

На правах рукописи



**Чиковани Наталья Зауровна**

**Исследование динамики электровзрыва вольфрамовых проводников в  
вакууме**

Специальность 01.04.08 - физика плазмы

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени кандидата  
физико–математических наук

Сухум – 2023г.

Работа выполнена в государственном научном учреждении «Сухумском физико-техническом институте Академии наук Абхазии»

**Научный руководитель:**

Уруцкоев Леонид Ирбекович, доктор физико-математических наук, ГНУ «Сухумский физико-технический институт» Академии наук Абхазии.

**Официальные оппоненты:**

Андреев Степан Николаевич, доктор физико-математических наук, начальник отдела Радиофотоники НИЦ «Телекоммуникаций».

Ананьев Сергей Станиславович, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет МЭИ», доцент кафедры «Общей физики и ядерного синтеза».

**Ведущая организация:**

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

Защита состоится «20» октября 2023 года в 12 часов на заседании разового диссертационного совета при ГНУ «Сухумском физико-техническом институте Академии наук Абхазии» по адресу: 384900, Республика Абхазия, г.Сухум, ул. Академика Марра 9.

С электронной версией диссертации и автореферата можно ознакомиться на сайте Академии наук Абхазии по E-mail: <http://akademra.org>. Электронную версию диссертации и автореферата можно получить, послав автору запрос по E-mail: [natavachikovani525@mail.ru](mailto:natavachikovani525@mail.ru).

Автореферат разослан «6» сентября 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



к.ф.-м.н. /Ахсалба А.К./

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Электрический взрыв проводников (далее по тексту ЭВП) интенсивно изучается во многих лабораториях мира с начала 50-х годов прошлого столетия (Дронова А.П., 1963; Колесникова В.Н., 1965). Несмотря на то, что ЭВП посвящены многочисленные публикации, обзоры (Иваненков Г.В., 2004) и монографии (Бурцев В.А., 1990; Мартынюк М.М., 1999) полная детальная физическая модель этого многофакторного явления к настоящему времени отсутствует. Явление представляет интерес как с точки зрения фундаментальных, так и прикладных исследований. Электровзрыв одиночных проволок интересен в прикладном и технологическом аспектах в первую очередь как способ получения нанопорошков (Ильин А.П., 2003), а также как мощный источник мягкого рентгена (Волков Г.С., 2004; Spielman R.B., 1998). Электровзрыв многопроволочных лайнеров интересен в прикладных задачах, как мощный импульсный источник мягкого рентгена и нейтронный источник. Как объект фундаментальных исследований ЭВП интересен для изучения поведения вещества вблизи критической точки и термодинамики фазовых переходов (твердое состояние - жидкое состояние – пар - плазма). При значительном энергокладе во взрывающемся металлический проводник происходит образование многозарядных ионов (вплоть до водородоподобных ионов), что позволяет с помощью методов рентгеновской, ультрафиолетовой и оптической спектроскопии уточнять строение электронных оболочек металлов. Явление ЭВП привлекательно для исследователей тем, что позволяет, используя относительно простое технологическое оборудование, изучать поведение вещества при экстремальных параметрах (Фортов В.Е., 2000). В отличие от лазерной абляции ЭВП позволяет достичь энергоклад в материал взрываемого проводника на уровне кДж, используя очень простое оборудование. Величина энергоклада во взрывающемся проводнике в значительной степени определяется динамикой электровзрыва.

Настоящая диссертационная работа посвящена разработке диагностических методик, позволяющих исследовать динамику электровзрыва проводников и определять параметры образовавшейся плазмы.

Электрический взрыв тонких вольфрамовых проводников в вакууме сопровождается появлением «горячих точек» и развитием быстрых магнитно-гидродинамических неустойчивостей, которые приводят к возникновению характерных «страт» (Орешкин В.И., 2012; Кварцхава И.Ф., Плюто А.А., 1956). Измерения температуры поверхности вольфрамового проводника и концентрации образующейся вольфрамовой плазмы необходимы для корректного составления уравнений состояния вещества при экстремальных параметрах (Фортов В.Е., 2000).

**Цели работы.** В 2010-2011 годах в Сухумском Физико-Техническом Институте (далее по тексту СФТИ) проводились исследования, целью которых

являлось изучение возможности инициирования слабых ядерных реакций с помощью сильноточного электровзрыва вольфрамовых проводников в вакууме. В ходе исследований было обнаружено, что после электровзрыва в разрядной камере регистрировались частицы с массой 4 а.е.м. (Уруцкоев Л.И., 2012). Последнее обстоятельство позволило авторам работы предположить, что в ходе сильноточного электровзрыва проводников в вакууме образуются атомы гелия  $He_2^4$ . Однако в этом цикле работ экспериментаторам не удалось добиться удовлетворительной воспроизводимости результатов.

Целью настоящей диссертационной работы являлось изучение динамики электровзрыва и поиск условий для хорошей воспроизводимости экспериментов.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Создание технологической карты подготовки эксперимента.
2. Разработка диагностического комплекса, позволяющего контролировать параметры образующейся низкотемпературной плазмы.
3. Поиск параметров, определяющих воспроизводимость ЭВП.
4. Изучение природы возникновения второго пика оптического излучения, названного световое «эхо», упоминаемого в работе (Уруцкоев Л.И., Рухадзе А.А., 2012).

**Научная новизна работы.** Разработаны оригинальные диагностические методики, позволяющие исследовать параметры низкотемпературной плазмы, образовавшейся при электровзрыве вольфрамовых проводников в вакууме.

В ходе проведения экспериментальной работы было установлено, что динамика электровзрыва и воспроизводимость параметров образующейся плазмы зависят как от химической чистоты, так и от концентрации частиц фонового газа, присутствующих на поверхности проводника. В связи с этим были разработаны следующие методики очистки: химическая очистка поверхности проводника от углеродного покрытия и поверхностных окислов с помощью кипячения в химически чистом щелочном растворе (КОН) при температуре 350 °С; тепловая очистка проводника от абсорбированных газов (прогрев проводника при температуре ~2200 °С). Контроль эффективности методов очистки осуществлялся с помощью оптической спектроскопии по отсутствию спектральных линий примесей в спектрах электровзрыва и по уширению спектральной линии водорода  $H_\alpha$ .

Отличительной чертой проведенного исследования является изучение динамики протекания ЭВП при широком варьировании параметров эксперимента. Исследование динамики ЭВП вольфрамовых проводников в вакууме проводилось с изменением диаметров (30 ÷ 200 мкм) взрывааемых проводников и параметров, подаваемого импульса. Изучалось влияние начальной температуры проводников (20 ÷ 2200 °С) на динамику ЭВП.

Впервые для определения температуры продуктов ЭВП была применена методика «спектрального пирометра» (Магунов А.Н., 2010). С помощью данной методики по экспериментально регистрируемой форме планковского спектра можно было судить о температуре продуктов ЭВП. Проведено теоретическое исследование и численное моделирование влияния нестационарности температуры продуктов ЭВП в ходе электровзрыва на значение максимально достигаемой температуры при ЭВП для проволок различного диаметра.

Была разработана методика, позволяющая регистрировать качественную деградацию поведения непрерывной части спектра во времени.

Разработана и адаптирована система покадрового фотографирования, позволяющая производить съемку динамики электровзрыва с выдержкой одного кадра до 30 нс, что позволяло анализировать динамику поведения плазмы электровзрыва во времени. Система задержек позволяла плавно регулировать как длительность кадра, так и расстояние между кадрами. Впервые с помощью ЭОПов было получено изображение ЭВП в лучах  $H_{\alpha}$ , что значительно улучшило контрастность изображения и позволило исследовать динамику свечения атомарного водорода.

Была разработана методика абсолютных измерений светового потока оптического излучения при ЭВП.

Детально исследована природа возникновения второго пика интенсивности оптического излучения (световое «эхо»), возникающего после электровзрыва.

**Научная значимость работы.** В ходе работы над темой диссертации разработан оптический спектральный комплекс, содержащий как оригинальные, так и широко используемые оптические диагностические методики в области физики плазмы. В настоящей работе впервые была использована методика «спектрального пирометра», которая ранее не применялась для изучения данного процесса. На основе проведенного теоретического исследования были получены практические формулы, позволяющие определять максимальную температуру взрывающегося проводника. В работе показано, что в области длин волн  $\lambda > 500$  нм непрерывная часть спектра с хорошей степенью точности определяется планковским распределением яркости светового потока, а в области длин волн  $350 < \lambda < 500$  нм наблюдается «надпланковская» составляющая непрерывной части спектра.

**Практическая ценность работы.** Разработанные технологии подготовки эксперимента позволяют существенно улучшить воспроизводимость динамики протекания электровзрыва в вакууме.

Проведенное теоретическое рассмотрение вопроса с изменяющейся во времени температурой позволило использовать методику «спектрального пирометра» для нестационарных температур. Методика «спектрального пирометра», адаптированная к явлению ЭВП позволяет определять максимальную температуру продуктов электровзрыва.

С помощью разработанных новых диагностических методик стало возможным более тщательное исследование параметров низкотемпературной плазмы, образовавшейся при электровзрыве вольфрамовых проводников в вакууме.

**Научные результаты, выносимые на защиту:**

1. Разработана технология подготовки ЭВП, позволяющая значительно улучшить воспроизводимость экспериментов.
2. Создан оптический диагностический комплекс для изучения динамики ЭВП, позволяющий получать спектральные и временные параметры оптического излучения.
3. Создана методика «спектрального пирометра», которая применялась для экспериментального измерения температуры продуктов ЭВП по непрерывной составляющей спектра.
4. Показано, что излучение планковской составляющей определяется наночастицами, образующимися при ЭВП, и носит объемный характер.
5. Обнаружено возникновение сплошного спектра непланковского характера в синей области.
6. Обнаружен третий пик интенсивности оптического свечения, названный световое «эхо». Установлены параметры, влияющие на время появления светового «эхо», и исследован его оптический спектр.

**Достоверность результатов.** Представленные в диссертационной работе экспериментальные результаты получены с помощью классических методик, принятых для исследования параметров низкотемпературной плазмы. Достоверность представленных в настоящей диссертационной работе экспериментальных результатов основана на использовании общепринятых диагностических методик и высокой статистической достоверности результатов. Всего было осуществлено более 600 опытов. Температура продуктов ЭВП, измеренная по непрерывной части спектра с помощью разработанной методики «спектрального пирометра», хорошо согласится с результатами измерений температуры плазмы, которые были получены с помощью общепризнанной методики, основанной на отношении интенсивности спектральных линий. Измеренные различными спектральными диагностиками физические параметры плазмы не противоречат результатам других исследователей. Достоверность результатов измерений обеспечивалась тщательными многократными калибровками и тестированиями на эталонных образцах.

Все экспериментальные результаты, представленные в настоящей диссертационной работе, статистически достоверны и обладают надлежащей воспроизводимостью в пределах экспериментальных погрешностей.

### **Апробация результатов работы:**

1. Тема доклада: «Исследование динамики электровзрыва вольфрамовых проволочек в вакууме оптическими методиками». Научная конференция аспирантов и молодых ученых Абхазии (18-20 октября 2020г.).
2. Тема доклада: «Исследование оптического излучения при электровзрыве проволочек». Семинар им. А.А. Рухадзе Теоретического отдела. Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН (06 апреля 2022 г.).
3. Тема доклада: «Методика планковского пирометра в эксперименте по электровзрыву металлических проводников». XXVII Российской конференции по холодной трансмутации ядер химических элементов. (3-7 октября 2022 г.).
4. Тема доклада: «Исследование оптического излучения, возникающего при электровзрыве вольфрамовых проводников в вакууме». Научная конференция аспирантов и молодых ученых Абхазии, посвященная 25-летию юбилею Академии наук Абхазии (2–3 ноября 2022 г.).
5. Тема доклада: «Исследование динамики электровзрыва вольфрамовых проводников в вакууме (по материалам кандидатской диссертации)». Семинар им. А.А. Рухадзе Теоретического отдела. Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН (21 июня 2023 г.).
6. Тема доклада: «Изучение мутагенных свойств факторов, связанных с сильноточным электровзрывом проводников в вакууме с помощью аллиум-теста». VII Троицкая конференция с международным участием "Медицинская физика" (ТКМФ-7). 19–21 октября 2020 г., Москва.
7. Тема доклада: «Влияние физических факторов, связанных с сильноточным электровзрывом проводников в вакууме, на биологические системы». VII Троицкая конференция с международным участием "Медицинская физика" (ТКМФ-7). 19–21 октября 2020 г., Москва.
8. Тема доклада: «Оценка комбинированного действия факторов, связанных с сильноточным электровзрывом проводников в вакууме и плазменного фокуса на уровень повреждения клеточной ДНК в лейкоцитах периферической крови человека». Экология XXI века: синтез образования и науки: материалы VI Международной очнозаочной научно-практической конференции (18–21 мая 2020 г., Челябинск)

**Публикации по теме диссертации.** Автором опубликовано 5 научных работ по теме диссертации в соавторстве в реферируемых журналах из списка, рекомендованного ВАК РФ.

**Личный вклад автора в работу.** На основе экспериментальных исследований, проведенных при непосредственном участии автора, получены основные результаты, представленные в диссертации, и сформулированы основные научные положения и выводы. Представленные результаты в диссертационной работе получены при непосредственном определяющем участии автора и под его

руководством. Личный вклад автора состоял в постановке задачи и обсуждении полученных результатов путем сравнения с экспериментальными данными.

Автор участвовал во всех этапах проведения эксперимента: модернизации экспериментальной установки; в разработке и калибровке диагностических методик; получении экспериментальных данных, а также в их последующем анализе и интерпретации. Все научные статьи, опубликованные в соавторстве, были выполнены при его личном участии.

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Общий объем работы составляет 114 страниц, включая 46 рисунков, 3 таблицы и список цитируемой литературы из 80 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы диссертации, сформулирована основная цель и задачи исследований, перечислены защищаемые положения, а также обсуждается научная новизна и практическая ценность полученных результатов.

В **первой главе** диссертации представлен обзор экспериментальных и теоретических работ, посвященных электрическому взрыву металлических проводников в вакууме.

Первая часть обзора посвящена краткой истории исследований динамики электровзрыва проволочек в СФТИ, которую можно условно разделить на три временных этапа. Первый этап исследований ЭВП в СФТИ начинается в 50-х годах. Причиной начала этих работ послужило сообщение, что австрийскому профессору Р. Рихтеру удалось решить проблему управляемого синтеза ядер в Аргентинской секретной лаборатории на острове Хемул. В СССР были проведены совещания по оценке этой информации (Ardenne M., 1984), а в СФТИ (тогда НИИ-5) создана комиссия по выработке предложений для работ в этом направлении. Было предложено три возможных способа получения высокотемпературной плазмы. Один из них – электровзрыв проволочек (предложение проф. П. Тиссена) – стал реализовываться коллективом под руководством И.Ф. Кварцхава. Электровзрыв проволочек является «богатым» на физические эффекты, объектом исследования. Одним из интересных физических эффектов сопровождающих электровзрыв проволочек является возникновение так называемой «паузы тока». Группа И.Ф. Кварцхава занималась изучением этого эффекта. Опираясь на небогатый арсенал импульсной диагностики, существовавший в то время, ей удалось правильно установить основные экспериментальные закономерности и описать характерные черты явления. Впоследствии И.Ф. Кварцхава классифицировал все исследуемые им металлы с точки зрения возникновения «паузы тока» на две группы: «медная» - Cu,



Al, Ag, Au; и «платиновая» - Pt, W, Mo, Fe, Ni и нихром, отличающихся по температуре плавления. Группа И.Ф. Кварцхава также изучала динамику ЭВП в различных средах с помощью оптической теневой фотографии. В рамках этого цикла работ И.Ф. Кварцхава разработал методику определения количества энергии, вложенной в проволочку при электровзрыве. В ходе исследований динамики ЭВП было обнаружено образование периодических пространственных структур, возникающих вдоль длины проволоки, которые затем получили название: структуры Кварцхава. Их возникновение было объяснено неоднородным радиальным расширением проволоки, а наблюдавшееся резкое падение проводимости проволочки связано именно с возникновением периодических структур вдоль длины проволоки (Кварцхава И.Ф. 1955). Работа И.Ф.Кварцхава по изучению ЭВП проводилась в СФТИ до 1958 г.

С 2010 г. исследования по ЭВП в СФТИ возобновились и это было вызвано следующими физическими соображениями. До середины прошлого века ядерные распады считались абсолютными эталонами времени, что и отражено в самом названии «постоянная радиоактивного распада». Это мнение основывается на том, что поскольку энергетический масштаб атомных и ядерных процессов различается в  $10^5$  раз, то вероятности ядерных процессов зависят только от состояния ядра и не зависят от внешних условий, в том числе от состояния атомной электронной оболочки. Однако, позднее, в конце 50-ых годов XX века стало ясно, что, ядерные и атомные явления тесно связаны. Осознание роли слабых ядерных взаимодействий электронных оболочек в жизни ядер позволило теоретикам создать новые представления и тем самым стимулировать экспериментальные исследования. В настоящее время не вызывает сомнения тот факт, что ионизация атома и сильные внешние электромагнитные поля могут в значительной мере влиять на вероятности ядерных распадов и даже изменять сами условия стабильности ядер. Для слабых ядерных процессов ( $\beta^\pm$  распады и k-захват) такое влияние изучено достаточно подробно как теоретически (Акулов Ю.А., 2003; Мамырин Б.А., 2004; Уруцкоев Л.И., 2004), так и экспериментально (Bosch F., 1996; Jung M., 1992). Известно, что при сильноточном электровзрыве металлических проволочек возникают сильные магнитные поля ( $H \sim 10^6$  Гс) (Bakshaev Y., 2001; Velikovich A., 2007), хотя локально это значение может быть превышено в десятки раз.

Еще 1922 году, то есть задолго до того, как сформировались современные представления об устройстве ядра, два американских химика Дж. Вендт и К. Айрон опубликовали работу, посвященную исследованию электровзрыва вольфрамовой проволочки в вакууме (Wendt G.L., 1922). По утверждению авторов этой работы, спектральный анализ газа, образовывавшегося в результате электровзрыва, выявил присутствие характерной линии гелия ( $^4\text{He}$ ) во всех проведенных ими опытах.

Целью исследований 2010-2011 годов являлось изучение возможности инициирования  $\alpha$ -распада с помощью сильноточного электровзрыва вольфрамовых проводников в вакууме. В качестве основной идеи экспериментов была использована схема опытов Дж. Вендт и К. Айрон. В ходе исследований было обнаружено, что после электровзрыва во взрывной камере регистрировались частицы с массой 4 а.е.м. Последнее обстоятельство позволило сделать предположение, что в ходе сильноточного электровзрыва проводников в вакууме образуются атомы гелия  ${}^4_2\text{He}$  (Бирюков А.О., 2012). В этой серии экспериментов не удалось добиться удовлетворительной воспроизводимости экспериментальных результатов. Экспериментаторам не удалось создать спектральные методики требуемой чувствительности, что затруднило полномасштабное исследование динамики ЭВП. Третий этап изучения динамики электровзрыва и поиска условий для хорошей воспроизводимости экспериментов начался в 2017 г. и продолжается по сей день.

Часть обзора посвящена обсуждению вопроса о методах измерения температуры продуктов ЭВП. Температура является важной характеристикой ЭВП, она позволяет судить об энерговкладе в проволочку. В большинстве работ, посвященных исследованию ЭВП вольфрамовых проволочек в вакууме температура образующихся продуктов электровзрыва оценивается исходя из вложенной энергии, которая в свою очередь определяется из осциллограмм тока и напряжения (например, (Кадомцев Б.Б., 1972; Русских А.Г., 2004)).

Так как спектр оптического излучения состоит из сплошной части и линейчатой, то можно провести оценку температуры по непрерывной части оптического спектра. Одна из первых попыток экспериментальной оценки температуры продуктов ЭВП по непрерывной части оптического спектра описана в работе (Соболев Н.Н., 1947). Интенсивное развитие технологий в области микроэлектроники и компьютерной техники, значительно упростило процесс получения, хранения и обработки информации, получаемой в эксперименте, что позволило создать методику «спектрального пирометра» (Мейфилд Е., 1963). Использование «спектрального пирометра» для измерения температуры ЭВП было одной из задач, стоящих перед настоящей диссертационной работой.

Во **второй главе** приведена схема и параметры, использовавшейся экспериментальной установки, описана техника подготовки проволочек и разрядной камеры к эксперименту, а также подробно описан комплекс диагностических методик.

Эксперименты по электрическому взрыву вольфрамовых проволочек в вакууме проводились на установке «ГЕЛИОС». Установка состояла из конденсаторной батареи общей емкостью  $C = 0,4$  мкФ, газового разрядника тригatronного типа, подводящих кабелей, кварцевой взрывной камеры и системы откачки. Блок конденсаторных батарей заряжался от источника питания до напряжения  $U = 35 \div 40$  кВ. Общая индуктивность составляла  $L = 0,25$  мкГн, а

характеристическое сопротивление  $Z = 0,8 \text{ Ом}$ . Электротехнические параметры импульса измерялись стандартными электротехническими диагностиками: делителем напряжения, поясом Роговского и магнитной петлей. Максимальный ток составлял  $I \approx 50 \text{ кА}$ , а время первого полупериода  $T = 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ с}$ . Схема электроразрядной системы установки «Гелиос» представлена на Рис. 1.

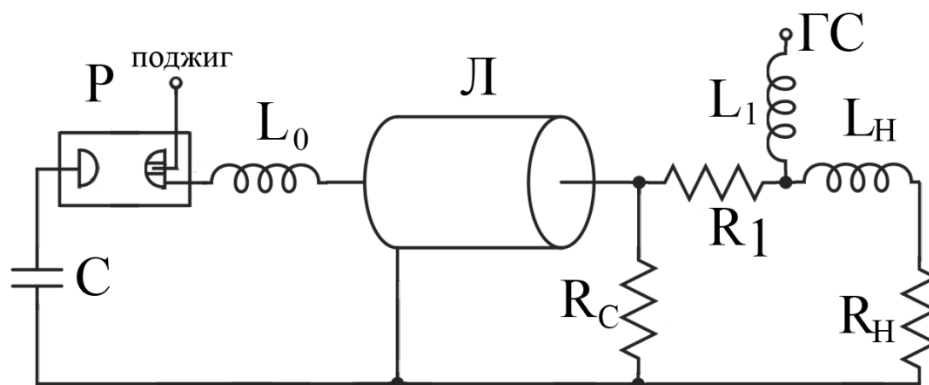


Рис. 1 Схема электроразрядного контура установки:  $C$  – емкость конденсаторной батареи,  $P$  – разрядник,  $L_0$  – индуктивность внешней цепи,  $R_1 \sim 0,5 \text{ Ом}$  – дополнительный резистор,  $L$  – кабельная линия,  $L_H, R_H$  – индуктивность и омическое сопротивление проволоочки,  $R_c \sim 9 \text{ Ом}$  – согласующий резистор.

Вакуумная откачка разрядно-взрывной камеры осуществлялась с помощью безмасляного спирального вакуумного насоса и турбомолекулярного насоса до давления  $P \sim 10^{-4} \text{ Па}$ . Давление в разрядной камере контролировалось с помощью инверсно-магнетронного вакуумметра VARIAN FRG-700 с рабочим диапазоном  $10^{-5} \div 10^5 \text{ Па}$ . Данные с вакуумметра в реальном времени поступали на компьютер, что позволяло регистрировать динамику поведения давления непосредственно перед ЭВП и после него.

В экспериментах использовались вольфрамовые проволоочки различных диаметров (30, 50, 100, 130 и 200 мкм), длина которых составляла  $\sim 40 \text{ мм}$ . В процессе проведения экспериментальной работы на установке «Гелиос» было замечено, что значительную роль на воспроизводимость получаемых результатов оказывает качество предварительной подготовки к эксперименту. Воспроизводимость результатов оценивалась по динамике электротехнических параметров, а также по амплитуде светового потока и интенсивности сплошной и линейчатой частей оптического спектра. Для улучшения воспроизводимости экспериментальных данных была проработана технология подготовки к эксперименту. Подготовка включала в себя предварительную очистку поверхности вольфрамовой проволоочки от углеродного покрытия и окислов вольфрама, дегазацию проволоочек от абсорбированных в ней газов. Технология подготовки к экспериментам также включала в себя чистку поверхности разрядной камеры от воды и абсорбированных газов с помощью тлеющего разряда.

Кварцевая разрядно-взрывная камера позволяла проводить исследования электрического взрыва тонких проволочек как спектроскопическими, так и фоторегистрирующими методиками. При проведении экспериментов использовался широкий набор оптических диагностических методик: спектрометры с различным спектральным разрешением для регистрации как обзорных спектров, так и спектров высокого разрешения; ФЭУ и фотодиоды для регистрации интегральной по спектру динамики поведения света во время ЭВП; 3-х канальная ЭОП-фотосъемка для регистрации динамики пост-разрядной плазмы и однородности взрыва проволочки; стрик-камера совмещенная со спектрометром для регистрации поведения оптических спектров во времени; спектрометр УМ-2 совмещенный с ЭОПом, который позволял в покадровом режиме регистрировать спектры во всем видимом диапазоне в любой интересующий момент времени.

**Третья глава** посвящена измерениям температуры продуктов электровзрыва металлических проводников. При электровзрыве вольфрамовых проволочек спектр оптического излучения состоит из сплошной (планковской) и линейчатой частей. Форма планковского распределения излучения нагретого твердого тела сильно зависит от температуры. Это обстоятельство позволило создать методику «спектрального пирометра» для измерения температуры продуктов электровзрыва по форме планковской составляющей спектра ЭВП. Описанная методика представляет собой своеобразный «пирометр», в котором «образцовой нитью накала» служит функция Планка, а совпадение яркости заменено на совпадение форм двух спектральных распределений.

В тексте диссертации подробно описаны калибровочные измерения температуры по форме планковского спектра. Первоначально спектральный пирометр калибровался по эталонной калибровочной вольфрамовой лампе СИРШ 6-40. Вторая калибровка проводилась на модельном объекте – нагретой вольфрамовой проволочке, расположенной в разрядной камере. Температура проволочки контролировалась по зависимости удельного сопротивления вольфрама от температуры. Калибровочные измерения показали, что температура, определенная по форме спектра, хорошо согласуется с расчетами температуры по удельному сопротивлению.

Поскольку во время ЭВП температура проволочки растет то необходимо было проведение численного моделирования суммарного распределения Планка для нестационарной температуры. Моделирование проводилось для случая линейного и экспоненциального роста температуры. В результате моделирования были получены численные зависимости в приближении линейного и экспоненциального роста температуры для диапазона параметров эксперимента ( $T < 5000$  °К и  $\lambda < 1000$  нм). Эксперименты показали, что линейное приближение хорошо совпадает с результатами эксперимента.

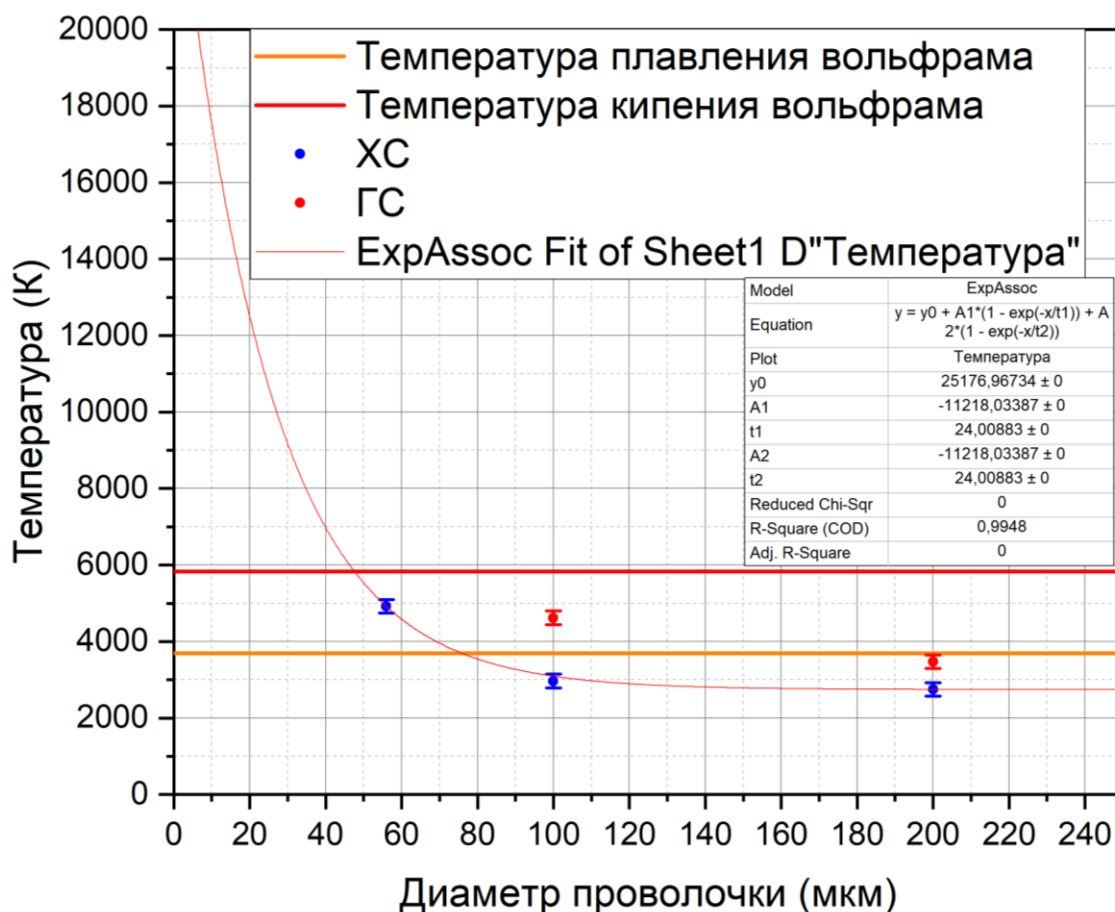


Рис. 2. Результаты измерений температуры продуктов ЭВП («холодный» старт (синим) – «ХС», «горячий» старт (красным) – «ГС»)

Важным результатом использования методики «спектрального пирометра» стала возможность измерения абсолютного потока оптического излучения во время ЭВП. Источник для прогрева проволоочки был индуктивно развязан с установкой, это позволяло производить электровзрыв, не выключая прогрев (далее «горячий старт»). Так как спектрометр OceanOptics работает в покадровом режиме, что давало возможность в опытах с «горячим стартом» за время одной серии регистрировать как планковский спектр нагретой проволоочки непосредственно перед электровзрывом, так и спектр в момент электровзрыва. Такой режим реализовался благодаря широкому динамическому диапазону спектрометра, который имеет 16-разрядное АЦП. Сравнивая отношения амплитуд спектра нагретой проволоочки к спектру полученному в момент электровзрыва можно оценить мощность излучения. Измерения по описанной методике показали, что температура плазменного образования, возникающего в результате ЭВП, составляла  $0,3 \div 0,6$  эВ, а зарегистрированная мощность излучения на  $3 \div 5$  порядков превышала, ту величину, которую теоретически, исходя из формулы Планка, может излучать поверхность вольфрамовой проволоочки при заданной температуре и диаметре. Столь значительное несоответствие мощности регистрируемого светового излучения приводит к выводу об объемном характере излучения плазменного образования. Во

время электровзрыва проволока разрушается и превращается в наночастицы, которые излучают со всего объема разрядной камеры. Этот вывод хорошо согласуется с ЭОП-фотографиями и данными, полученными со стрик-камеры в момент электровзрыва.

Для стационарно нагретой проволоки можно посчитать энергию, излучаемую проволокой в  $4\pi$  во всем диапазоне длин волн по закону Стефана-Больцмана. Взяв отношение излучения, зарегистрированного на кадре до электровзрыва и на кадре во время электровзрыва, можно исключить все геометрические параметры и получить абсолютное значение потока излучения во время ЭВП.

В главе также приведены результаты измерений температуры продуктов ЭВП для проволок различного диаметра. Результаты измерений, усредненные по серии опытов представлены на Рис. 2. Показано, что для малых диаметров проволоки, у которых высокий энерговклад на атом, температура продуктов ЭВП достигает  $\sim 5000$  °К. В режиме горячего старта температура продуктов ЭВП гораздо выше, чем в режиме холодного старта. Неожиданно было обнаружено, что сплошной спектр помимо планковской составляющей дополнительно содержит в синей области (диапазон  $350 \div 500$  нм) «надпланковскую» часть. Анализ «надпланковской» части сплошного спектра показал, что она зависит от температуры ЭВП. При уменьшении температуры продуктов ЭВП амплитуда «надпланковской» части спектра уменьшается, а её максимум смещается в сторону длинноволновой части спектра.

**Четвертая глава** посвящена исследованию динамики оптического излучения, возникающего при электровзрыве. На Рис. 3 представлена осциллограмма динамики поведения интенсивности оптического излучения во время ЭВП. Как видно из Рис. 3 интенсивность оптического излучения имеет сложную форму с тремя ярко выраженными пиками интенсивности. В процессе проведения исследовательских работ было выявлено, что форма оптического излучения зависит от следующих параметров: полярности высокого напряжения, диаметра разрядной камеры, диаметра проволоки и скорости ввода энергии.

Первые два максимума интенсивности света упоминаются во многих опубликованных работах (например, (Волков А.А., 2002)). Что же касается возникновения через  $\sim 200$  мкс третьего пика интенсивности свечения (световое «эхо»), то оно является отличительной чертой настоящего исследования.

Для анализа временной динамики интенсивности (интегрального по спектру) света временная шкала была разбита на три диапазона: от 0 до 1 мкс; от 1 до 10 мкс; от 10 до 300 мкс.

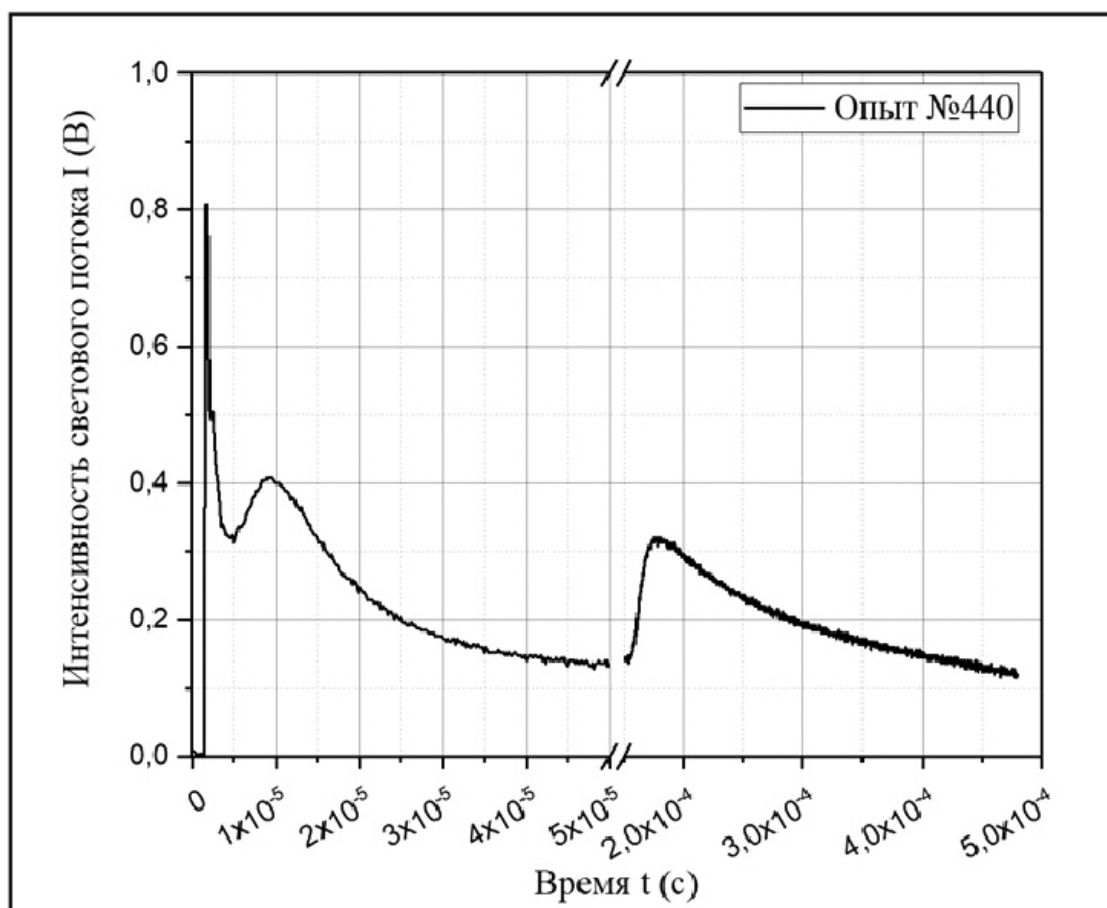


Рис. 3. Опыт №440, проволока  $d = 132$  мкм,  $l = 40$  мм, полная энергетика, отрицательная полярность высоковольтного электрода, холодный старт

Первый временной диапазон (от 0 до 1 мкс) характеризуется ростом тока и основным энерговкладом в проволочку. Основная интенсивность максимума света в первом временном диапазоне определяется сплошным спектром. Это утверждение хорошо согласуется с данными покадровой съемки с помощью ЭОП.

Второй временной диапазон (от 1 до 10 мкс) характеризуется преимущественно линейчатым спектром. Стрик-камера совмещенная со спектрометром, позволяла исследовать оптический спектр излучения с временным разрешением. Данная методика показала, что интенсивность непрерывного спектра затухает примерно к 500-ой нс, а дальше вся интенсивность оптического излучения определяется линейчатой частью.

Третий временной диапазон (от 10 до 300 мкс) характеризуется вспышкой света, возникающей примерно через 100-200 мкс от начала разряда. Основной особенностью светового «эхо» отличающего его от максимумов интенсивности светового излучения в начальной стадии электровзрыва является его позднее появление, когда конденсаторная батарея уже полностью разряжена.

С помощью системы, состоящей из монохроматора УМ-2, совмещенного с ЭП-19 удалось зарегистрировать спектры оптического излучения на различных этапах протекания электровзрыва. На Рис. 4 представлены фотографии спектров для каждого из

максимумов оптического излучения во время ЭВП. Как видно из рисунка, спектр полученный в первый временной диапазон представляет собой смесь непрерывного планковского спектра и спектральных линий водорода ( $H_{\alpha}$  656,279 нм,  $H_{\beta}$  486,135 нм), во втором временном диапазоне наблюдаются в основном линии вольфрама и линия водорода  $H_{\alpha}$ , в третьем диапазоне линейчатая часть отсутствует, всё излучение составляет непрерывный планковский спектр.

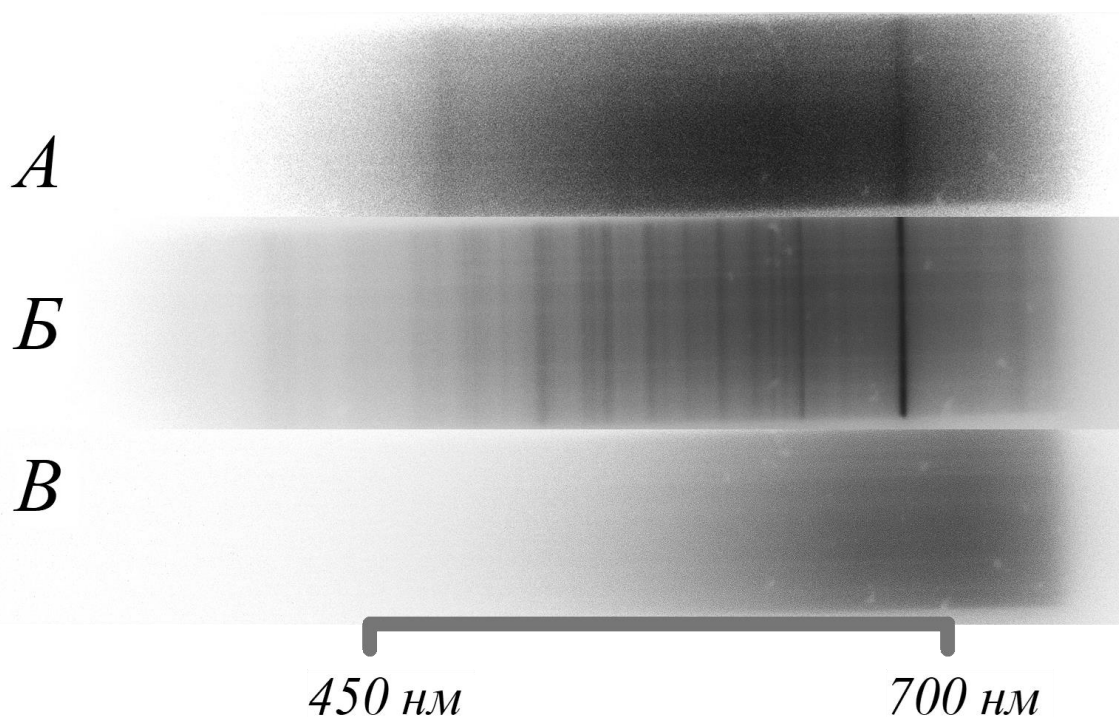


Рис. 4. а) 1 временной диапазон, опыт №486, выдержка 100 нс, задержка 450 нс от начала разряда  
 б) 2 диапазон, опыт №490, выдержка 1 мкс, задержка 10 мкс  
 в) 3 диапазон, опыт №452, выдержка 50 мкс, задержка 175 мкс

В результате исследования светового «эхо» были получены следующие закономерности: вспышка света («эхо») возникает в момент, когда конденсаторная батарея полностью разряжена; световое «эхо» наблюдается только при перекрытой вакуумной откачке; световое «эхо» наблюдается при диаметре вольфрамовой проволоочки более 100 мкм; при «горячем старте» максимум светового «эхо» сдвигается вправо по шкале времени; при уменьшении скорости ввода энергии также наблюдается запаздывание появления светового «эхо»; время появления светового «эхо» с высокой точностью линейно зависит от диаметра разрядной камеры; свечение в момент светового «эхо» резко неоднородно и носит объемный характер.



## Основные результаты и выводы

1. Созданный диагностический комплекс позволил добиться хорошей воспроизводимости экспериментальных результатов ЭВП и исследовать динамику, образующейся во время ЭВП плазмы. Диагностический комплекс позволил создать следующие технологии подготовки к эксперименту:
  - a. Технология кипячения проволочек в щелочи позволила избавиться от углеродных покрытий и окислов вольфрама на поверхности проволоки (по отсутствию спектральных линий примесей).
  - b. Очистка внутренней поверхности кварцевой разрядной камеры тлеющим разрядом в атмосфере аргона позволила избавиться от поверхностной влаги и газов, абсорбированных на поверхности (контролировалась по остаточному давлению).
  - c. Исследование профиля линии водорода  $H_{\alpha}$  позволило определить необходимое время прогрева проволоки, что хорошо совпадает с результатами, представленными в работе (Русских А.Г., 2006) авторами, которой использовались другие критерии оценки времени прогрева.
2. Использование фильтра  $H_{\alpha}$  для изучения динамики ЭВП с помощью ЭОПов, позволило значительно улучшить контрастность методики.
3. Использование щелевой развертки, совмещенной с спектрографом УМ-2 позволило исследовать временную динамику спектров, а совмещение ЭОПа со спектрометром УМ-2 в режиме покадровой съемки позволило исследовать спектр светового «эхо».
4. Использование методики «спектрального пирометра» позволило экспериментально измерять температуру продуктов ЭВП по непрерывной составляющей спектра.
5. С помощью методики «спектрального пирометра» удалось установить, что интенсивность непрерывной части спектра регистрируемого излучения на 5 порядков превышает интенсивность лучистого потока, который соответствует излучению с поверхности нагретой вольфрамовой проволоки при данном диаметре и температуре.
6. Исследование обнаруженного в синей области сплошного спектра непланковского характера показало, что с увеличением температуры его интенсивность увеличивается.
7. При исследовании светового «эхо» были получены следующие закономерности: световое «эхо» возникает при диаметре вольфрамовой проволоки более 100 мкм; при «горячем старте» максимум интенсивности сдвигается вправо на  $\Delta t = 59,8 \pm 13$  мкс по шкале времени; при уменьшении скорости ввода энергии (0,5Э) также наблюдается запаздывание появления светового «эхо» на  $\Delta t = 92 \pm 24$  мкс; время появления светового «эхо» с хорошей точностью линейно зависит от диаметра

разрядной камеры; свечение в момент светового «эхо» резко неоднородно и носит объемный характер; неоднородность свечения имеет явно выраженную периодическую структуру; спектр свечения светового «эхо» является непрерывным, а распределение по длинам волн носит планковский характер; временная эволюция непрерывной части спектра носит монотонный характер и направлена в сторону уменьшения температуры с увеличением временного интервала от момента ЭВП.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Оптико-спектрометрический комплекс для диагностики параметров плазмы, возникающей при электровзрыве вольфрамовых проволочек в вакууме, Уруцкоев Л.И., Алабин К.А., Аршба Р.М., Войтенко Д.А., Кокоев М.К., Лазба Б.А., Пилиа Н.Д., Сарецян Г.В., Чиковани Н.З., Инженерная физика. 2020. № 3. С. 3-18.

2. Электронно-оптическая камера для исследования процессов в нано- и микросекундном диапазоне, Алабин К.А., Воробьев Н.С., Заровский А.И., Пелипенко В.И., Чиковани Н.З., Приборы и техника эксперимента. 2020. № 3. С. 86-89.

3. Оценка действия факторов, связанных с низкотемпературной плазмой при сильноточном электрическом взрыве проводников в вакууме, на прораствание семян латука (*lactucasativa*), Пряхин Е.А., Уруцкоев Л.И., Тряпицына Г.А., Стяжкина Е.В., Перетыкин А.А., Пряхин Е.Е., Зиневич Е.Г., Пилиа Н.Д., Войтенко Д.А., Чиковани Н.З., Алабин К.А., Кокоев М.К., Гамисония А.С., Кейян М.А., Инженерная физика. 2019. № 12. С. 3-17.

4. Биологическое детектирование физических факторов, связанных с сильноточным электровзрывом проводников в вакууме, Пряхин Е.А., Уруцкоев Л.И., Стяжкина Е.В., Тряпицына Г.А., Алдибекова А.Е., Перетыкин А.А., Пряхин Е.Е., Алабин К.А., Пилиа Н.Д., Чиковани Н.З., Войтенко Д.А., Аршба Р.М., Известия РАН, № 11, том 84, 2020

5. Исследование оптического излучения при электровзрыве вольфрамовых проволочек в вакууме, Уруцкоев Л.И., Алабин К.А., Войтенко Д.А., Кокоев М.К., Лазба Б.А., Пилиа Н.Д., Сарецян Г.В., Чиковани Н.З., Инженерная физика. 2021. № 3. С. 3-19.