохирургии глаза" (г. Каспийск), в клиническую практику 89 поликлиники ВМФ (Московская область, Дмитровский район, Горки 25), а также в учебный процесс Дагестанского государственного технического университета.

Апробация результатов работы. Работа в целом и отдельные ее результаты докладывались и обсуждались на первой республиканской научно-практической конференции "Изобретательство – практическому здравоохранению", Махачкала, 2001; на VIII Межгосударственном Семинаре «Термоэлектрики и их применение», Санкт-Петербург, ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, 2002; на Всероссийской научно-

технической конференции "Биотехнические и медицинские аппараты и системы". Махачкала, 2003; на IX научной сессии Международной академии информатизации, Махачкала, 2004; а так же на научно-технических семинарах кафедры "Теоретической и общей электротехники" ДГТУ с 1997 по 2005 гг.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 работ, из них 7 статей и 1 патент Российской Федерации на изобретение.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 202 наименования и приложений. Основная часть работы изложена на 105 страницах машинописного текста. Работа содержит 57 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, определена цель работы и сформулированы задачи исследования, научные положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая значимость результатов.

В первой главе проведен анализ современного состояния и путей развития термоэлектрического приборостроения, исследованы перспективы развития современного термоэлектрического приборостроения на предмет приложения к медицине и биологии. Составлен литературный обзор влияния теплового воздействия на состояние организма человека и его применение для лечения различных офтальмологических заболеваний. Проведен анализ проблем существующих в современной офтальмологии и связанных с методами и средствами терапевтического воздействия теплом и холодом на орган зрения человека.

Проведен анализ развития термоэлектрического приборостроения в настоящее время. За последние десятилетия эта отрасль получила значительное развитие, поскольку появилась реальная возможность создавать малогабаритные устройства для регулирования температурных режимов функционирования различной аппаратуры. Эти устройства позволяют получить локальные очаги холода, интенсифицировать процессы теплопередачи в сложных конструкциях, получать электрическую энергию различными альтернативными методами. Отмечены большие перспективы применения полупроводниковых термоэлектрических преобразователей в здравоохранении в силу ряда преимуществ электронных охладителей над другими.

Выполнена примерная оценка Российского и зарубежного рынка термоэлектрических модулей. Оценка проведена как по странам, так и по конкретным фирмам, производящим наибольшее количество ТЭМ в год. Проанализированы сферы и области применения термоэлектрического преобразования энергии. Отдельно рассмотрены области применения ТЭС непосредственно для биологии и медицины. Отмечено, что наибольшее применение ТЭС нашли в криотермоаппликации, которая широко используется в таких отраслях здравоохранения, как физиотерапия, хирургия, невропатология, косметология, профотбор. Разработана классификация ТЭС применительно к биомедицине. ТЭС используются в гематологии, биотехнологии, реаниматологии, стоматологии, анестезиологии и т.д.

Выявлен широкий спектр использования теплового фактора при лечении раз-

личных офтальмологических заболеваний. Причем, терапевтическое влияние оказывает воздействие не только повышенной температурой (гипертермия), но и пониженной (гипотермия). Офтальмологами общая гипотермия используется только при выполнении операций в ретробульбарной области, где могут располагаться опухоли, в частности ангиомы, варикозное расширение вен, аневризмы. Гораздо более часто используется местное охлаждение. Низкие температуры используются при экстракциях катаракт различной этиологии, при отслойке сетчатки и для ее профилактики в случае дегенеративных изменений, при удалении как магнитных, так и амагнитных инородных тел из глаза, при опухолях глаза и его кожных покровов, при различных поражениях конъюнктивы, склеры, роговицы, глаукоме и др. Особенно широко применяется в офтальмологии криоэкстракция катаракт различной этиологии.

Криотерапию, кроме общепринятых методов лечения различных заболеваний роговицы используют в виде криоаппликаций или криообдуваний. Ее применяют при герпетическом, травматическом, дистрофическом, химическом и других кератитах. При ожогах глаз применение низких температур также дает благоприятные результаты. Снижается экссудация и уменьшается патологическое воздействие экссудата на поврежденные клетки и окружающую их неповрежденную ткань, не возникают грубые необратимые изменения, так как ткани сравнительно легко переносят длительное воздействие низких температур.

Определенный терапевтический эффект от криотерапии получен при склери-тах и эписклери-тах. Благоприятные результаты отмечены при лечении криокоагуляцией кровоизлияний в стекловидное тело. Положительные результаты, простота методики, отсутствие осложнений позволяют рекомендовать криотерапию для лечения фолликулярных конъюнктивитов, невусов конъюнктивы, бородавчатых разрастаний на коже век, а также как вспомогательный метод при весеннем катаракте. Увеличение микроциркуляции при воздействии умеренно низкими температурами и, как следствие, увеличение количества действующих капилляров и расширение просвета функционирующих влечет за собой ускорение обменных процессов и уменьшает время заживления всех воспалительных процессов в тканях.

Доказано, что применение низкотемпературного теплового воздействия в комплексе с другими средствами – весьма эффективный метод лечения и профилактики поражений органа зрения, поэтому дальнейшие исследования в этом направлении целесообразны и актуальны.

Анализ назначаемых офтальмологами физиотерапевтических процедур показал, что тепловое воздействие имеет место практически при любой физиотерапевтической процедуре. Воздействие теплом на пораженные ткани осуществляется и при ультразвуковых процедурах, и при парафино- и грязелечении, и при УФЧ-терапии, и при электрофорезе и т.д. Действие рефлектора Минина, инфраружа и суховоздушного душа напрямую сводится к воздействию теплом на глаз и прилегающие ткани.

На основании вышеизложенного следует, что тепловое воздействие является одним из важных факторов при лечении самых различных офтальмологических заболеваний. Воздействие теплом используется и при заболеваниях роговицы, конъюнктивы, склеры, стекловидного тела, ожогах, воспалительных процессах и др.

Однако необходимо отметить, что для теплового воздействия используются примитивные устройства — лампы, грелки, ванночки, примочки, парафиновые аппликации и т.д. Все эти приспособления не позволяют осуществить направленное дозированное воздействие теплом.

Следовательно, в настоящее время сложилась ситуация, когда офтальмологам необходимо программируемое устройство, с высокой точностью воздействующее на глазное яблоко тепловым фактором, причем регулирующего его как в сторону повышения, так и в сторону понижения.

На основании проведенного анализа сформулированы цель и задачи работы.

Во второй главе разработана структура БТС теплового воздействия на глаз человека, приведенная на рисунке 1. Техническое звено системы содержит ТЭМ 1, связанный с блоком питания 2, который управляется микропроцессором 3. ТЭМ 1, воздействуя на контактную головку 4, регулирует температуру последней. Температура контактной головки контролируется блоком контроля температуры воздействия 5, что необходимо для исключения риска выхода температуры за допустимые пределы и повышения эффективности процедуры. Блок диагностической оценки 6 вырабатывает сигнал, отражающий текущее состояние глаза пациента в процессе воздействия, который поступает в блок сравнения 7, выдающий сигнал рассогласования при отклонении сигнала оценки состояния от уровня, соответствующего требуемому состоянию. Сигнал рассогласования поступает в ЭВМ 8, которая по определенной программе производит регулировку параметров воздействия и состояния биологического объекта. Таким образом, БТС теплового воздействия на глаз человека приобретает адаптивные свойства, так как в ответ на изменение состояния биологического объекта происходит изменение параметров технических звеньев, направленное на достижение требуемого результата. Присутствие в цепи управления оператора (лечащего врача) 9 позволяет вносить коррективы в процесс теплового воздействия, основанные на личном опыте лечащего врача и обоснованные конкретной ситуацией. Для увеличения точности регулировки температуры воздействия и уменьшения массогабаритных показателей в БТС теплового воздействия на глаз человека использована система стабилизации температуры опорного спая 10, работа которой основана на применении рабочего вещества со стабильной температурой плавления. Состояние системы стабилизации температуры опорного спая также контролируется микропроцессором 3.

Приведенная структурная схема БТС теплового воздействия на глаз человека содержит блоки, которые в настоящее время достаточно хорошо изучены. Блок диагностической оценки, блок сравнения, программный блок управления, блок питания и т.п. — это различные электронные схемы, всевозможные варианты которых широко освещены в периодической литературе. Ненсследованным на данный момент является само устройство для теплового воздействия и изменение теплового поля объекта воздействия во время процедуры.

В связи с этим, в настоящей работе разработаны математические модели: математическая модель системы стабилизации температуры опорного спая ТЭМ и математическая модель изменения теплового поля глаза в процессе воздействия.

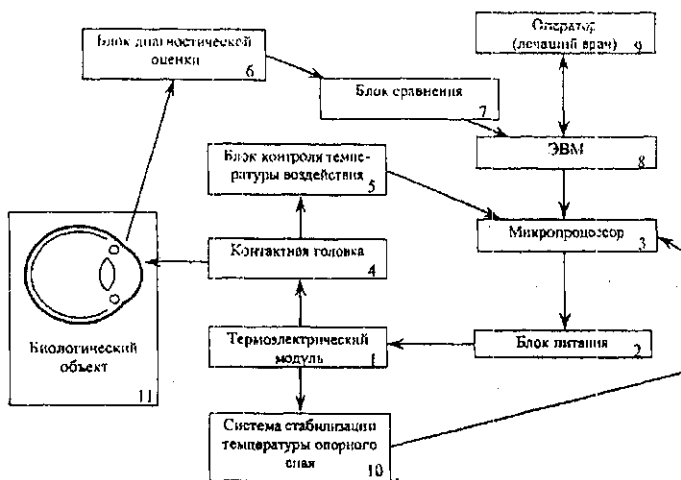


Рис. 1. Структурная схема БТС теплового воздействия на глаз человека.

Большой экономичностью, малыми габаритными размерами, простотой и точностью поддержания температуры на заданном уровне отличаются системы, основанные на использовании обратимых эндотермических процессов плавления, сопровождающихся поглощением тепла на границе раздела твердой и жидкой фаз. Конструкция системы стабилизации температуры опорного спая ТЭМ представляет собой цилиндрический радиатор, основанным своим находящийся в тепловом контакте с опорным спаем ТЭМ и опущенный в цилиндрическую емкость, заполненную рабочим веществом.

Для исследования процессов теплообмена в данной конструкции необходимо рассмотреть задачу Стефана. Однако, вследствие специфики конструкторского исполнения системы термостатирования, в жидкой фазе вещества (воде) возникает развитая естественная конвекция, которая в значительной степени влияет на процесс теплообмена. Наличие механизма конвективного переноса тепла на границе раздела твердой - жидкой фаз в ограниченном объеме значительно усложняет физическую картину процесса теплообмена и приводит к необходимости корректировки классической постановки задачи Стефана. Приняв коэффициенты теплоотдачи со стороны радиатора и поверхности раздела фаз постоянными до конца процесса, можно сформулировать математическую постановку задачи в следующем виде:

$$c_p \rho_p \xi_r \frac{dT_p}{dt} = q + K_{sp}(T_{sp} - T_p) + \alpha_p(T_1 - T_p) \quad (1)$$

$$q = \frac{4r_{in}}{S_r} S_{in} \quad (2) \quad c_1 \rho_1 \xi_r \frac{dT_1}{dt} - \alpha_p(T_1 - T_p) + \alpha_{sp}(T_{sp} - T_1) \quad (3)$$

$$c_2 \rho_2 \frac{dT_2}{dt} = \alpha_2 \frac{d^2 T_2}{dx^2}; \quad \xi \leq x \leq R \quad (4) \quad T_2|_{x=\xi} = T_{sp} \quad (5)$$

$$\frac{dT_2}{dx} \Big|_{x=R} = 0 \quad (6) \quad r \rho_2 \frac{d\xi}{dt} = \lambda_2 \frac{dT_2}{dx} \Big|_{x=\xi} + \sigma_{sp}(T_1 - T_{sp}) \quad (7)$$

где α_p, α_{sp} - соответственно коэффициенты теплоотдачи от радиатора к жидкости и от жидкости к поверхности раздела фаз; T_1 - средняя температура жидкой фазы; $(c, \rho, \delta)_p$ - соответственно теплоемкость, плотность и радиус радиатора; τ - время; K_{sp} - коэффициент теплоотдачи в окружающую среду; T_p - среднemasсовая температура радиатора; T_{sp} - температура окружающей среды; T_2 - температура твердой фазы; $q_{TЭМ}$ - удельное количество тепла (приведенное к единице площади), выделяемого в единицу времени на горячем спаяе термоэлектрического модуля; c_1, ρ_1, λ_1 - теплоемкость, плотность и теплопроводность жидкой (воды) и твердой (льда) фазы рабочего вещества, где индекс 1 соответствует жидкой фазе, а индекс 2 - твердой фазе; r - теплота плавления рабочего вещества; T_{sp} - температура плавления (кристаллизации) рабочего вещества; R - толщина слоя рабочего вещества; ξ - координата границы раздела фаз.

Решение системы дифференциальных уравнений (1) - (7) получено с помощью приближенного метода Л.С. Лейбензона, который заключается в том, что функции $T_1(x, \tau)$, $T_2(x, \tau)$ подбираются таким образом, чтобы они удовлетворяли начальным и граничным условиям. Подобранные таким образом функции подставляются в условие сопряжения на границе раздела фаз, полученное дифференциальное уравнение решается относительно ξ . Учитывая, что при развитой конвекции после достижения определенной толщины слоя расплава ξ_0 начинается интенсивное перемешивание горячих и холодных масс расплава, приводящее к выравниванию теплового поля всего расплава, то распределением температур по жидкой фазе можно пренебречь. В большинстве случаев процессы конвекции в жидкой фазе возникают по истечении достаточно небольшого промежутка времени, поэтому можно ввести понятие средней температуры жидкой фазы T_1 , остающейся постоянной на протяжении всего процесса плавления рабочего вещества. Для твердой же фазы рабочего вещества T_2 можно представить в виде:

$$T_2 = T_{2R} + (T_{sp} - T_{2R}) \cdot \left(\frac{R-x}{R-\xi} \right)^n, \quad T_{2R} = T_{2R0} + (T_{sp} - T_{2R0}) \frac{\xi - \xi_0}{R - \xi_0},$$

где T_{2R} , T_{2R0} - соответственно температуры при $x = R$ в любой момент времени τ и при $\tau = \tau_0$; ξ_0 - толщина расплава при $\tau = \tau_0$; τ_0 - время, при котором начинает наблюдаться линейное изменение температуры T_{2R} от времени; n - параметр, определяемый экспериментально.

Основываясь на данном методе, получим следующую систему обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} c_p \rho_p \xi_p \frac{dT_p}{d\tau} = q + K_{sp}(T_{sp} - T_p) + \alpha_p(T_1 - T_p) \\ c_1 \rho_1 \xi \frac{dT_1}{d\tau} = \alpha_p(T_1 - T_p) + \alpha_{sp}(T_{sp} - T_1) \\ \frac{d\xi}{d\tau} \left[c_2 \rho_2 \left(\frac{-2n(T_{sp} \cdot R - T_{2R0} \cdot R) + \xi(T_{2R0} - T_{sp})}{(n+1)(\xi_0 - R)} \right) + r \rho_2 \right] = \alpha_{sp}(T_1 - T_{sp}) \end{cases}, \quad (8)$$

решение которой легко осуществить численным способом.

Данное выражение может быть существенно упрощено, если учесть, что после определенной толщины расплава, равной $\xi_0 = 0,001 - 0,002$ м, температура T_p быстро стабилизируется и остается постоянной до тех пор, пока не расплавится все вещество. Эта особенность (после достижения толщины ξ_0) позволяет считать процесс теплообмена горячего спая ТЭМ с жидкой фазой рабочего вещества стационарным. В этом случае, основываясь на выражении (8), можно записать:

$$T_p = \frac{q + K_{cp} T_{cp} + \frac{\alpha_{xp} \cdot \alpha_p \cdot T_{xp}}{\alpha_{xp} + \alpha_p}}{K_{cp} + \alpha_p - \frac{\alpha_p^2}{\alpha_{xp} + \alpha_p}}, \quad (9) \quad \frac{d\xi}{d\tau} (C (A + B \xi) + D) = E. \quad (10)$$

$$\text{где } A = T_{xp} R - T_{2R0} R, \quad B = T_{2R0} - T_{xp}, \quad C = \frac{-2 n \cdot c_2 \rho_2}{(n+1)(\xi_0 - R)}, \quad D = r \rho_2,$$

$$E = \alpha_{xp} \left[\frac{\frac{\alpha_p}{\alpha_p + K_{cp}} (q + K_{cp} T_{cp}) + \alpha_{xp} T_{xp}}{\alpha_p + \alpha_{xp} - \frac{\alpha_p^2}{\alpha_{xp} + \alpha_p}} - T_{xp} \right]$$

Решая уравнение (10) получим следующее алгебраическое соотношение для определения толщины расплава при наличии конвективных потоков в жидкой фазе:

$$\left(\frac{D + CA}{E} (\xi - \xi_0) + \frac{CB(\xi^2 - \xi_0^2)}{2E} \right) = \tau - \tau_0, \quad (11)$$

Расчет по приведенной выше математической модели проводился в пакете прикладных программ MATHCAD 11.

Результаты численного эксперимента по предложенной модели приведены на рис. 2 и 3. Расчетные зависимости показали, что длительность полного проплавания рабочего вещества, соответствующая длительности терапевтической процедуры, лежит в необходимых пределах при использовании незначительного количества рабочего агента (согласно расчетным графикам его значение лежит в пределах 30-120 мин. при толщине рабочего вещества 0,025-0,04 м). Данное обстоятельство указывает на возможность проектирования малогабаритной термостатирующей системы, в которой в качестве системы охлаждения может быть использован стандартный термоэлектрический модуль.

Для нахождения теплового поля глазного яблока составлена геометрическая модель объекта исследования. Для упрощения задачи была выбрана цилиндрическая система координат z, r, θ , что обосновано тем, что в некотором приближении глазное яблоко представляет собой фигуру вращения, ось симметрии которой совпадает с оптической осью. Если ось z провести через оптическую ось глаза, то по координате угла θ свойства всех сред будут постоянными. Это позволяет нам свести задачу к плоскости $z-r$ (точнее полуплоскости $r > 0$). Таким образом, мы свели объемную задачу к двумерной, решение которой значительно проще.

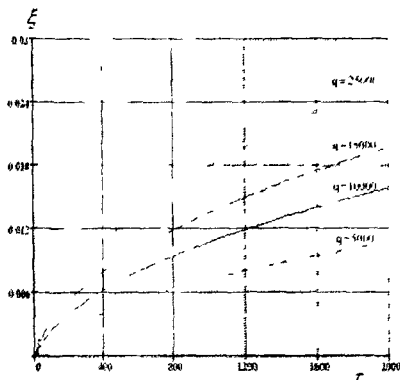


Рис 2 Зависимость координаты границы раздела фаз от времени при различных тепловых потоках на цилиндре.

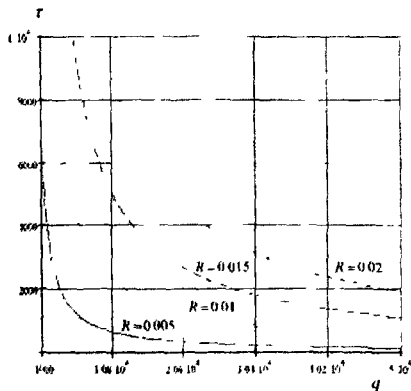


Рис 3 Зависимость времени полного прожаривания рабочего вещества от теплового потока, выделяемого на опорном слое ТЭМ для различных значений R параметра вязкости с рабочим веществом.

Для полного математического описания теплового поля глазного яблока к дифференциальному уравнению теплопроводности в цилиндрической системе координат были добавлены условия однозначности, которые содержат геометрические, физические, граничные и временные условия. Свойства сред глаза были описаны усредненными значениями удельной теплоемкости и удельной теплопроводности, а для цилиндров тела и глазного дна было введено значение объемной плотности тепловыделений как для областей, богатых кровеносными сосудами.

Решение полученной системы уравнений осуществлялось численно с помощью метода конечных элементов. По данной методике осуществлен численный расчет теплового поля глазного яблока. Расчет был проведен как для стационарного, так и для нестационарного случаев. Для стационарной задачи при подводе к переднему отрезку теплового потока $q = -1000 \text{ Вт/м}^2$, расчетное значение температуры на переднем отрезке составило 284 К (температура понизилась на 25 К), но после хрусталика понижение температуры уже не столь ощутимо – всего 4 К. При подводе к переднему отрезку теплового потока $q = +300 \text{ Вт/м}^2$ температура склеры у переднего отрезка повысилась до 319 К (46 °С). Дальнейшее повышение температуры в реальной терапевтической процедуре чревато ожогом органа зрения.

Однако стационарная задача не дает полного представления о времени достижения данной температурной картины. Для ответа на этот вопрос была рассмотрена нестационарная задача, в которой к переднему отрезку подводился переменный тепловой поток. Как показали расчеты, при воздействии на передний отрезок переменным тепловым потоком, не достигается максимальный размах температур в характерных точках глазного яблока. Гораздо лучший эффект достигается при циклическом изменении температуры переднего отрезка глазного яблока (60 секунд температура переднего отрезка составляет 283 К, 60 секунд - 313 К). Здесь процесс стабилизируется практически через 100 сек., размах температур максимален и находится в требуемых пределах. Изменение температуры цилиндров тела для этого случая максимально (диапазон изменения температуры составляет 15 К).

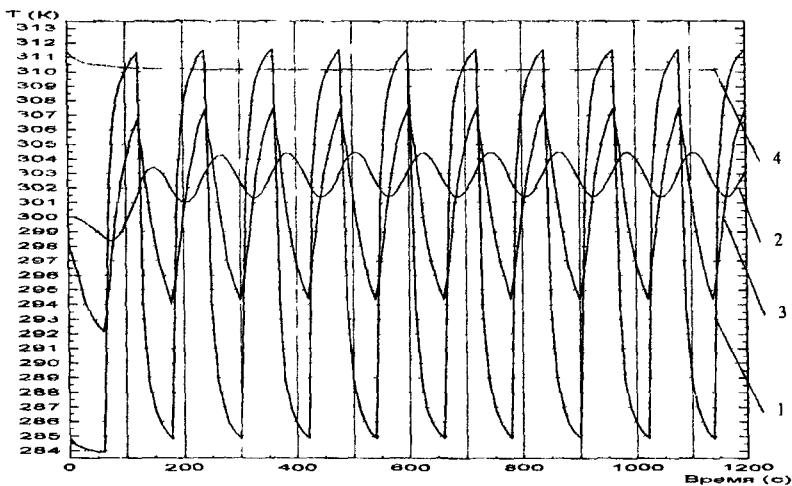


Рис 4 Зависимость температур характерных точек внутри глазного яблока от времени при циклическом тепловом воздействии на передний отрезок (60 секунд $T = 283 \text{ K}$, 60 секунд $T = 313 \text{ K}$)

- 1 – передний отрезок (внутренняя граница склеры), 2 – середина хрусталика,
3 – середина цилиарного тела, 4 – глазное дно

Таким образом, получены выражения, описывающие все теплофизические процессы, протекающие как в ТЭС теплового воздействия на глаз человека, так и в самом глазу. Проведенные расчеты по разработанным математическим моделям доказали целесообразность разработки ТЭС теплового воздействия на глаз человека.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований ТЭС теплового воздействия на глазное яблоко человека. Экспериментальные исследования проводились с целью подтверждения адекватности математических моделей практике и правильности сделанных на их основе выводов.

Для проведения экспериментальных исследований ТЭС теплового воздействия на глаз человека был собран стенд на базе компьютера Pentium III - 600 МГц и измерителя технологического многоканального ИРТМ 2024. Экспериментальные исследования проводились в теплоизолированной климатической камере, обеспечивающей поддержание температуры в пределах от 283 до 343 К с точностью 1,0°C и относительной влажности от 30% до 98%. Измерение температур в контролируемых точках осуществляется с помощью медь - константановых термопар, опорные спаи которых помещались в сосуд Дьюара с тающим льдом. Значения термоЭДС с этих термопар снимались с помощью многоканального измерителя ИРТМ 2024 и через последовательный порт поступали в ЭВМ. Питание ТЭМ осуществляется программируемым блоком питания. В качестве тепловой нагрузки для ТЭС теплового воздействия на глаз человека использовалась желатиновая модель глазного яблока, помещенная на две трети в жидкость с температурой 37 °С.

Во время эксперимента измерялись ток и напряжение питания ТЭМ, температура в контрольных точках и время.

Были получены следующие зависимости: изменение температуры алюминии-

вого радиатора во времени; зависимость средней температуры радиатора от мощности, выделяемой на опорном спае ТЭМ; зависимость времени полного проплавления рабочего вещества от теплового потока, выделяемого на опорном спае ТЭМ; изменения температур контактной головки и радиатора во времени при циклических переключениях направления тока питания ТЭМ; распределение температуры вдоль оптической оси модели глазного яблока при тепловом потоке на переднем отрезке -1000 Вт/м^2 и $+300 \text{ Вт/м}^2$; зависимости температур характерных точек глазного яблока человека от времени при циклическом воздействии тепловым потоком на передний отрезок глаза; зависимости температур характерных точек внутри глазного яблока от времени при циклическом воздействии температурой на передний отрезок глазного яблока; кривые времени нагрева от 7°C до 40°C в зависимости от температуры рабочего вещества; кривые времени охлаждения от 40°C до 7°C в зависимости от температуры рабочего вещества.

На рис. 5 представлено изменение температуры алюминиевого радиатора во времени. Видно, что форма экспериментальной кривой практически повторяет форму теоретической. Запаздывание в стабилизации температуры радиатора обусловлено тем, что в теоретической кривой мы не учитывали тепловое сопротивление радиатора, а также тем, что в реальном процессе конвекция жидкости не настолько развита, как в теоретическом. Этим же и обусловлен некоторый пик в промежутке от 4 до 5 мин. Резкий подъем температуры радиатора после 20 мин. свидетельствует о полном проплавлении рабочего вещества.

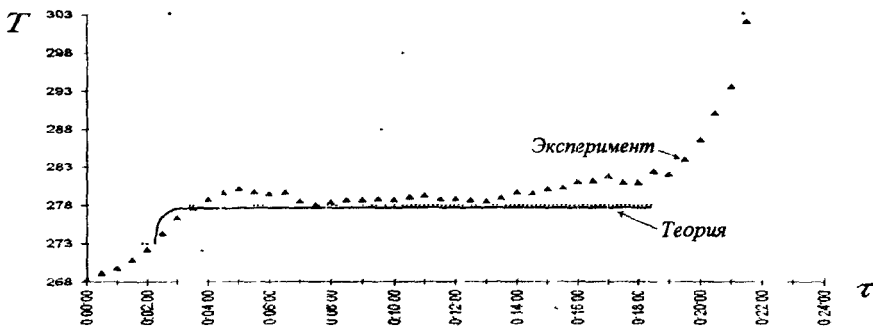


Рис. 5 Изменение температуры алюминиевого теплообменника во времени.

При исследовании поля температур модели глазного яблока при воздействии на передний отрезок было получено распределение температур вдоль оси модели глаза при заданной температуре на переднем отрезке, а так же изменение температуры во времени в контрольных точках модели глаза при динамическом изменении температуры на переднем отрезке.

При анализе полученных экспериментальных данных необходимо учитывать, что при проведении реальных процедур для пациентов, страдающих офтальмологическими заболеваниями, устройство не будет работать в стационарном режиме. Основным режимом работы данной ТЭС является режим теплового массажа, когда осуществляется чередование холодного воздействия на передний отрезок глазного яблока с тепловым. Соответственно, ТЭМ некоторый (заданный лечащим врачом)

временной интервал выделяет тепло на опорном спае, а в следующий временной интервал — поглощает, и так до окончания времени всей процедуры. В связи с этим, реальное время полного проплавления рабочего вещества еще больше увеличивается, что было доказано экспериментально.

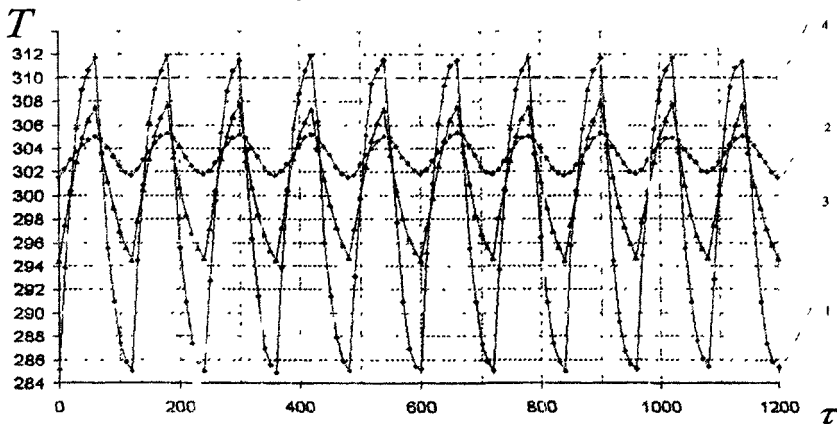


Рис 6 Экспериментальная зависимость температур характерных точек внутри глазного яблока от времени при циклическом тепловом воздействии на передний отрезок (60 секунд $T=283$ К, 60 секунд $T=313$ К)

- 1 — передний отрезок (внутренняя граница склеры); 2 — середина хрусталика,
3 — середина цилиарного тела, 4 — глазное дно

На рис. 6 представлены полученные зависимости температур характерных точек внутри глазного яблока от времени при циклическом воздействии температурой на передний отрезок глазного яблока. Как видно из данного рисунка, температуры контролируемых точек от цикла к циклу поддерживаются на одном и том же уровне, амплитуда теплового массажа в характерных точках максимальна и не выходит за границы допустимых пределов. Следовательно, данный режим регулирования теплового воздействия на глаз является самым оптимальным.

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили правомочность выбранных математических моделей и доказали целесообразность разработки ТЭС теплового воздействия на передний отрезок глазного яблока человека.

Сопоставление опытных данных с расчетными значениями показало их хорошую сходимость. Максимальное отклонение экспериментальных и теоретических зависимостей составило не более 15 % на всем диапазоне измерений.

В четвертой главе описаны конструкции разработанных ТЭС для теплового воздействия на передний отрезок глазного яблока.

Разработанная и изготовленная автором система для лечения тепловым воздействием офтальмологических заболеваний состоит из двух отдельных частей. Это ТЭС локального теплового воздействия на передний отрезок глазного яблока и микропроцессорный блок контроля и управления процедурой воздействия. Структурная схема ТЭС теплового воздействия на передний отрезок глазного яблока приведена на рис.7. Внешний вид всей системы в целом приведен на рис.8.

Разработанная ТЭС теплового воздействия на передний отрезок глазного

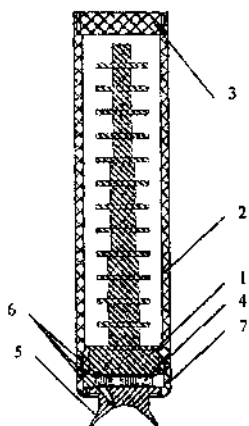


Рис 7 Принципиальная схема ТЭС теплового воздействия на передний отрезок глазного яблока

яблока содержит алюминиевый радиатор 1, который своим основанием вкручен в полый цилиндр 2, изготовленный из фторопласта. С другой стороны полый цилиндр 2 закрыт пробкой 3, изготовленной из того же материала, что и цилиндр 2. Основание радиатора 1 находится в тепловом контакте с опорным спаем ТЭМ 4. Рабочий спай ТЭМ 4 находится в тепловом контакте с контактной головкой 5, изготовленной из меди и повторяющей форму глазного яблока человека. Та поверхность контактной головки, что непосредственно контактирует с тканями человеческого организма, покрыва оксидом титана, нанесенного методом вакуумного напыления. Температура воздействия, а также, температура опорного спая ТЭМ контролируется с помощью датчиков температуры 6, представляющих собой платиновые датчики сопротивления фирмы Honeywell серии HEL-700. Прижим контактной головки 5, ТЭМ 4 и радиатора 1 обеспечивается с помощью колпачка 7.

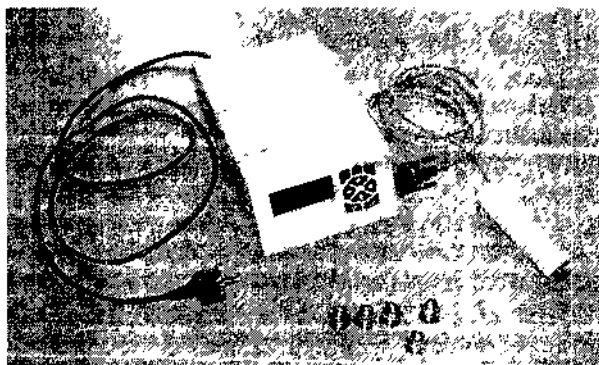


Рис 8 Внешний вид ТЭС теплового воздействия на передний отрезок глазного яблока с блоком управления

Данная конструкция ТЭС локального теплового воздействия на передний отрезок глазного яблока была разработана после проведения комплекса лабораторных испытаний различных конструктивных вариантов и консультаций с практикующими врачами-офтальмологами (д.м.н., профессор, гл. офтальмолог РД, зав. кафедрой офтальмологии ДГМА А-Г.Д.Алиев и д.м.н., доцент ДГМА М.И. Исмаилов). В некоторых случаях терапии заболеваний требуется воздействовать на орган зрения человека через закрытое веко, т.е. транспальпебрально. Полученные в результате работы теоретический и экспериментальный материалы позволили создать ТЭС для транспальпебрального теплового воздействия (рис. 9) и ТЭС для транспальпебрального массажа глаз человека.

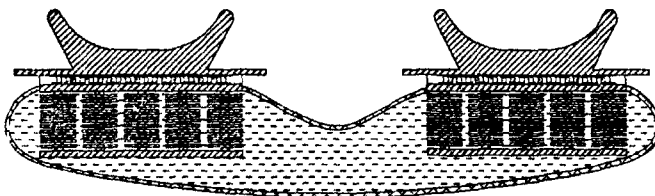


Рис 9 Принципиальная схема ТЭС для транспальпебрального теплового воздействия на глаз человека

Все устройства просты в обслуживании и могут быть использованы в любой офтальмологической клинике.

В заключении сформулированы основные выводы по диссертационной работе в целом.

В приложении к диссертации приведены фрагменты расчетов в пакете прикладных программ MATHCAD 11 и некоторые таблицы экспериментов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

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

- разработана БТС теплового воздействия на глаз человека, обладающая простотой обслуживания и высокой надежностью, позволяющая проводить адаптивное управление физическими параметрами в зависимости от состояния биологического объекта и обеспечивающая требуемую точность их поддержания;
- разработаны теоретические основы расчета ТЭС теплового воздействия на передний отрезок глазного яблока, в которых заданный уровень опорной температуры системы определяется путем учета конвективных потоков в жидкой фазе вещества с фиксированной температурой плавления.
- разработана математическая модель теплового поля глазного яблока при тепловом воздействии на передний отрезок, учитывающая сложную структуру глазного яблока и тепловые потоки от цилиарного тела и глазного дна, а также контактной головки воздействующего устройства;
- доказана адекватность разработанных математических моделей путем проведения комплекса экспериментальных исследований, в результате которых расхождение полученных теоретических и экспериментальных данных не превысило 15%;
- разработаны медико-технические требования к ТЭС теплового воздействия на передний отрезок глазного яблока человека, позволившие произвести техническое воплощение его рабочего варианта. Получен Патент РФ на изобретение [1];
- проведена клиническая апробация ТЭС теплового воздействия на глазное яблоко человека в условиях ГУ НПО "Дагестанский центр микрохирургии глаза" и офтальмологической клиники им. Х.О Булача (г.Махачкала), которая показала их эффективность при решении задач нестационарной регуляции температуры с заданной точностью для повышения результативности лечебных процедур.

Комплекс проведенных исследований и их результаты будут являться научной основой при разработке подобных систем в технике медицинского приборостроения.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Пат 2197197. А61F7/00 Термоэлектрическое полупроводниковое устройство для теплового воздействия на передний отрезок глазного яблока человека / Исмаилов Т.А., Алиев А-Г.Д., Аминова И.Ю., Евдулов О.В., Исмаилов М.И. (РФ) - № 2001102961/14; Заявл. 2001.01.31; Опубл. 2003.01.27, Бюл.№3 - 5с.
2. Исмаилов Т.А. Использование гипотермии в офтальмологии и перспективы применения термоэлектрических полупроводниковых устройств при диагностике и лечении глазных заболеваний / Исмаилов Т.А., Бреус И.Ю., Алиев А-Г.Д. // Вестник ДГТУ. Техн. науки, Махачкала, 1998. – Вып. №2 – С.107-110.
3. Аминова И.Ю. Термоэлектрическое устройство для лечения офтальмологических заболеваний / Аминова И.Ю., Алиев А.-Г.Д // Изв. вузов. Приборостроение, тем. вып.: применение полупроводниковых термоэлектрических устройств.- 2000. - Т.43, №5. – С.24-29.
4. Аминова И.Ю. Термоэлектрическое полупроводниковое устройство для офтальмотермометрии / Аминова И.Ю., Магомедов К.А., Алиев А.-Г.Д // Материалы первой республиканской научно-практической конференции "Изобретательство – практическому здравоохранению". Махачкала, 19 мая 2001г. – Махачкала, 2001. – С. 62-64
5. Исмаилов Т.А. Математическая модель термоэлектрического устройства для теплового воздействия на передний отрезок глазного яблока человека с опорным тепловым демпфером / Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Аминова И.Ю. // Термоэлектрики и их применение: Материалы докл. VIII Межгос. семинара, Санкт-Петербург, ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, 2002. – С. 336-344.
6. Термоэлектрическое полупроводниковое устройство для теплового массажа глаз человека / Исмаилов Т.А., Алиев А-Г.Д., Аминова И.Ю. и др. //Сборник тезисов докладов Всероссийской научно-техн. конференции "Биотехнические и медицинские аппараты и системы". Махачкала, 2003г. С. 93-94
7. Аминова И.Ю. К вопросу моделирования теплового трансальвеолярного массажа глаз посредством термоэлектрических преобразователей / Аминова И.Ю., Евдулов О.В. Аминов Г.И. // Изв. вузов Приборостроение.- 2004 - Т.47, №7. – С.38-42
8. Термоэлектрическое полупроводниковое устройство для теплового воздействия на передний отрезок глазного яблока человека / Исмаилов Т.А., Аминова И.Ю. и др. //Любительский сборник научных трудов кафедры офтальмологии ДГМА "Современные технологии диагностики и лечения в офтальмологии", Махачкала, 2004г. С.127-129
9. Аминова И.Ю. Моделирование устройства для температурного воздействия на глаз человека / Аминова И.Ю., Аминов Г.И. // Международная академия информатизации. Материалы девятой научной сессии (сборник статей). Махачкала, 24 ноября 2004г. – Махачкала, 2004. –С 166-170
10. Аминова И.Ю. Экспериментальные исследования термоэлектрических устройств для температурного воздействия на глаз человека./ Аминова И.Ю., Исмаилов Т.А., Аминов Г.И.//Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки, 2005, приложение. №3, С. 38-45.
11. Аминова И.Ю. Математическая модель температурного воздействия на глаз человека при помощи термоэлектрического преобразователя / Полупроводниковые термоэлектрические приборы и преобразователи. Сборник научных трудов. Махачкала, ИИЦ ДГТУ, 2005г. С.124-132.

Аминова Ирина Юрьевна

**СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА ТЕПЛОГО
ВОЗДЕЙСТВИЯ В ОФТАЛЬМОЛОГИИ НА ОСНОВЕ
ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**

Формат 60 x 84 1/32 Бумага офсетная
Печать ризограф Усл п л 1,3
Тираж 100 экз Заказ № 227

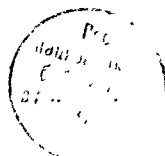
Отпечатано в ИПЦ ДГТУ.
367015, г.Махачкала, пр.Имам Шамия, 70.

05. 11 2007

РНБ Русский фонд

2007-4

6673



2007-4-6673