

На правах рукописи



Кондратьев Андрей Валерьевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА АППАРАТОВ
МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ
ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ
ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СПЛОШНОГО СПЕКТРА**

Специальности:

1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы

2.2.12. Приборы, системы и изделия медицинского назначения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: **Камруков Александр Семенович**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Плазменные энергетические установки», заведующий отделом ЭМ-4.3 НИИ ЭМ МГТУ им. Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты: **Акишев Юрий Семенович**

доктор физико-математических наук, профессор, начальник лаборатории ГНЦ РФ «Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований»

Васильева Татьяна Михайловна

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры физической химии ФГАОУ ВО «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное учреждение «Государственный научный центр — Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна»

Защита диссертации состоится «23» декабря 2026 г. в 13.00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.331.17 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр. 1, ГК, зал Ученого совета МГТУ им. Н.Э. Баумана. С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.331.17, также просим отправлять электронные копии отзывов на электронную почту kharit@bmstu.ru.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, к.т.н.



Харитонов С.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В настоящее время низкотемпературная плазма находит широкое применение в технических системах и устройствах, решающих важнейшие государственные задачи в различных областях жизнедеятельности, включая медицину и высокотехнологичное здравоохранение. В последние годы проблема лечения ран и раневой инфекции резко обострилась из-за широкого распространения патогенной микрофлоры с множественной лекарственной устойчивостью, а также роста контингента людей пожилого возраста и людей с пониженным иммунитетом, склонных к различным сопутствующим заболеваниям (диабет и т.п.) и имеющих ограничения к применению фармакологических методов лечения. Особую остроту эта проблема приобретает в условиях расширения военных конфликтов.

Указанные факторы стимулируют исследования и разработки новых технологий лечения ран, обладающих высокой терапевтической эффективностью. Мировые тренды развития данного сегмента медицинских технологий указывают на перспективность физических методов терапии ран, в том числе реализуемых с помощью различных плазменных технологий. В этом контексте существенный интерес представляют терапевтические методы с использованием современных плазменно-оптических технологий.

Степень разработанности темы исследования. Представительным сегментом таких технологий является ультрафиолетовая (УФ) терапия, поскольку УФ излучение обладает максимальными фотохимическим и фотобиологическим действиями, обусловленными значительной энергией УФ фотонов. Как правило, в современных фототерапевтических технологиях и аппаратах используются источники излучения с узким эмиссионным спектром и с низкой интенсивностью (маломощные лазеры, ртутные и эксимерные лампы, светодиоды и др.).

Новыми, сравнительно малоизученными в биомедицинской сфере, но потенциально эффективными источниками оптического, в том числе, УФ излучения являются газоразрядные импульсные ксеноновые лампы (ИКЛ), ранее широко применявшиеся для оптической накачки лазеров, в стробоскопии и фотографии. Их отличительными физическими особенностями являются высокая интенсивность и преимущественно сплошной эмиссионный спектр, непрерывно перекрывающий спектральную область от коротковолнового УФ диапазона до средневолнового инфракрасного (ИК) диапазона. Сегодня технологии с использованием ИКЛ активно исследуются для применения в пищевой промышленности; в медицинской области ИКЛ применяются в установках для обеззараживания воздуха и поверхностей.

Первые экспериментальные исследования возможностей применения ИКЛ для лечения ран и дерматологических заболеваний проведены в МГТУ им. Н.Э. Баумана в 90-х годах прошлого столетия (Камруков А.С. и др. / Патент РФ 2008042, 1994 г.; Камруков А.С. и др. // Безопасность жизнедеятельности. 2003. №1. С.32-40). Впоследствии были разработаны аппараты на основе ИКЛ, в которых в качестве физического фактора воздействия на биоткани рассматривалось высокоинтенсивное УФ излучение сплошного спектра, вырезаемое с помощью светофильтров из интегрального эмиссионного спектра лампы (установка «Пакт», аппараты «Мелитта-01»).

Однако, как показывает анализ фотобиологических явлений, в ранозаживляющем процессе активную роль играет не только УФ излучение, но и другие компоненты электромагнитного спектра – излучение видимого и ИК диапазонов, т.е. практически весь спектр излучения ИКЛ. Таким образом, сплошное широкоспектральное – от УФ до ИК диапазона - оптическое излучение высокой интенсивности, генерируемое ИКЛ, можно рассматривать как новый, практически не исследованный, физический фактор воздействия на биообъекты, включая поврежденные биологические ткани. Новая технология, основанная на применении такого излучения, требует разработки соответствующего теоретического обоснования, инженерных расчетно-оптимизационных моделей, аппаратного обеспечения и нуждается в экспериментальной валидации.

Проектирование и создание медицинских аппаратов импульсной широкоспектральной фототерапии невозможно без надежных методов расчета и оптимизации электротехнических, эксплуатационных и излучательных характеристик ИКЛ, учитывающих динамику расширения плазмы с образованием ударных волн в ксеноне, переходы разреженного газа в плазменное состояние (процессы ионизации), радиационные явления с учетом неидеальности плазмы и др. Существующие на сегодняшний день расчетно-теоретические модели ИКЛ разрабатывались в основном для расчета и оптимизации ламп для накачки лазеров и для осветительных целей. Лампы же для фотомедицины требуют детального исследования (как теоретического, так и экспериментального) и оптимизации таких режимов их функционирования, при которых обеспечиваются одновременно высокий выход излучения в УФ области спектра и приемлемый для практических применений ресурс работы. На сегодняшний день отсутствуют достаточно простые и надежные инженерные методы и расчетно-теоретические модели ИКЛ, позволяющие в комплексе решить поставленную задачу

Объектами исследований являются газоразрядные (плазменные) импульсные ксеноновые лампы для фотомедицины и фототерапевтические аппараты для лечения ран на их основе.

Предмет исследований – радиационно-газодинамические процессы в электроразрядной ксеноновой плазме, обеспечивающие реализацию новой высокоинтенсивной широкоспектральной оптической терапии ран.

Цель исследований - применение высокоинтенсивного оптического излучения широкого спектра как нового физического фактора воздействия на биообъекты для повышения эффективности фототерапевтических методов лечения ран.

Задачи исследования:

1. Провести расчетно-теоретические и экспериментальные исследования радиационно-газодинамических процессов в электроразрядной ксеноновой плазме, энергетических и спектрально-яркостных характеристик ИКЛ для фототерапевтических применений. Выполнить анализ и обобщение данных по их излучательным характеристикам.

2. Разработать экспериментальные методы исследования динамических и энергетических характеристик импульсной электроразрядной плазмы и определить излучательные характеристики малогабаритных ИКЛ в энергетических режимах функционирования, оптимальных для биомедицинских применений.

3. Провести анализ современных фототерапевтических технологий и технических средств лечения инфицированных ран с целью обоснования базовых принципов новой медико-технической концепции фототерапии ран.

4. Разработать пилотные образцы фототерапевтических аппаратов высокоинтенсивного оптического облучения на основе ИКЛ и экспериментальные методы исследования их динамических и энергетических характеристик. Определить дозовые параметры воздействия оптического излучения аппаратов на биообъекты.

5. Провести доклинические исследования антимикробной и ранозаживляющей эффективности разработанных аппаратов и сравнение с эффективностью лечения ран традиционными медикаментозными средствами и аппаратами с источниками узкополосного УФ излучения низкой интенсивности.

Научная новизна исследования

1. Разработан и апробирован новый подход к априорному выбору оптимальных режимных параметров ИКЛ и электротехнического контура, основанный на анализе радиационно-газодинамических процессов в электроразрядной ксеноновой плазме и обеспечивающий приемлемые для медико-биологических технологий спектрально-энергетические и ресурсные характеристики; сформулированы требования к параметрам газоразрядной плазмы ИКЛ, обеспечивающие необходимые спектральные характеристики излучения плазмы и ресурс работы ИКЛ

2. Разработаны экспериментальные методы исследования динамических и энергетических характеристик импульсной электроразрядной плазмы и получены новые экспериментальные данные по электротехническим и излучательным характеристикам малогабаритных ИКЛ в энергетических режимах функционирования, оптимальных для биомедицинских применений.

3. Предложена новая фототерапевтическая технология лечения ран и дерматозов, основанная на использовании высокоинтенсивного импульсного оптического излучения широкого спектра. Способ лечения защищен патентом РФ на изобретение. Новизна принятых научно-технических и конструкторских решений подтверждена двумя патентами РФ. В результате проведенных доклинических исследований показана более высокая бактерицидная и терапевтическая эффективность аппаратов серии «Зарница» по сравнению с применением традиционных медикаментозных средств (Левомеколь, хлоргексидин) и аппаратов с источниками узкополосного УФ излучения низкой интенсивности.

4. Разработаны и созданы образцы медицинских аппаратов высокоинтенсивного импульсного оптического облучения (аппараты серии «Зарница»), реализующих новую фототерапевтическую технологию лечения и предназначенных для эксплуатации как в условиях полевых госпиталей и мобильных средств скорой помощи, так и в стационарных организациях.

Научная и практическая значимость работы состоит в следующем.

- В результате проведенных исследований радиационно-газодинамических процессов в электроразрядной ксеноновой плазме установлены основные закономерности по влиянию конструктивных параметров трубчатых ИКЛ и контура на электротехнические и излучательные характеристики ламп.

- Разработанный методологический подход и созданная инженерная модель ИКЛ позволяют проводить априорный выбор оптимальных режимных параметров ламп, обеспечивающих приемлемые спектрально-энергетические и ресурсные характеристики ИКЛ.

- Разработаны научно-технические основы создания широкого класса аппаратов медико-биологического назначения, в которых ИКЛ выступают в качестве источников оптического, включая УФ, излучения.

- Показана принципиальная возможность за счет применения аппаратов на основе ИКЛ повышения эффективности лечения ран различной этиологии в условиях широкого распространения патогенной микрофлоры с множественной лекарственной устойчивостью.

- Исследованный новый физический фактор воздействия на биологические ткани - высокоинтенсивное оптическое излучение широкого спектра - обладает выраженным биоцидным,

противовоспалительным и ранозаживляющим действием и обеспечивает более раннее развитие регенерации тканей по сравнению с низкоинтенсивным непрерывным УФ излучением узкого спектра.

Методология и методы исследования. В рамках настоящего исследования применен интегративный методологический подход, включающий разработку физических моделей радиационно-газодинамических процессов в электроразрядной ксеноновой плазме, последующее численное моделирование ключевых параметров создаваемых изделий на основе ИКЛ, проведение серии физических и медико-биологических экспериментов и детальный анализ их результатов.

Реализация результатов работы. Работа проводилась в соответствии с планами научно-исследовательских работ кафедры плазменных энергетических установок (Э-8) МГТУ им. Н.Э. Баумана и отдела ЭМ 4.3 НИИ энергетического машиностроения (НИИЭМ) МГТУ им. Н.Э. Баумана. Теоретические положения и практические результаты диссертационной работы используются в учебном процессе кафедры. Разработанные фототерапевтические аппараты серии «Зарница» используются при проведении научных медико-биологических исследований в Российском университете медицины Минздрава России, Главном военном клиническом госпитале им. Н.Н. Бурденко и Первом московском государственном медицинском университете имени И.М. Сеченова.

Положения, выносимые на защиту

- Результаты расчетно-теоретических и экспериментальных исследований радиационно-газодинамических процессов в электроразрядной ксеноновой плазме и излучательных характеристик малогабаритных ИКЛ, предназначенных для использования в фототерапевтических аппаратах.

- Разработанные экспериментальные методы исследования динамических и энергетических характеристик импульсной электроразрядной плазмы и новые экспериментальные данные по излучательным характеристикам малогабаритных ИКЛ в энергетических режимах функционирования, оптимальных для биомедицинских применений.

- Критерии выбора оптимальных параметров газоразрядных ИКЛ для биомедицинских применений.

- Результаты конструкторских разработок и экспериментального исследования характеристик аппаратов импульсного оптического облучения, реализующих новую фототерапевтическую технологию.

- Результаты доклинических исследований бактерицидной и терапевтической эффективности разработанных фототерапевтических аппаратов и обоснование базовых принципов новой технологии лечения ран.

Достоверность и обоснованность научных положений определяется применением общепринятых в физике плазмы и в медицине методов исследований, использованием в экспериментах калиброванной (поверенной) измерительной аппаратуры и подтверждается хорошим совпадением полученных различными методами экспериментальных данных и удовлетворительным их согласованием с результатами расчетно-теоретических исследований и численного моделирования.

Личный вклад автора. На основании анализа литературных источников и состояния проблем исследуемой области автором самостоятельно сформулированы направления, цель и задачи диссертационного исследования плазменных источников излучения, а также новой технологии лечения ран. Автор лично участвовал в проведении большинства экспериментальных исследований, обработке и анализе полученных данных. В расчетно-теоретических работах, выполненных в соавторстве, личный вклад автора заключается в постановке задач, в выборе исходных данных, анализе полученных результатов и формировании выводов и практических рекомендаций.

Апробация результатов

Результаты диссертационных исследований обсуждены на Всероссийской конференции «Физика низкотемпературной плазмы» (Казань, 2023), Всероссийской научно-практической конференции "Лазерная медицина в России: прошлое, настоящее, будущее" (Москва, 2023), Международном военно-техническом форуме «Армия-2023» (Москва, 2023), 16-й Международной конференции «Газоразрядная плазма и ее применение» (Уфа, 2023), IX Международном конгрессе EFRE (Томск, 2024), III Российском конгрессе (РКММИ–2025), (Москва, 2025), XLIX Академических чтениях по космонавтике («Королёвские чтения – 2025»), (Москва, 2025), 7-я Международная молодежная конференция по радиоэлектронике, электротехнике и энергетике (REEPE-2025), Москва, 2025.

Публикации

По материалам диссертационной работы опубликовано 12 научно-технических статей, из них 10 статей, индексируемых в международной базе цитирования Scopus, и 2 статьи в журналах из перечня ВАК. Общий объем опубликованных работ – 11,2 п.л. Также получено 2 патента на изобретение и 2 патента на полезную модель.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, практических рекомендаций, списка литературы и приложений. Общий объем работы 215 страниц, включая 191 страницы основного текста, содержащего 101 рисунок и 11 таблиц. Список литературы включает 198

источников информации на 21 странице. Приложение на 3 страницах включает 3 таблицы с результатами измерений.

Содержание диссертационного исследования

Во **введении** кратко формулируются актуальность темы, цель и задачи исследований, научная новизна, описаны научная и практическая значимости работы и выносимые на защиту положения.

Глава 1 посвящена анализу современных фототерапевтических технологий и технических средств лечения инфицированных ран и дерматозов. Анализ проводится с целью последующего обоснования актуальности и базовых принципов новой медико-технической концепции и формирования требований к перспективным источникам оптического излучения для фототерапии.

Рассмотрено современное аппаратное обеспечение фототерапевтических методов лечения с более подробным анализом существующих УФ аппаратов местного облучения, которые можно рассматривать в качестве аналогов по назначению разрабатываемым аппаратам. Анализ показал, что в подавляющем большинстве современных УФ аппаратов в качестве источников УФ излучения используются ртутные лампы низкого давления, а современным трендом является внедрение медицинских изделий с экологически чистыми (безртутными) источниками УФ излучения, среди которых в качестве перспективных рассматриваются эксимерные лампы и УФ светодиоды. Все эти источники излучения характеризуются узкополосным эмиссионным спектром и являются низкоинтенсивными источниками излучения. Эти физические факторы могут снижать эффективность фототерапевтических процедур.

Новым подходом к фототерапии ран является использование сплошного широкоспектрального – от УФ до ИК диапазона - оптического излучения высокой интенсивности (десятки и сотни ватт на квадратный сантиметр). Такое излучение генерируется ИКЛ. Представлено обоснование потенциальных преимуществ предлагаемого подхода к терапии. Отмечается, что на сегодняшний день опыт использования ИКЛ в медицине практически отсутствует, а терапевтических аппаратов соответствующего назначения на основе ИКЛ на рынке оборудования нет.

В **главе 2** проведен анализ имеющихся экспериментальных и теоретических данных о физических процессах в ИКЛ и определены основные газо-термодинамические и спектральные характеристики плазмы в импульсных лампах, предназначенных для применения в фототерапевтических аппаратах. Показана актуальность разработок надежных инженерных методов расчета ИКЛ.

На основе проведенного анализа выполнен выбор конструктивных параметров ИКЛ и схемных решений электротехнического контура для фототерапевтических аппаратов и разработана полуэмпирическая

инженерная модель расчета спектрально-энергетических и эксплуатационных характеристик трубчатых ИКЛ. Модель основана на фундаментальных представлениях о физике импульсных разрядов в газах и результатах хорошо апробированных теоретических и экспериментальных исследований ИКЛ, полученных, в том числе, в данной работе.

Предложен подход к определению компромиссных режимных параметров трубчатых ИКЛ, обеспечивающих приемлемые для новых технологий спектрально-энергетические и ресурсные характеристики ламп и разработаны критерии выбора оптимальных параметров лампы и разрядного контура. Исходными данными являются конструктивные параметры лампы: внутренний диаметр колбы d , длина межэлектродного промежутка l и холодное давление ксенона p_0 ; результатом – диапазоны оптимальных параметров контура: емкости конденсаторной батареи, зарядного напряжения и характерного времени выделения энергии.

С использованием разработанной расчетно-теоретической модели проведен анализ влияния конструктивных и режимных параметров ИКЛ на характеристики излучения в УФ, включая коротковолновую (КУФ) ($\Delta\lambda=200\ldots300$ нм), области спектра. Определены диапазоны предельных яркостных и энергетических характеристик ИКЛ в режимах функционирования, оптимальных для биомедицинских применений. Показано, что при фиксированных конструктивных параметрах лампы (габаритах и начальном давлении) ее основные электротехнические и спектрально-энергетические характеристики можно представить в виде функциональных зависимостей от поверхностной плотности мощности разряда P_s . Установлено, что при фиксированных d и p_0 яркостные температуры и КПД излучения в КУФ области спектра определяются только P_s и не зависят от l , а при фиксированном значении P_s лампы большего диаметра имеют большую энергетическую эффективность как источники КУФ излучения.

В результате проведенных расчетно-теоретических исследований выявлены основные закономерности по качественному и количественному влиянию конструктивных параметров лампы и контура на энергетические и спектрально-яркостные характеристики ИКЛ.

Глава 3 посвящена экспериментальным исследованиям излучательных характеристик ИКЛ для биомедицинских применений.

В разделе 3.1 дается описание экспериментального стенда и измерительно-диагностического комплекса для исследования характеристик ИКЛ, включая изложение применяемых методик обработки сигналов, в том числе и разработанных автором. Экспериментально исследованы характеристики малогабаритных стандартных ИКЛ с $d=5\ldots7$ мм и $l=60\ldots120$ мм, которые можно рассматривать в качестве источников излучения для реализации новых медицинских технологий. Исследования проведены в широком диапазоне энергетических режимов: запасаемая

электрическая энергия W_0 варьировалась от 10 до 300 Дж; времена энерговклада в разряд $\tau_{0,5} = 10...100$ мкс, поверхностная плотность мощности $P_s = 25...380$ Вт/см², фактор нагрузки $\beta = 0,03... 0,5$.

В разделе 3.2 рассмотрены электротехнические и спектрально-яркостные характеристики ИКЛ ИНП-5/60 в режиме, соответствующем рабочему режиму в разрабатываемых фототерапевтических аппаратах серии «Зарница» ($C_0=20$ мкФ, $U_0=1,4$ кВ, $W_0=19,6$ Дж, $\tau_{0,5} \approx 22$ мкс - базовый режим). Исследованы особенности динамики электрических и излучательных характеристик ксеноновой плазмы, спектрального распределения энергии излучения ИКЛ в широком диапазоне длин волн.

При максимальном токе $I_{max} \approx 1,0$ кА пиковая электрическая мощность контура составляла $\sim 0,9$ МВт с эффективностью энерговклада в лампу $\sim 82\%$. Максимум мощности излучения лежит в области $\lambda_{max} \sim 350$ нм (рисунок 1). Энергия излучения в диапазоне $\Delta\lambda = 0,2...25$ мкм составила $\sim 42\%$ от W_0 или $\sim 50\%$ от электрической энергии, вложенной в плазму; доля энергии УФ излучения в суммарном спектре составляет $\sim 27\%$, на видимый диапазон (400...780 нм) приходится $\sim 53\%$ всей энергии. Согласно фотоэлектрическим измерениям, максимальные яркостные температуры излучения лампы T_λ наблюдаются в ИК области спектра и составляют ~ 9800 К; в КУФ области зарегистрированные яркостные температуры составили $T_{КУФ} \approx 8700$ К (рисунок 2). Рост T_λ с увеличением λ излучения обусловлен ростом оптической плотности плазмы в лампе. В центре сильных спектральных линий Xe^+ $T_\lambda \sim 11400$ К (рисунок 4).

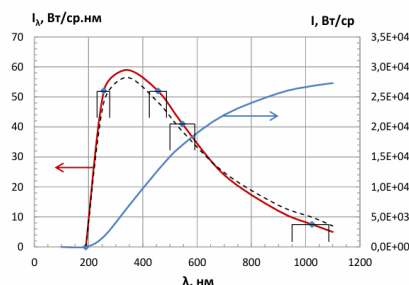


Рисунок 1. Спектральная сила излучения ИКЛ ИНП-5/60 (красная кривая) и интегральная сила излучения в спектральном диапазоне $\Delta\lambda = 200 ... \lambda$ (синяя кривая). Пунктирная кривая соответствует расчетному спектру лампы при экспериментальном значении разрядного тока $I_{max} = 1034$ А

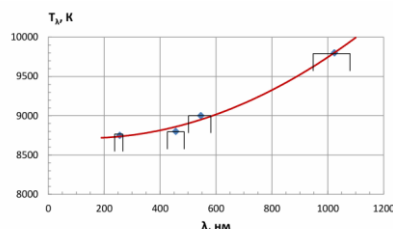


Рисунок 2. Максимальные яркостные температуры излучения ИКЛ ИНП-5/60 на различных длинах волн (фотоэлектрические измерения).

Незамкнутые прямоугольники показывают области спектральной чувствительности фотоприемников ФЭП «Спектр-01К»

Исследована структура эмиссионного спектра ИКЛ (рисунок 3). В базовом режиме работы лампы полная энергия УФ излучения составляет $\sim 12\%$ от W_0 , в КУФ области спектра излучается половина всей УФ энергии

~6,1% от W_0 , В актуальных поддиапазонах УФ спектра УФ-С, УФ-В и УФ-А излучаются соответственно ~5,1%, 2,1% и 4,7% от W_0 .

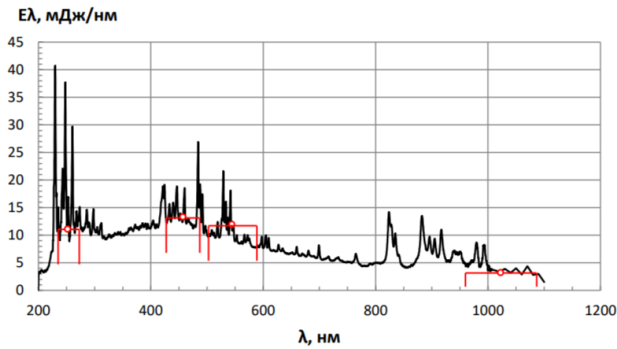


Рисунок 3. Спектр излучения лампы ИНП-5/60, зарегистрированный спектрометром Solar ТП. Незамкнутыми прямоугольниками показаны измерения ФПУ «Спектр-01К»

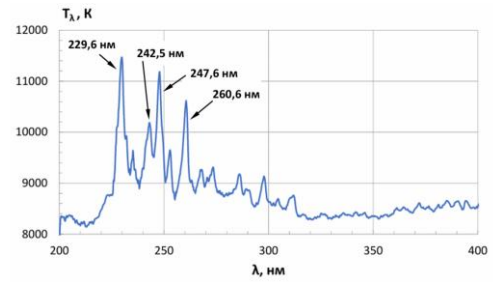
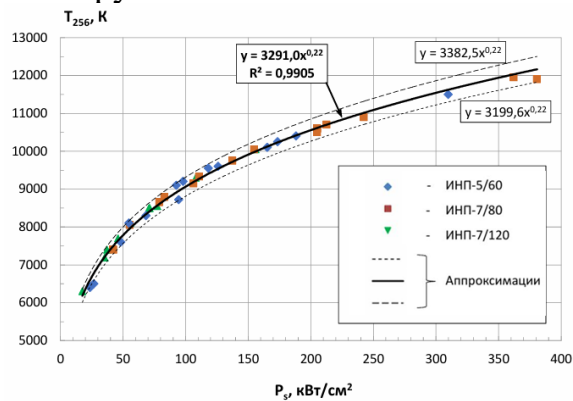
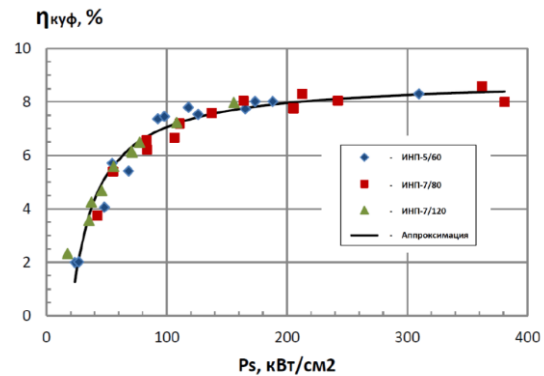


Рисунок 4. Яркостные температуры лампы ИНП-5/60 в УФ области спектра (спектрометрические измерения)

Раздел 3.3 посвящен анализу и обобщению результатов проведенных многопараметрических экспериментальных исследований малогабаритных ИКЛ (рисунок 5). Получены эмпирические зависимости для максимального разрядного тока I_{max} , максимальных яркостных температур $T_{КУФ}$ и потоков излучения с поверхности лампы $P_{СКУФ}$, а также кпд излучения ИКЛ в КУФ области спектра $\eta_{КУФ}$ от основных конструктивных



а



б

Рисунок 5. Зависимости яркостной температуры T_{256} (а) и спектрального кпд $\eta_{КУФ}$ (б) малогабаритных ИКЛ в КУФ области спектра от поверхностной плотности электрической мощности разряда P_s

параметров лампы - ее геометрических размеров (в см) и электротехнического контура - P_s (в Вт/см²):

$$I_{max} \approx (1,45 \pm 0,05) \cdot d^{4/3} \cdot P_s^{0,67}, \text{ А};$$

$$T_{КУФ} \approx (720 \pm 20) \cdot P_s^{0,22}, \text{ К};$$

$$P_{СКУФ} \approx 10^3 \cdot (9 \cdot 10^{-5} \cdot P_s - 1,8), \text{ Вт/см}^2;$$

$$\eta_{\text{КУФ}} \approx \left(9 \cdot 10^{-2} - \frac{1800}{P_s} \right) \cdot 100, \text{ \%}.$$

Выражения применимы для трубчатых ИКЛ с $d = 0,5 \dots 0,7$ см и $p_0 = 400$ мм рт.ст. в диапазоне изменений $P_s = 25 \dots 400$ кВт/см².

Полученные экспериментальные выражения могут быть использованы при разработке широкого класса аппаратов, в которых ИКЛ выступают в качестве источников УФ излучения.

В главе 4 приводится описание основных конструктивных особенностей разработанных фототерапевтических аппаратов импульсного оптического облучения серии «Зарница» и результаты экспериментальных исследований их характеристик, актуальных для проведения биомедицинских процедур.

Эффективность аппарата в целом в значительной степени зависит от эффективности его светотехнической системы (СТС). В связи с этим с использованием программы TracePro проведено численное моделирование и детальная оптимизация СТС медицинских аппаратов для импульсной широкоспектральной фототерапии. Определены факторы, влияющие на эффективность передачи энергии излучения лампы к облучаемой поверхности и однородность распределения излучения по световому пятну. Показано, что при использовании диффузного отражателя его форма слабо (в пределах ± 10 %) влияет на характеристики полей облученности, в связи с чем в качестве оптимальных рекомендованы форм-факторы отражателей, более технологичные в изготовлении: для осесимметричных рефлекторов – конический (аппараты «Зарница-А»), для рефлекторов традиционной схемы облучения – трапецеидальный (аппараты «Зарница-АВ» и «Зарница-М»).

На рисунке 6 представлен внешний вид созданных аппаратов.



Аппарат «Зарница-А»



Аппарат «Зарница-М»



Аппарат «Зарница-АВ»

Рисунок 6. Аппараты высокоинтенсивного импульсного оптического облучения серии «Зарница»

Аппарат «Зарница-А» является экспериментальным образцом, предназначенным для отработки инженерных решений и оценки режимных параметров воздействия на биообъекты. Опытно-промышленные образцы аппаратов «Зарница-М» и «Зарница-АВ» интегрировали результаты проведенных доклинических исследований и

разрабатывались для использования в стационарных клинических и амбулаторных условиях («Зарница-М») и в условиях полевых госпиталей и мобильных станций скорой помощи («Зарница-АВ»). Аппараты состоят из сервисного блока и облучателя, обеспечивающего обработку пораженных участков площадью до 100 см². В облучателях аппаратов использована ИКЛ типа ИФП2-5/60 со средней электрической мощностью 100 Вт.

В результате проведенных исследований определены основные спектрально-энергетические характеристики разработанных аппаратов и дозовые параметры облучения раневых поверхностей с актуальных для лечебных процедур дистанций воздействия (2...10 см) (Таблица 1).

Таблица 1. Результаты измерений спектрально-энергетических характеристик аппаратов «Зарница-М» и «Зарница-АВ»

Тип аппарата	$\tau_{0,5}$ мкс	$E_{сУФС}$, мДж/см ²			$E_{сЗ}$, мДж/см ²		
		L , см			L , см		
		2	5	10	2	5	10
Зарница-М	21,4±2,8	3,1±1,2	1,9±0,7	0,9±0,4	31,5±3,7	18,9±2,4	8,6±0,9
Зарница-АВ	16,3±1,1	3,3±0,6	1,8±0,2	0,8±0,1	30,5±4,0	14,7±1,7	6,0±0,3

Показано, что облучение биообъектов аппаратами «Зарница» носит высокоинтенсивный характер – с расстояния 5 см от облучателя характерные импульсные облученности в интегральном спектре составляют 500 Вт/см² и более (в УФ-С диапазоне – более 50 Вт/см²), что в 10³...10⁴ раз превышает значения облученностей, создаваемых существующими на сегодняшний день фототерапевтическими аппаратами.

Глава 5 посвящена доклиническим исследованиям аппаратов высокоинтенсивного импульсного оптического облучения. Исследования проведены на базе НИИ медицины труда им. Н.Ф. Измерова, Российского университета медицины Минздрава России и Главного военного клинического госпиталя им. Н.Н. Бурденко.

Микробиологические исследования *in vitro* выполнены с использованием клинически значимых штаммов микроорганизмов (МО). На рисунке 7 представлена сводная гистограмма, отражающая бактерицидную эффективность (БЭ) аппаратов «Зарница».

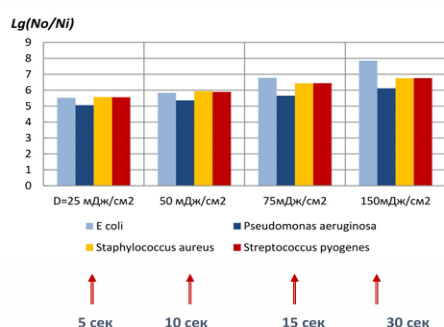


Рисунок 7. Бактерицидная эффективность (БЭ) аппарата «Зарница-А» в зависимости от энергетической дозы в УФ-С диапазоне. Указано время облучения с расстояния 5 см от поверхности. БЭ выражена в логарифмах инактивации, представляющих собой десятичные логарифмы отношения исходного числа МО в пробе - N_0 к числу выживших после облучения с дозой D_i МО - N_i .

Исходная обсемененность $N_0 = 10^7 \dots 10^8$ КОЕ (колониеобразующих единиц)

Проведенные эксперименты в целом показали высокую БЭ аппаратов серии «Зарница» и возможности существенного сокращения длительности терапевтических процедур: за 5...10 секунд облучения достигается эффективность обеззараживания по клинически значимым бактериальным патогенам более 99,999%.

Исследования ранозаживляющей (терапевтической) эффективности выполнены на лабораторных животных (крысах линии Вистар). Рассмотрены поверхностные (2х2 см), резанные и огнестрельные раны, искусственно инфицированные больничными штаммами репрезентативных патогенов. В опытах проведено сравнение с лечением: официальной бактерицидной и ранозаживляющей мазью Левомеколь, стандартным антисептиком хлоргексидином, ртутной лампой низкого давления (254 нм) и светодиодным аппаратом (272±6 нм).

На рисунке 8 в качестве примера приведены фотографии результатов лечения поверхностной раны с использованием мази Левомеколь и с применением аппарата «Зарница-А», иллюстрирующих эффект ускоренного заживления раны при использовании импульсного оптического облучения.

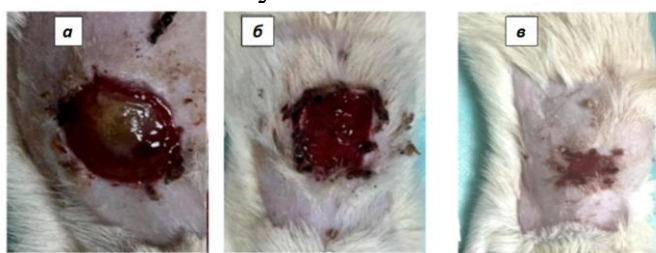


Рисунок 8. Состояние раны на 14-е сутки после моделирования патологии.

а - инфицированная рана (ИР);
б - ИР+ Левомеколь;
в - ИР+Левомеколь+облучение аппаратом «Зарница-А»

В целом, эксперименты показали, что аппараты серии «Зарница» обладают выраженными антибактериальными и ранозаживляющими действиями и достоверно обеспечивает более высокие темпы заживления ран по сравнению с применением традиционных медикаментозных средств (Левомеколь, хлоргексидин) и аппаратов с источниками узкополосного УФ излучения низкой интенсивности – ртутными лампами и УФ светодиодами.

На основе проведенных исследований разработаны практические рекомендации по применению аппаратов серии «Зарница».

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ

1. На основе анализа радиационно-газодинамических процессов в электроразрядной ксеноновой плазме разработан методологический подход и создана инженерная расчетная модель трубчатых ИКЛ для выбора оптимальных режимных параметров ламп и электротехнического контура, обеспечивающих приемлемые для медико-биологических технологий спектрально-энергетические и ресурсные характеристики ламп.

2. Разработаны экспериментальные методы исследования динамических и энергетических характеристик импульсной электроразрядной плазмы и получены новые экспериментальные данные по электротехническим и излучательным характеристикам малогабаритных ИКЛ в энергетических режимах функционирования, оптимальных для биомедицинских применений.

3. Проведены расчетно-теоретические и экспериментальные исследования плазмодинамических и излучательных характеристик малогабаритных ИКЛ. В результате анализа и обобщения полученных данных установлены основные закономерности по качественному и количественному влиянию конструктивных параметров трубчатых ИКЛ и электротехнического контура на характеристики ламп. Полученные зависимости для ИКЛ с внутренним диаметром $d = 0,5 \dots 0,7$ см и стандартным давлением (400 мм рт. ст.) имеют вид

- для максимального разрядного тока

$$I_{max} \approx 1,45 \cdot d^{4/3} \cdot P_s^{0,67}, \text{ А ;}$$

- для максимальной яркостной температуры в КУФ области спектра

$$T_{\text{КУФ}} \approx (720 \pm 20) \cdot P_s^{0,22}, \text{ К;}$$

- для максимального потока КУФ излучения с единицы поверхности лампы

$$P_{s\text{КУФ}} \approx 10^3 (9 \cdot 10^{-5} \cdot P_s - 1,8), \text{ Вт/см}^2;$$

- для КПД излучения лампы в КУФ области спектра

$$\eta_{\text{КУФ}} \approx \left(9 \cdot 10^{-2} - \frac{1800}{P_s} \right) \cdot 100, \text{ \%}.$$

(Здесь поверхностная плотность электрической мощности лампы P_s выражена в Вт/см²).

4. Разработаны научно-технические принципы создания фототерапевтических аппаратов на основе ИКЛ для лечения ран и дерматозов. Созданы экспериментальные и опытно-промышленные образцы медицинских аппаратов высокоинтенсивного широкоспектрального импульсного оптического облучения (аппараты серии «Зарница») и показана их более высокая терапевтическая эффективность по сравнению с применением традиционных медикаментозных средств (Левомеколь, хлоргексидин) и аппаратов с источниками узкополосного УФ излучения низкой интенсивности.

5. Предложена и обоснована новая фототерапевтическая технология лечения ран, основанная на использовании высокоинтенсивного оптического излучения широкого спектра, генерируемого ИКЛ. Разработаны рекомендации по практическому применению фототерапевтических аппаратов высокоинтенсивного импульсного оптического облучения. Способ лечения защищен патентом РФ на изобретение.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Статьи в научных журналах, индексируемых международной базой цитирования Scopus

1. Kondratiev A.V. The Effectiveness of Lighting Systems of Phototherapy Devices of Pulsed Optical Irradiation // Technical Physics Letters. 2026. Vol. 52, No. 1. P. 6–10. (*Scopus*, Q3) (0,6 п.л./0,6 п.л.).
2. A High-Intensity Optical Irradiation Device for the Treatment of Wounds and Wound Infections / A.V. Kondratiev [et al] // Biomedical Engineering. 2023. Vol. 57. P. 77–80. <https://doi.org/10.1007/s10527-023-10272-0>. (*Scopus*, Q4) (0,7 п.л./0,3 п.л.).
3. Preclinical Studies of the Antimicrobial and Wound-Healing Effects of the High-Intensity Optical Irradiation “Zarnitsa-A” Apparatus / A.V. Kondratiev [et al] // Appl. Sci. 2023. Vol. 13. P.10794. (*Scopus*, Q2) (1,6 п.л./0,5 п.л.). <https://doi.org/10.3390/app131910794>
4. LED device of short-wave ultraviolet irradiation / A.V. Kondratiev [et al] // Biomedical Engineering. 2023. Vol. 57. P. 241-244. (*Scopus*, Q4). (0,7 п.л./0,2 п.л.). <https://doi.org/10.1007/s10527-023-10307-6>.
5. Increasing the shelf life of packaged bakery products by their processing of broadband optical radiation of a pulsed xenon lamp / A.V. Kondratiev [et al] // Food Packaging and Shelf Life. 2024. Vol. 41. P. 101229. (*Scopus*, Q1, Web of Science) (1,0 п.л./0,2 п.л.). <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2023.101229>.
6. LED device with a programmable UV radiation spectrum for biomedical applications / A.V. Kondratiev [et al] // Biomedical Engineering. 2025. Vol. 58. P. 296-299. (*Scopus*, Q4) (0,7 п.л./0,2 п.л.). <https://doi.org/10.1007/s10527-024-10420-0>.
7. Bactericidal effectiveness of high-intensity pulsed broadband irradiation in treating infected wounds / A.V. Kondratiev [et al] // Biomedical Photonics. 2024. Vol. 13(2). P. 26-33. (*Scopus*, Q3) (0,9 п.л./0,1 п.л.). <https://doi.org/10.24931/2413-9432-2023-13-2-26-33>. 28
8. Morphological evaluation of the effectiveness of treating infected wounds with high-intensity pulsed broadband irradiation / A.V. Kondratiev [et al] // Biomedical Photonics. 2024. Vol. 13. № 3. P. 31–41. (*Scopus*, Q3) (0,8 п.л./0,1 п.л.). doi: 10.24931/2413–9432–2024–13–3–31–41.
9. Pulsed wide-spectral phototherapy of soft tissue gunshot wounds / A.V. Kondratiev [et al] // Biomedical Photonics. 2025. Vol. 14, № 1. P. 20–28. (*Scopus*, Q3) (1,1 п.л./0,4 п.л.). doi: 10.24931/2413–9432–2025–14–1–20–28.
10. Phototherapeutic Technologies and Devices Based on Pulsed Xenon Lamps / A.V. Kondratiev [et al] // Proceedings of the 2025 7th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). Moscow, Russian Federation. 2025. P. 316-224. (*Scopus*, Q4) (0,7 п.л./0,3 п.л.). doi: 10.1109/REEPE63962.2025.10971121. 8-10 April 2025.

Статьи в научных журналах из перечня ВАК.

11. Выбор оптимальных режимных параметров импульсных ксеноновых ламп для медико-биологических и экологических применений / А.В. Кондратьев [и др.] // Успехи прикладной физики. 2024. Т.12. №2. С. 201-214. (1,2 п.л./0,6 п.л.).

12. Моделирование и оптимизация форм-фактора светотехнических систем медицинских аппаратов для широкоспектральной фототерапии ран / А.В. Кондратьев [и др.] // Инженерный журнал: наука и инновации. 2025. № 3. Р. 159. doi: 10.18698/2308-6033-2025-3-2431. (1,2 п.л./0,6 п.л.).

Патенты

1. Переносной аппарат высокоинтенсивного импульсного оптического облучения для лечения ран / А.В. Кондратьев [и др.] // Патент РФ на полезную модель № 227628 от 29.07.2024.

2. Аппарат высокоинтенсивного импульсного оптического облучения для лечения раневой инфекции и дерматологических заболеваний / А.В. Кондратьев [и др.] // Патент РФ на изобретение №2835588 от 28.02.2025.

3. Способ лечения инфицированных ран с помощью высокоинтенсивного импульсного широкополосного облучения / А.В. Кондратьев [и др.] // Патент РФ на изобретение № 2842311 от 24.06.2025.

4. Светодиодный аппарат для лечения ран и дезинфекции поверхностей / А.В. Кондратьев [и др.] // Патент РФ на полезную модель № 232810 от 21.03.2025.