

На правах рукописи

Андросенко Владислав Николаевич

**УПРАВЛЕНИЕ ПОТОКАМИ, ГЕНЕРИРУЕМЫМИ ОПТИЧЕСКИМИ
РАЗРЯДАМИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ, С ЦЕЛЬЮ СТАБИЛИЗАЦИИ ИХ
ХАРАКТЕРИСТИК**

1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук (ИПМех РАН)

Научный руководитель: **Якимов Михаил Юрьевич**,
д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник лаборатории
лазерных разрядов ИПМех РАН

Официальные оппоненты: **Уваров Александр Викторович**,
д.ф.-м.н., профессор кафедры Молекулярных
процессов и экстремальных состояний вещества
Физического факультета ФГБОУ ВО «МГУ им.
М.В. Ломоносова»

Моралев Иван Александрович,
к.ф.-м.н., заведующий лабораторией плазменной
аэродинамики и стимулированного горения ФГБУН
Объединенный институт высоких температур РАН
(ОИВТ РАН)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт теоретической и
прикладной механики им. С.А. Христиановича
Сибирского отделения Российской академии наук
(ИТПМ СО РАН)

Защита состоится «12» ноября 2026 года в 15 часов на заседании
диссертационного совета 24.1.098.01 при ИПМех РАН по адресу: 119526, Москва,
проспект Вернадского, д. 101, к. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИПМех РАН
<http://www.ipmnet.ru/files/diss/2026/4/Androsenko-diss.pdf>.

Автореферат разослан «__» сентября 2026 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.1.098.01
к.ф.-м.н., доцент

Е. А. Лямина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Непрерывный оптический разряд (НОР) позволяет непрерывно поддерживать плотную плазму с температурой, близкой к температуре полной однократной ионизации, вблизи фокальной перетяжки луча достаточно мощного лазера [1]. Данный тип разряда был впервые теоретически предсказан и получен экспериментально в ИПМех РАН в 1970 году. Как физическое явление НОР для случая поддержания лазерным излучением на длине волны 10.6 мкм, а также волны светового горения достаточно полно изучались выдающимися учёными, такими как Ю. П. Райзер, Н. А. Генералов, В. П. Зимаков, Г. И. Козлов, В. А. Масюков, В. А. Кузнецов, С. Т. Суржиков (ИПМех РАН), Ф. В. Бункин, И. А. Буфетов, В. И. Конов, А. М. Прохоров, В. Б. Федоров (ИОФ РАН), А. А. Веденов, Г. Г. Гладуш, Ф. В. Лебедев, А. П. Напартович (ФИАЭ им. Курчатова) А. П. Будник (ФЭИ), а также D. R. Keefer, M. C. Fowler, R. J. Glumb, H. Krier (США), J. Uhlenbusch (ФРГ) и многими другими. Тем не менее, развитие лазерной техники привело к появлению и активному распространению с середины 2000-х годов мощных диодных и волоконных лазеров коротковолнового ИК-диапазона (0.9–1.1 мкм), отличающихся высоким КПД, низкими эксплуатационными расходами и находящих широкое применение в лазерной технологии. В то же время была обнаружена возможность поддержания НОР лазерами коротковолнового ИК-диапазона в ксеноне и аргоне высокого давления. Одним из первых технических применений НОР оказались плазменные источники широкополосного излучения высокой яркости, описанные в работах D. K. Smith (Energetiq Technology, Inc.), I. Bezel с сотрудниками (KLA Corporation), К. Н. Кошелева с сотрудниками (Институт спектроскопии РАН), и В. П. Зимакова с сотрудниками (ИПМех РАН) [2] и других. Такие источники перспективны, в частности, для интенсификации процедуры инспекции результатов литографии в микроэлектронном производстве. В настоящее время эта технология является одной из важнейших областей применения НОР.

Несмотря на успехи в использовании оптических разрядов, поддерживаемых лазерами коротковолнового ИК-диапазона, достигнутые в последние годы, многие свойства оптических разрядов остаются мало исследованными, что затрудняет дальнейшее развитие этой перспективной технологии. В частности, в литературе отмечается большой разброс данных по пороговым мощностям поддержания разрядов в зависимости от давления и рода газа, практически отсутствуют данные по температуре и концентрации электронов в плазме, слабо изучены потоки, генерируемые разрядами, несмотря на то, что они оказывают важное влияние на стабильность характеристик разрядов и т.п.

Импульсно-периодические оптические разряды (ИПОР) являются перспективным способом генерации квазистационарной плазмы, температура и излучательная способность которой может значительно превосходить характеристики плазмы НОР, приближаясь к характеристикам плазмы оптического пробоя. Порог поддержания ИПОР по интенсивности лазерного излучения при высокой частоте повторения импульсов может быть значительно ниже, чем порог лазерного пробоя.

Что же касается применений ИПОР, то, несмотря на высокие характеристики генерируемой ими плазмы, возможности их использования в качестве источника излучения до сих пор ограничены неустойчивостями, связанными, в том числе, с генерацией импульсно-периодическими (ИП) разрядами направленных газовых потоков [3]. Исследованиями взаимодействия оптических разрядов с потоками газа занимались Багаев С.Н., Грачев Г.Н., Третьяков П.К., Тищенко В.Н. с сотрудниками (ИЛФ СО РАН), В. М. Фомин, А. М. Оришич, В. И. Яковлев с сотрудниками (ИТПМ СО РАН) и другие. Основная проблема поддержания квазистационарной плазмы в ИП режиме — неустойчивость плазмы и плохая повторяемость от импульса к импульсу вплоть до пропуска импульсов, в основном, вследствие газодинамических возмущений в плазмообразующем газе, вызванных предшествующими импульсами.

В данной диссертационной работе с точки зрения механики исследуются новые газодинамические явления, возникающие в непрерывных и импульсно-периодических оптических разрядах, а также их влияние на стабильность и повторяемость от импульса к импульсу характеристик плазмы этих разрядов. Изучается явление генерации потоков в новом типе импульсно-периодического оптического разряда — тихом разряде. Исследуются возможности управления потоками, возникающими при ИПОР в режиме ИП оптического пробоя в аргоне и ксеноне, а также при термогравитационной конвекции вокруг непрерывного оптического разряда в аргоне и ксеноне высокого давления.

Исследования имеют целью разработку новых способов управления нестационарными процессами при оптических разрядах в газах, которые расширят возможности применений оптических разрядов, а также позволят создать научные основы для дальнейшего развития технологии широкополосных источников излучения высокой яркости и других применений оптических разрядов. В отношении непосредственных применений исследование сосредоточено на решении актуальной проблемы стабилизации излучения плазмы путём управления потоками, создаваемыми самой плазмой.

Актуальность работы.

Актуальность обусловлена, во-первых, недостаточностью и отчасти противоречивостью опубликованных в научной литературе экспериментальных данных по условиям поддержания, вопросам стабильности и физическим характеристикам плазмы оптических разрядов, поддерживаемых излучением ближнего инфракрасного диапазона, несмотря на то, что эта технология уже широко применяется, в частности, в лабораторных и промышленных источниках широкополосного излучения высокой яркости.

С другой стороны, расширение области применения оптических разрядов требует повышения как полной мощности, так и плотности мощности энерговыделения в плазме. С увеличением мощности увеличивается конвективный поток вокруг плазмы. При этом возникают условия для развития колебаний потока, что требует дополнительных исследований по стабилизации конвективных пульсаций. Проблемы, возникающие при попытках повышения удельных характеристик оптических разрядов, могут быть решены путём применения ИП режимов поддержания оптических разрядов. Однако для этого требуется решить проблему устойчивости плазмы в условиях индуцируемых импульсными разрядами газодинамических возмущений. Для этого необходимо изучить механизмы генерации потоков оптическими разрядами, механизмы возникновения неустойчивостей, связанных с потоками, а также предложить и обосновать методы подавления возникающих неустойчивостей.

Актуальна также перспектива применения ИП режима оптического разряда для повышения светоотдачи в области коротковолнового ультрафиолетового излучения. Высокая яркость источника излучения наряду со стабильностью критически необходимы для повышения производительности и пространственного разрешения процедуры инспекции результатов литографического процесса при производстве микроэлектроники, а также для применений в медицине (дезинфекция и флуоресцентные методы при ангиоскопии и лапароскопии), флуоресцентной микроскопии, рефлектометрии, спектральной эллипсометрии, фотохимии и аналитическом приборостроении.

Цель и задачи работы.

Цель работы заключается в исследовании потоков, генерируемых непрерывными и импульсно-периодическими оптическими разрядами, а также факторов, влияющих на стабильность и повторяемость характеристик плазмы. Для достижения цели исследования поставлены следующие задачи:

1. Исследовать методами эмиссионной спектроскопии и скоростной теневой съёмки плазму и колебания конвективных потоков непрерывного оптического

разряда, поддерживаемого лазерами ближнего ИК-диапазона в аргоне высокого давления.

2. Исследовать возможности стабилизации конвективного потока, генерируемого плазмой непрерывного оптического разряда за счёт управления потоками нагретого газа.

3. Исследовать влияние параметров лазерного излучения на стабильность импульсно-периодических оптических разрядов.

4. Исследовать методами скоростной теневой съёмки структуры газовых потоков, генерируемых импульсно-периодическими оптическими разрядами при переходе между различными их типами при изменении параметров лазерного излучения.

5. Исследовать методами скоростной теневой съёмки структуры газовых потоков, генерируемых различными типами импульсно-периодических оптических разрядов, в схеме поддержания разряда с двумя лазерными лучами, пересекающимися в области фокальных перетяжек.

Методология и методы исследования.

Основные результаты диссертации получены сочетанием методов прямого эксперимента, теоретических оценок и численного моделирования.

В работе использовались следующие экспериментальные методы:

Специально разработанные схемы фокусировки излучения волоконных иттербиевых, импульсных и непрерывных лазеров высокой мощности в колбах стандартных дуговых, а также специально разработанных кварцевых и сапфировых ламп, наполненных инертными газами под высоким давлением, для поддержания плазмы непрерывных и ИП оптических разрядов различных типов. При этом использовались новые методы настройки и оптимизации фокусирующих систем, в том числе защищённые патентами.

Специально разработанная методика количественного измерения спектральной яркости плазмы оптических разрядов.

Теневые методы визуализации потоков, индуцируемых оптическими разрядами, с помощью инновационных лазерно-плазменных источников широкополосного излучения, в сочетании со скоростной видеосъёмкой.

Научная новизна работы.

В работе впервые:

1. Экспериментально определены пороговые мощности поддержания НОР лазерным излучением с длиной волны около 1 мкм в аргоне в диапазоне давлений 23–50 бар.

2. Обнаружен и исследован эффект стабилизации конвективного факела НОР при повышении мощности лазерного излучения выше некоторого предела, зависящего от расстояния между вспомогательными электродами.

3. Обнаружен эффект самовоздействия НОР в разрядном объёме с ксеноном высокого давления посредством образования волн плотности в нисходящем потоке во внешней области разрядного объёма вследствие пульсаций конвективного факела от плазмы НОР. Неустойчивость плазмы возникает из-за рефракции подводимого к плазме лазерного луча на градиентах коэффициента преломления в волнах плотности.

4. Исследованы структуры газовых потоков, индуцируемых ИП оптическими разрядами при переходе между тихим оптическим разрядом и ИПОР в режиме оптического пробоя.

5. Исследовано влияние параметра фокусировки на диапазон интенсивностей, при которых возможно поддержание тихого оптического разряда и ИПОР в режиме оптического пробоя.

6. Исследована динамика поглощения лазерного излучения в тихом оптическом разряде и ИПОР в режиме оптического пробоя в течение отдельного лазерного импульса, определяющая переход из одного режима ИПОР в другой.

7. Установлено, что реализация ИПОР в схеме с пересекающимися лучами приводит к повышению стабильности разряда и излучательных характеристик плазмы за счёт изменения направления индуцируемого разрядом квазистационарного газового потока с осевого на перпендикулярное к оптической оси.

8. Проведено сравнение спектральной яркости НОР и ИПОР при поддержании в одной и той же оптической схеме с пересекающимися лучами при близкой средней по времени мощности подводимого к плазме лазерного излучения.

9. Обнаружен эффект изменения структуры течения газа вокруг ИПОР в режиме лазерного пробоя при возникновении резонансных акустических колебаний в разрядном объёме.

Положения, выносимые на защиту.

На защиту выносятся следующие научные положения:

1. Результаты экспериментального исследования НОР в аргоне, поддерживаемого лазерным излучением с длиной волны 1.08 мкм: определена пороговая мощность поддержания НОР в диапазоне давлений 23–50 бар; измерены параметры плазмы НОР — концентрация электронов ($5.6 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$) и температура ($> 2.1 \times 10^4 \text{ K}$); определены частоты пульсаций конвективного факела вокруг НОР в аргоне при давлениях 25–35 бар.

2. Обнаружение и результаты экспериментального исследования эффекта стабилизации конвективного факела НОР при повышении мощности лазерного излучения выше некоторого предела, зависящего от расстояния между вспомогательными электродами.

3. Результаты экспериментального исследования области существования тихого оптического разряда и импульсно-периодического оптического пробоя в ксеноне высокого давления в зависимости от интенсивности лазерного излучения, частоты повторения импульсов и параметра фокусировки, а также условий перехода от тихого оптического разряда к ИПОР в режиме оптического пробоя.

4. Результаты экспериментального исследования динамики изменения среднего по времени поглощения лазерного излучения в ИПОР при переходе из режима тихого разряда в режим лазерного пробоя, а также непосредственно в тихом оптическом разряде и импульсно-периодическом оптическом пробое в течение отдельного лазерного импульса.

5. Результат исследования структуры и направления потоков в тихом оптическом разряде и ИПОР в режиме оптического пробоя. Изменение преимущественного направления потока при изменении режима ИПОР связано с резким ростом поглощения лазерного излучения и соответствующим нарушением симметричности энерговыведения в фокальной перетяжке.

6. Применение оптической схемы с двумя лазерными лучами, пересекающимися в области фокальных перетяжек для повышения стабильности и характеристик плазмы ИПОР за счёт изменения направления генерируемых потоков газа с осевого на перпендикулярное к оптической оси.

7. Результат сравнительного исследования излучательных характеристик НОР и ИПОР в схеме с пересекающимися лучами: при частоте повторения импульсов до 200 кГц и постоянной энергии в импульсе около 1 мДж плазма ИПОР в зоне пересечения лучей имеет среднюю по времени спектральную яркость, значительно превышающую спектральную яркость НОР при близком уровне средней по времени мощности лазерного излучения.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Получены новые экспериментальные данные по характеристикам непрерывных и импульсно-периодических оптических разрядов в расширенном диапазоне параметров, таких как длина волны лазерного излучения, род плазмообразующего газа, давление газа, способ фокусировки лазерного излучения. Обнаружен и исследован ряд новых явлений, связанных с газовыми потоками, образующимися при оптических разрядах, от которых зависит стабильность разрядов.

Полученные результаты вносят существенный вклад в разработку научных основ для создания источников широкополосного излучения нового поколения на основе ИПОР. Доказано, что технология ИПОР позволяет повысить температуру и концентрацию электронов в плазме и за счёт этого значительно увеличить яркость излучения плазмы в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне. Повышение яркости и потока излучения в УФ диапазоне позволит проводить контроль результатов литографического процесса с большим разрешением, что соответствует задачам миниатюризации электронных компонентов.

Экспериментальные результаты по стабилизации потоков вокруг НОР могут быть использованы для валидации расчётных схем при компьютерном моделировании течений вокруг НОР. Это позволит повысить стабильность и эффективность существующих и вновь разрабатываемых лабораторных и промышленных источников широкополосного излучения высокой яркости, имеющих большое значение для развития микроэлектроники.

Следует также отметить междисциплинарный характер диссертации, объединяющей элементы гидродинамики, теплообмена, физики и механики газового разряда и плазмы, а также взаимодействия лазерного излучения с веществом.

Научные исследования, проведённые в работе, были выполнены в рамках государственных заданий № 123021700057-0 и № 124012500440-9.

Степень достоверности и апробация результатов работы.

Достоверность результатов исследования обусловлена использованием современных экспериментальных методов диагностики, включая спектроскопию, скоростную теневую видеосъёмку с высоким пространственным и временным разрешением, применением независимых методов измерения параметров лазерного излучения и разрядной плазмы, а также высокой воспроизводимостью полученных результатов. Корректность результатов подтверждается также их согласием с полученными ранее теоретическими и экспериментальными данными.

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на всероссийских и международных научных конференциях:

1. XIII Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике, СПбПУ, г. Санкт-Петербург, 2023 г.
2. XIV, XV, XVI Международная конференция – школа молодых учёных «Волны и вихри в сложных средах», ИПМех РАН, г. Москва, 2023, 2024, 2025 гг.
3. XXIII, XXIV, XXV Международное Совещание по Магнитоплазменной Аэродинамике, ОИВТ РАН, г. Москва, 2024, 2025, 2026 гг.

4. XVII Всероссийская школа-семинар «Аэрофизика и физическая механика классических и квантовых систем», ИПМех РАН, г. Москва, 2025 г.

5. Международная научная конференция «Ломоносовские чтения», НИИ Механики МГУ, г. Москва, 2026 г.

Публикации. Результаты работы опубликованы в 5 статьях в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science и приравненных к категории K1 перечня ВАК [A1–A5], получено 6 патентов и опубликовано 10 работ в сборниках трудов конференций.

Личный вклад автора. Автор принимал непосредственное участие в постановке и проведении экспериментов, обработке, анализе и интерпретации полученных экспериментальных данных, представленных в диссертационной работе и статьях [A1–A5]. Автор занимался подготовкой публикаций по теме диссертации. Автор внёс определяющий вклад в разработку и настройку экспериментальных схем и диагностического оборудования и самостоятельно подготовил тексты к 6 патентам на изобретение. Результаты работы лично представлены автором на всероссийских и международных научных конференциях.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы. Общий объём диссертации составляет 163 страницы, включая 59 рисунков и 6 таблиц. Список литературы содержит 180 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** освещена актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования.

В **первой главе** представлен обзор теоретических и экспериментальных работ, на которых был основан выбор направлений исследований по теме диссертации.

Изучение оптических разрядов началось в 1960-х годах практически одновременно с появлением лазеров. Несмотря на огромное количество экспериментальных и теоретических работ в этой области, некоторые аспекты поддержания непрерывных и импульсно-периодических оптических разрядов, в том числе связанные с образованием и динамикой индуцируемых разрядами газовых потоков, требуют дальнейшего исследования.

Для многих применений оптических разрядов определяющую роль играет взаимодействие с внешним потоком газа, как, например, в лазерном плазмотроне, в лазерном ракетном двигателе, при поддержании локализованной плазмы в

набегающем сверхзвуковом потоке с целью управления головной ударной волной при сверхзвуковом обтекании. Этот широкий круг явлений остался за рамками данной диссертации, за исключением случая взаимодействия конвективного факела НОР с относительно медленным потоком газа, искусственно создаваемым с целью подавления пульсаций. Диссертация сосредоточена на изучении самовоздействия разрядов посредством создаваемых ими газовых потоков.

С развитием диодных и волоконных непрерывных и ИП лазеров начали активно развиваться технологии, связанные с поддержанием НОР и ИПОР в инертных газах высокого давления излучением коротковолнового ИК-диапазона на длине волны от 0.9 до 1.1 мкм. Эти технологии позволили реализовать оптические разряды в кварцевых лампах с наполнением инертными газами высокого давления. Относительная техническая простота поддержания оптических разрядов с помощью коротковолнового ИК-излучения позволила создать как небольшие источники широкополосного видимого и ультрафиолетового излучения, так и технологические установки с лазерами киловаттного уровня мощности для применений в микроэлектронной промышленности. При повышении мощности разрядов фактор стабильности, связанной с образованием в разрядах потоков газа, выходит на первый план.

Несмотря на широкий спектр применений, НОР в инертных газах высокого давления, поддерживаемые лазерами коротковолнового ИК-диапазона, до сих пор изучены недостаточно. Данные по пороговым мощностям поддержания НОР излучением на длинах волн в диапазоне 0.9–1.1 мкм в литературе отрывочны и противоречивы, особенно для НОР в аргоне. Процессы термогравитационной конвекции на сегодняшний день изучены только при относительно малой мощности разряда. НОР в аргоне осуществляется при мощности лазерного излучения в несколько раз выше, чем в ксеноне. Коэффициент теплопроводности аргона также в несколько раз больше и соответственно выше доля мощности, которая отводится конвекцией. Поэтому изучение конвективных пульсаций НОР в аргоне, опубликованных данных по которым на момент начала исследований было крайне мало, представляется актуальным.

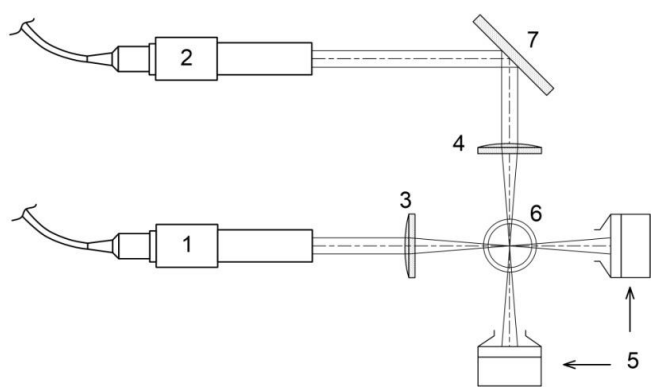
Новый тип ИПОР — тихий оптический разряд — был обнаружен в 2013 году в ИПМех РАН в экспериментах по ИП оптическому пробоя ксенона высокого давления. Механизмы образования потоков в разряде этого типа также исследованы недостаточно, несмотря на то, что своей высокой стабильностью тихий оптический разряд в значительной степени обязан стабильности и направленности индуцируемых им потоков.

Также мало изучены квазистационарные потоки, генерируемые ИПОР в режиме ИП оптического пробоя. Данный тип ИПОР интересен как способ повышения температуры и удельных характеристик плазмы по сравнению с НОР

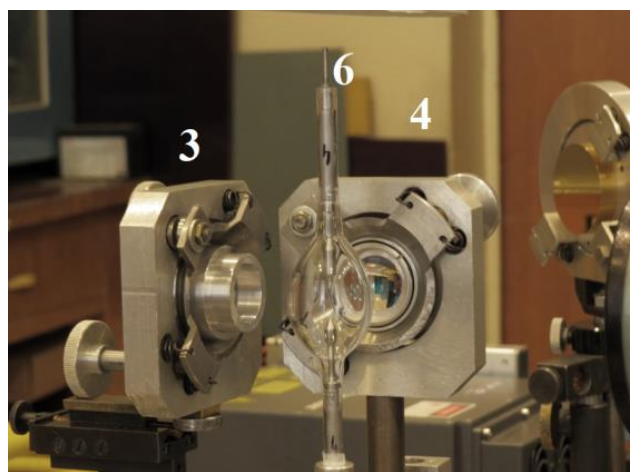
при условии, что будет обеспечена хорошая повторяемость характеристик плазмы от импульса к импульсу. Поэтому необходимо изучить вопросы, связанные с генерацией потоков, нарушающих стабильность ИПОР, в особенности при переходе между двумя упомянутыми режимами ИПОР.

На момент начала работ по диссертации для решения указанного круга задач была разработана программа исследования факторов, влияющих на стабильность НОР и ИПОР в инертных газах повышенного давления при поддержании излучением непрерывных и ИП волоконных иттербиевых лазеров различного уровня мощности. Для НОР при уровне мощности от сотен ватт до киловатта требовалось экспериментально исследовать условия поддержания в аргоне и ксеноне в качестве плазмообразующего газа, в том числе конвективные пульсации, получить основные характеристики плазмы, а также исследовать возможность стабилизации факела термогравитационной конвекции НОР. Для ИПОР в режимах оптического пробоя и тихого оптического разряда предполагалось провести исследование механизмов генерации газовых потоков в условиях перехода между режимами ИПОР и на этой основе изучить возможность стабилизации ИПОР в режиме лазерного пробоя, интересного для применений благодаря потенциально высоким удельным характеристикам плазмы.

Во **второй главе** представлены результаты исследования НОР в аргоне при поддержании лазерным излучением коротковолнового ИК-диапазона. Использовалась схема инициирования и поддержания НОР, представленная на рисунке 1.



а)



б)

Рисунок 1 — а) Схема инициирования и поддержания НОР: 1 — непрерывный лазер для поддержания НОР; 2 — импульсно-периодический лазер для инициирования НОР; 3, 4 — фокусирующие линзы; 5 — поглотители-измерители мощности излучения; 6 — колба с аргоном; 7 — поворотное зеркало. б) Фото колбы 6 с линзами 3, 4; справа — поворотное зеркало 7 и край измерителя мощности 5

Излучение непрерывного волоконного иттербиевого лазера Raycus RFL-C1500 (1) с максимальной выходной мощностью $P = 1500$ Вт на длине волны $\lambda = 1.08$ мкм фокусировалось просветлённой линзой (3) с фокусным расстоянием $f = 50$ мм внутри кварцевых колб (6) с наружным диаметром 18 или 32 мм, наполненных аргоном под давлением, соответственно, 30 и 22 бар. Инициирование НОР осуществлялось путём оптического пробоя газа в фокусе с помощью импульсно-периодического лазера YLPP-1-150V-30 (2). Импульсное излучение фокусировалось второй линзой (4), фокальные перетяжки излучения импульсного и непрерывного лазеров совмещались. Лазерное излучение, прошедшее через плазму, попадало на измеритель мощности (5).

Для измерения спектральной яркости излучение плазмы НОР собиралось с помощью ахроматической линзы с апертурой 10 мм и фокусным расстоянием $f = 116$ мм. Увеличенное в 14–15 раз изображение плазмы проецировалось на входную апертуру оптоволоконного спектрометрического измерителя освещённости, расположенную на расстоянии 1.9 м от плазмы НОР.

Получены результаты экспериментального исследования пороговых мощностей поддержания НОР в аргоне в диапазоне давлений 23–50 бар (рисунок 2, заштрихованные кружки и квадраты).

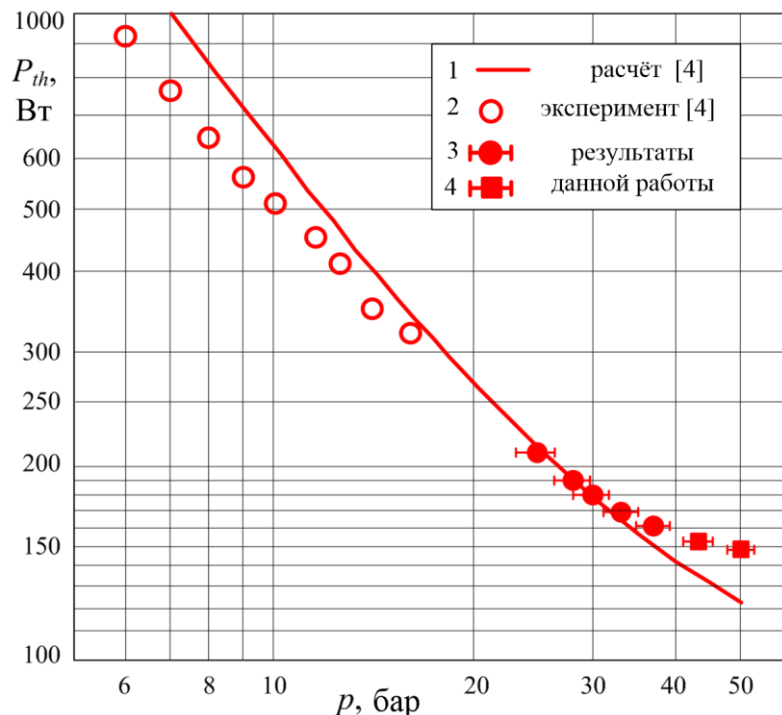


Рисунок 2 — Пороговая мощность поддержания НОР в аргоне P_{th} в зависимости от давления p : (1) теоретическая оценка с коэффициентом поглощения лазерного излучения, вычисленным по модифицированной формуле Унзольда-Крамерса [5] с учётом вклада связанных электронных состояний с энергией возбуждения $E \geq 12.8$ эВ [4]; (2) экспериментальные данные работы [4] (параметр фокусировки $f/d = 8$, $\lambda = 1.07$ мкм) — светлые кружки; (3) и (4) экспериментальные результаты данной диссертации (параметр фокусировки $f/d = 3.1$, $\lambda = 1.08$ мкм)

Пороговые мощности поддержания НОР согласуются с экспериментальными данными работы [4] (нанесены в виде светлых кружков на графике рисунка 2) и подтверждают теоретические оценки работы [4] (рисунок 2, линия), которые были сделаны на основе предложенного механизма поглощения лазерного излучения с длиной волны 1.07 мкм с определяющим вкладом поглощения в крыльях уширенных спектральных линий, то есть за счёт переходов между связанными энергетическими уровнями атома аргона. Полученные результаты могут рассматриваться как экспериментальное подтверждение предложенного в работе [4] механизма поглощения лазерного излучения для случая плазмы аргона.

Методом скоростной теневой съёмки определены частоты пульсаций и характерные размеры конвективного факела вокруг НОР в зависимости от мощности лазерного излучения. Полученные при давлениях 25–35 бар данные показали, что частоты пульсаций удовлетворяют закону подобия, полученному ранее в работах [6, 7] и справедливому также для случая пульсирующих ламинарных пламён (рисунок 3).

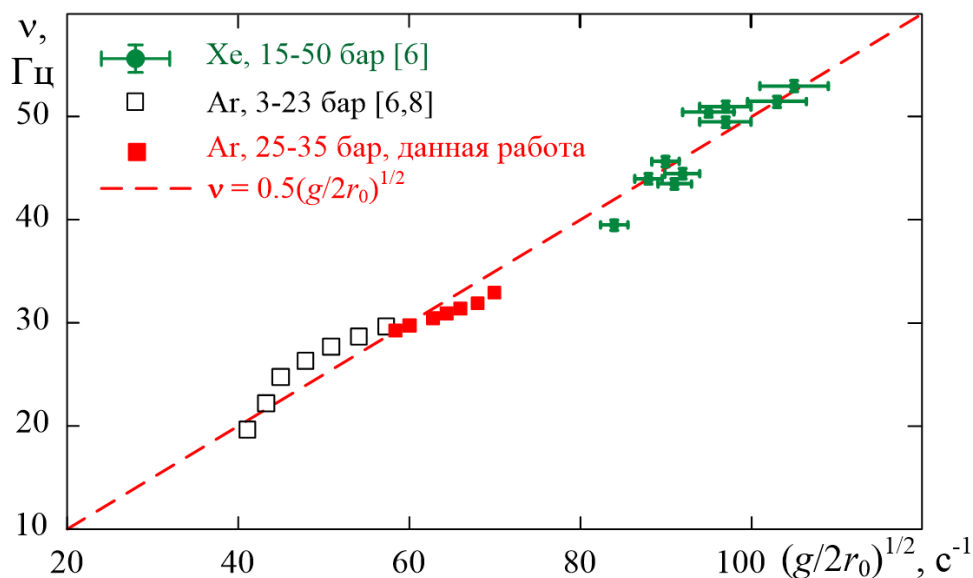


Рисунок 3 — Зависимость частоты пульсаций НОР ν от характерной конвективной частоты $\sqrt{g/2r_0}$ в аргоне и ксеноне по данным этой работы и [6, 8]

Объёмная излучательная способность плазмы при поддержании НОР лазерным излучением на длине волны 1.08 мкм определялась из полученных распределений яркости плазмы в области непрерывного спектра с помощью обратного преобразования Абеля в предположении осевой симметрии [9]. Результаты представлены на рисунке 4.

На основе измерения абсолютных значений максимальной спектральной яркости плазмы и радиального профиля относительной интенсивности излучения плазмы на длине волны 512 нм вычислялось радиальное распределение объёмной излучательной способности плазмы (Рисунок 4, а). Исходя из известных

соотношений для излучательной способности плазмы в непрерывном спектре [9], определялось радиальное распределение концентрации электронов в плазме (Рисунок 4, б) для последующего расчёта радиального профиля температуры плазмы (Рисунок 4, в). Для расчёта распределения концентрации электронов использовалась формула Бибермана-Нормана [10] для плазмы водородоподобного газа. Радиальное распределение температур получено из радиального распределения концентрации электронов с помощью уравнения Саха в предположении локального термодинамического равновесия, которое для аргонной плазмы высокого давления заведомо выполняется [1].

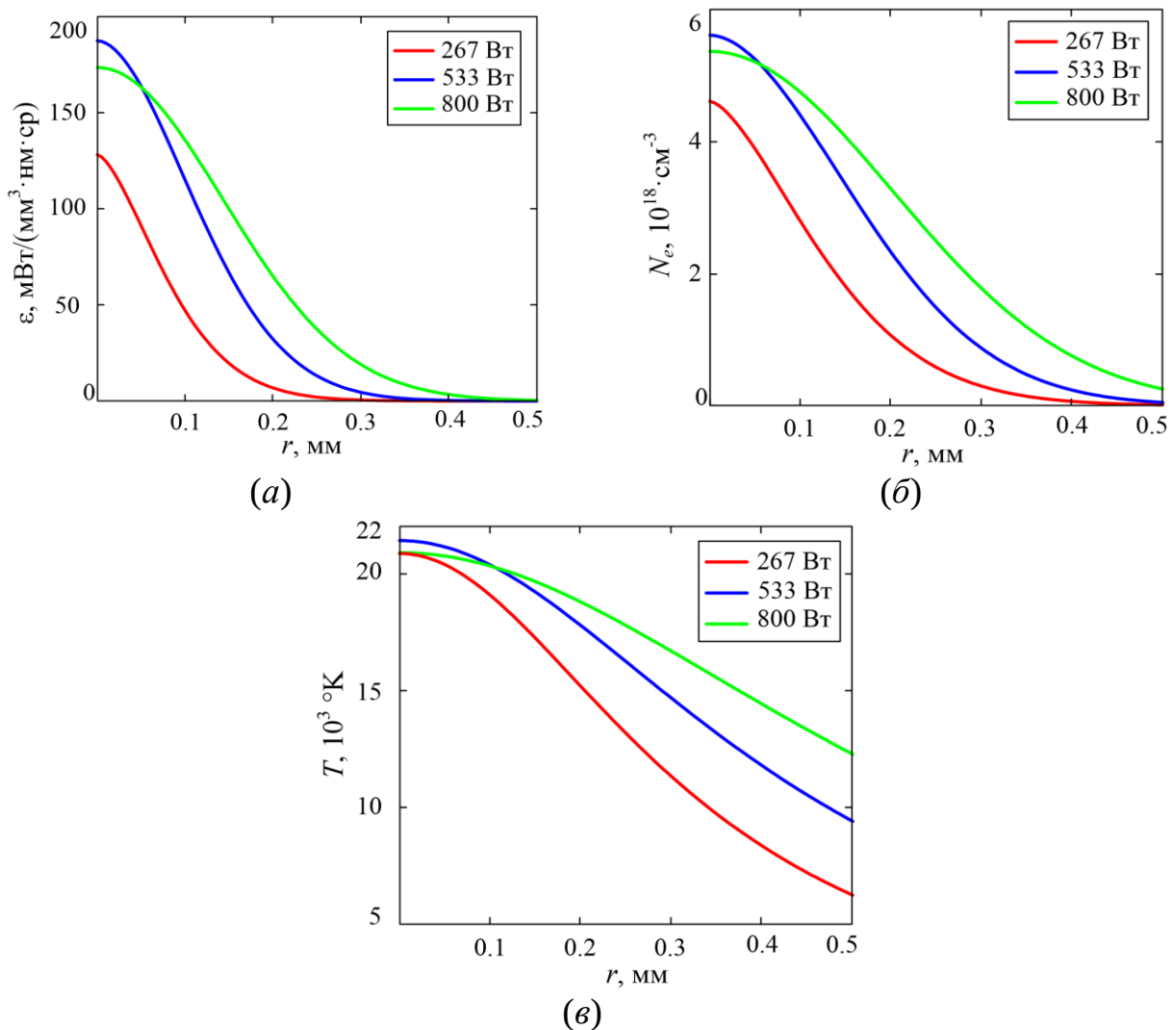


Рисунок 4 — а) Радиальные профили спектральной излучательной способности $\epsilon(r)$ плазмы НОР в Аг на длине волны 512 нм при трёх уровнях мощности лазерного излучения; б) Радиальные профили концентрации электронов $N_e(r)$ в плазме НОР; в)

Радиальные профили температуры плазмы $T(r)$ в предположении ЛТР. В правом верхнем углу указана мощность лазерного излучения на входе в колбу, соответствующая каждой из кривых. Рабочее давление аргона росло с ростом мощности от 30 до 40 бар

Показано, что достигаются максимальные температуры плазмы свыше 20–21 кК. Такие значения намного выше значений температур плазмы в аргоне при высоком давлении при поддержании НОР излучением CO₂-лазера (12–14 кК) и выше, чем температуры НОР в ксеноне (16–18 кК), что перспективно для использования НОР в аргоне в качестве широкополосного источника ультрафиолетового излучения большой яркости.

В третьей главе исследован вновь обнаруженный эффект стабилизации факела термогравитационной конвекции НОР в ксеноне высокого давления по достижении определённого порогового уровня мощности лазерного излучения в нескольких разрядных объёмах с вспомогательными электродами.

Для поддержания НОР в экспериментах использовался непрерывный волоконный иттербиевый лазер Raycus RFL-C1500 с длиной волны $\lambda = 1.08$ мкм, луч которого фокусировался вблизи центра кварцевых колб с ксеноном при высоком давлении. НОР инициировался с помощью кратковременного дугового разряда между вспомогательными электродами. Использовались колбы из плавленого кварца диаметром от 14 до 44 мм, наполненные ксеноном до давления от 8 до 14 бар при нормальных условиях.

Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 5. Лазерный луч диаметром $d = 15$ мм подводился к разрядной колбе снизу с помощью охлаждаемого алюминиевого поворотного зеркала, и фокусировался в колбе в центре промежутка между вспомогательными электродами с помощью кварцевой линзы с фокусным расстоянием $f = 50$ мм (параметр фокусировки $f/d = 3.3$).

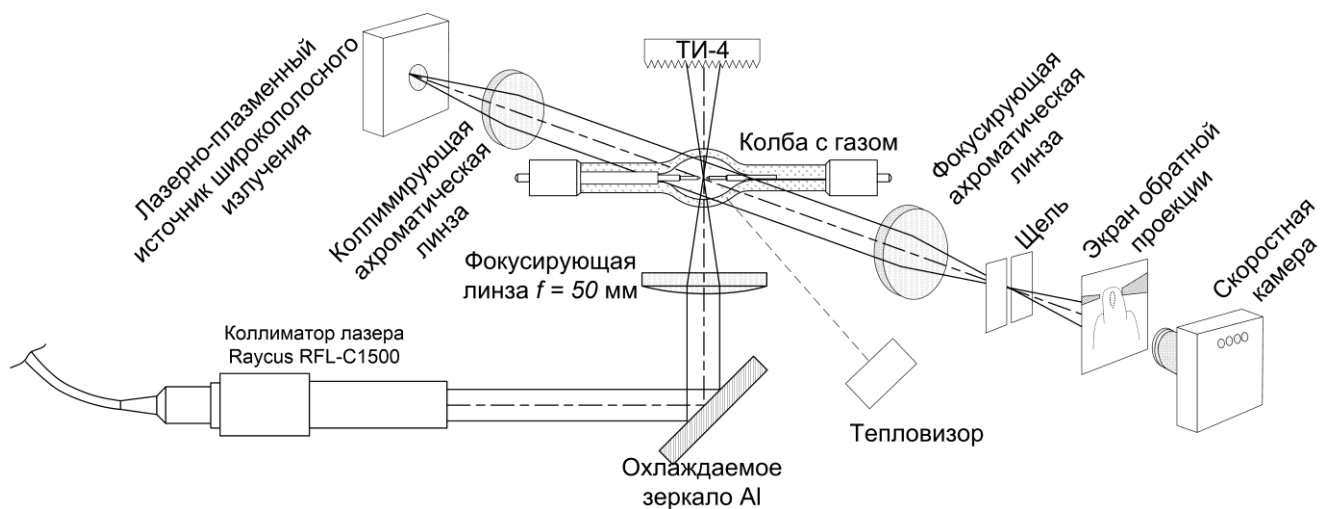


Рисунок 5 — Схема экспериментальной установки. Показана траектория лазерного луча и теневого прибора для исследования градиента плотности газа. Луч непрерывного лазера, отражаясь от зеркала, с помощью линзы фокусируется в центре объёма с ксеноном, где располагается НОР. Прошедший луч поглощается измерителем мощности ТИ-4. Конвективный факел НОР регистрируется методом скоростной теневой съёмки.

Мощность прошедшего излучения регистрировалась термопарным измерителем мощности лазерного излучения ТИ-4. Температура наружной поверхности колбы измерялась с помощью тепловизора Flir E60.

Пульсации факела термогравитационной конвекции НОР наблюдались теневым методом. Область вокруг НОР просвечивалась коллимированным излучением лазерно-плазменного источника широкополосного излучения ЛПИ-50 [2], затем излучение собиралось линзой, в фокусе которой была расположена вертикальная щель. Теневое изображение наблюдалось на экране обратной проекции. Изображение с экрана регистрировалось высокоскоростной камерой Optronis CP70-1-M/C-1000 с частотой 1000 кадров в секунду.

В результате проведённых исследований определена пороговая мощность лазерного излучения, при которой происходит стабилизация (подавление пульсаций) конвективного факела НОР, в зависимости от межэлектродного расстояния в кварцевых колбах, наполненных ксеноном под давлением 8–14 бар при нормальных условиях. На основе полученных экспериментальных данных в качестве основного механизма стабилизации рассматривается влияние дополнительных конвективных потоков от электродов, возникающих по мере нагрева электродов излучением плазмы НОР. Прогрев электродов до температуры $T_{el} = 1000\text{--}1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ позволяет за счёт дополнительного конвективного потока вдоль границ конвективного факела НОР снять условия возникновения неустойчивости и стабилизировать конвективный факел вокруг НОР. Порог стабилизации определяется межэлектродным расстоянием, а также положением плазмы относительно оси электродов. Стационарные теневые фотографии факела термогравитационной конвекции в различных лампах после стабилизации НОР представлены на рисунке 6.

Проведена скоростная видеосъёмка процесса постепенного затухания пульсаций конвективного факела НОР после повышения мощности лазерного излучения до пороговой величины, при которой наблюдается стабилизация. Установлено, что в процессе стабилизации постепенно уменьшается амплитуда конвективных пульсаций без изменения частоты. Процесс стабилизации занимает от 1 до 2 минут после включения мощности, превышающей пороговую. Это время интерпретировано как необходимое для нагрева электродов до температуры, обеспечивающей нужную скорость конвективных потоков от электродов. Во всех случаях, когда наблюдалась стабилизация, диаметр конвективного факела был не меньше расстояния между электродами. В отдельном эксперименте со специальной лампой, межэлектродное расстояние в которой было в несколько раз больше диаметра конвективного факела во всём диапазоне доступной мощности лазерного излучения в пределах до 1 кВт, стабилизации конвективных пульсаций не наблюдалось.

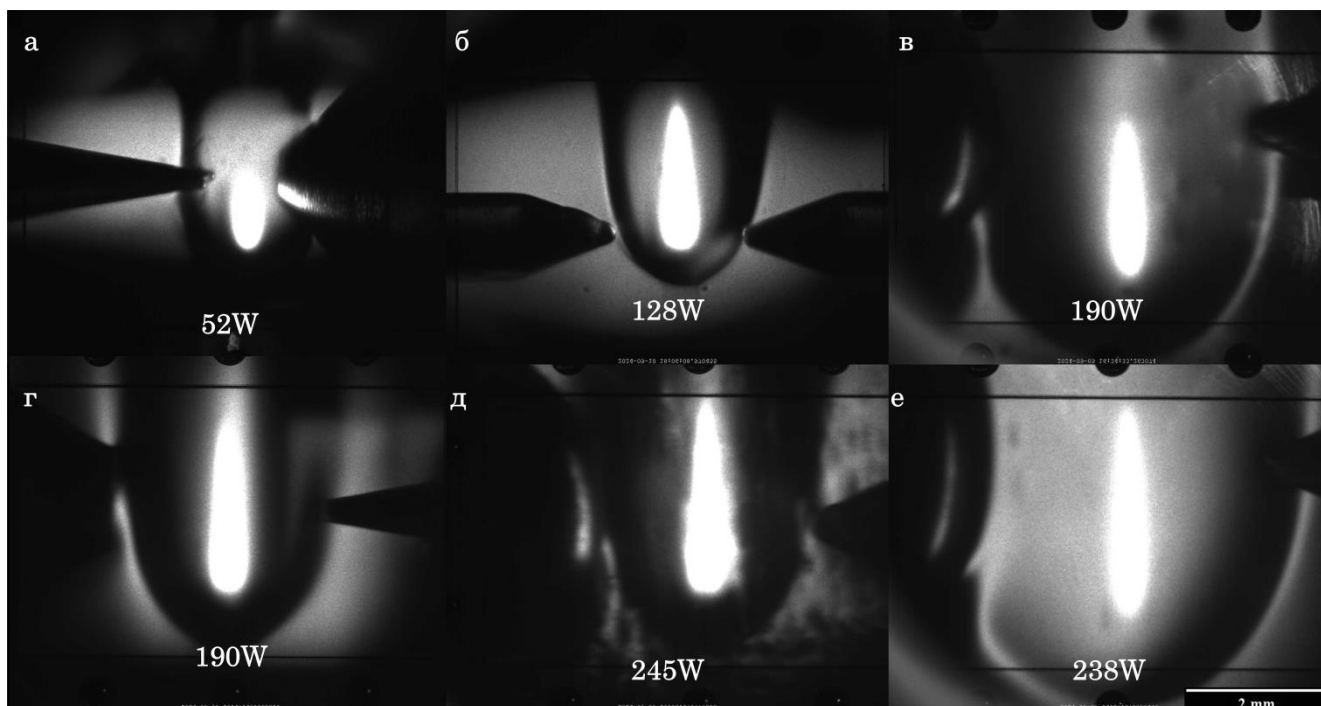


Рисунок 6 — Теневые фотографии стабилизированного конвективного факела в различных лампах. а) OSRAM XBO 100W OFR б) специальная лампа 1, в) ДКсШ-500, г) OSRAM XBO 150 W/1, д) ДКсШ-200, е) ДКсЭл-1000. Размер кадров 5.25x4.20 мм²

По результатам серии экспериментов был построен график зависимости пороговой мощности лазерного излучения, при которой наблюдалась стабилизация факела НОР при установившемся распределении температуры в лампе, от межэлектродного расстояния (рисунок 7). Прямая линия — результат линейной аппроксимации полученных данных методом наименьших квадратов.

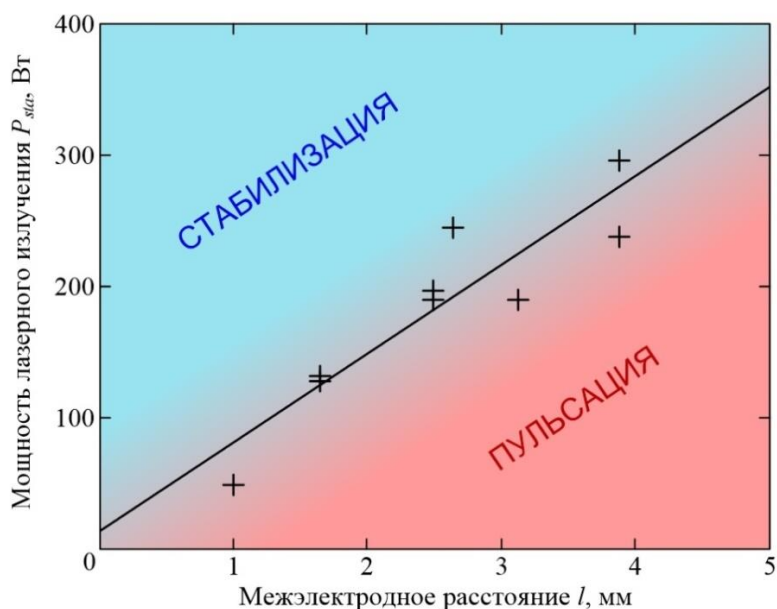


Рисунок 7 — Данные по пороговой мощности лазерного излучения P_{sta} , при которой происходит стабилизация конвективного факела НОР в Хе, в зависимости от расстояния между электродами ламп l . Линия показывает аппроксимацию данных методом наименьших квадратов

С целью уточнения физических механизмов наблюдаемого эффекта М.В. Торчик было выполнено численное моделирование процесса пульсаций конвективного факела вокруг локальной области тепловыделения в зависимости от температуры поверхности электродов. В результате выяснилось, что причиной стабилизации колебаний факела НОР является появление дополнительных конвективных потоков газа со скоростями до 27 см/с вокруг электродов, нагретых до температуры 1200°К. Установлено, что температура поверхности электродов для эффекта подавления конвективных пульсаций должна быть не менее $T_{el} = 1200 \text{ К}$ (930 °С). Дополнительный поток на границе основного конвективного факела приводит к уменьшению сдвига скорости на границе горячего и холодного газа, тем самым устраняя условия развития неустойчивости типа Кельвина-Гельмгольца.

Кроме того, проводились эксперименты с НОР в разрядном объёме в форме сапфировой трубки с металлическими фланцами, наполненной ксеноном под давлением 30 бар, при вертикальном расположении трубки и горизонтальном подводе лазерного излучения. Электродов в трубке не было, НОР инициировался от плазмы лазерного пробоя излучением дополнительного импульсно-периодического лазера. Пульсации конвективного факела с характерной частотой более 40 Гц в такой конфигурации наблюдались во всех экспериментах. Кроме того, обнаружались ранее не наблюдавшиеся пространственно-временные неоднородности плазмы НОР (рисунок 8).

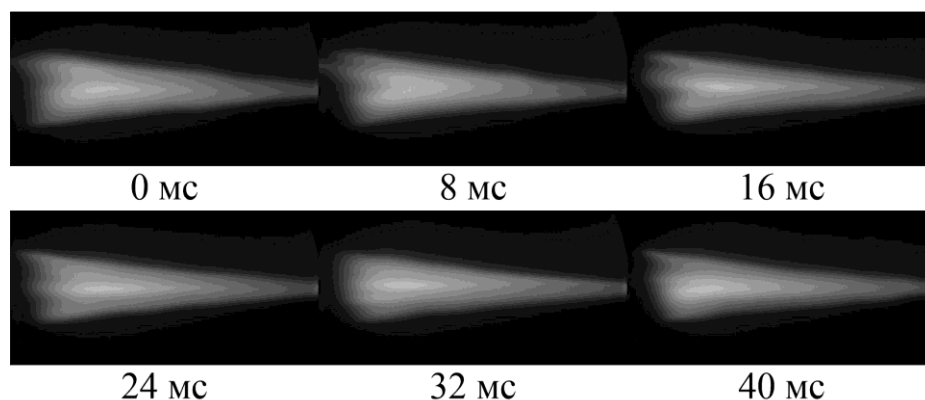


Рисунок 8 — Серия фотографий плазмы НОР при мощности непрерывного лазерного излучения 675 Вт с интервалом 4 мс. Видны неустойчивости в виде горизонтальных страт разной яркости, перемещающихся сверху вниз. Размер одного кадра 3.8x1.9 мм²

Неоднородности данного типа наблюдаются впервые и являются следствием фазовых искажений (рефракции) лазерного луча при прохождении через волны плотности в нисходящем газовом потоке вдоль стенки трубки (рисунок 9). Последовательность теневых изображений на рисунке 9 получена сразу после отключения лазера, поддерживающего НОР. Наблюдаемые волны плотности в виде искривленных горизонтальных неоднородностей, перемещающихся сверху

вниз и постепенно затухающих, индуцированы пульсациями конвективного факела НОР. В экспериментах с горизонтальным расположением трубки и вертикальным подводом лазерного луча снизу вверх влияние пульсаций газового потока на подводимый луч минимизировалось, и неоднородности плазмы не наблюдались.

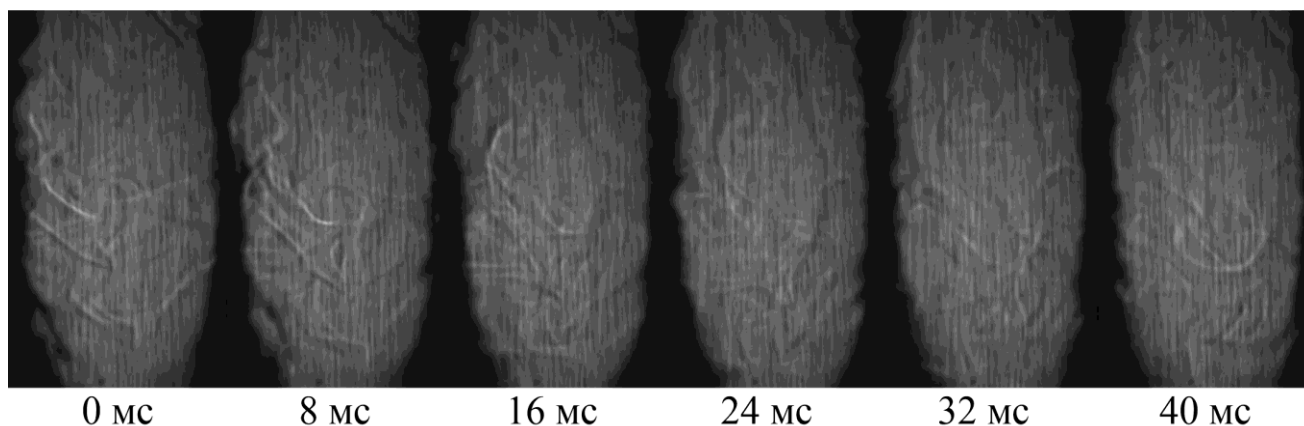


Рисунок 9 — Серия шпирен фотографий неоднородностей коэффициента преломления газа в виде горизонтальных волн, вызванных пульсацией при конвекции горячего газа вокруг НОР, сразу после выключения лазера. Размер одного кадра $4.35 \times 7.45 \text{ мм}^2$

Представленные в данной главе результаты были получены в естественных условиях эксплуатации ламп, таких же, как в источниках широкополосного излучения высокой спектральной яркости. Проведены эксперименты в нескольких лампах с различным давлением, объёмом и межэлектродным расстоянием. Результаты данной главы можно использовать при проектировании разрядных объёмов для стабильных плазменных источников широкополосного излучения высокой яркости, а также для валидации гидродинамических расчётов конвективных течений при численном моделировании.

В **четвёртой** главе представлены результаты исследования тихого оптического разряда и ИП оптического пробоя в ксеноне высокого давления. Определены области существования в зависимости от интенсивности лазерного излучения, частоты повторения импульсов и параметра фокусировки. Исследованы потоки, генерируемые разрядами, и определена динамика поглощения разрядами лазерного излучения.

В главе исследован тихий оптический разряд как предпробойная стадия ИПОР, поддерживаемого излучением лазера IPG YPLN-1-100-200-R на длине волны $\lambda = 1.064 \text{ мкм}$ в ксеноне под давлением $p = 12 \text{ бар}$. Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 10. Лазерный луч диаметром $d = 7.1 \text{ мм}$ фокусировался в центре колбы с параметрами фокусировки $f/d = 10.6; 7; 4.5$ с помощью кварцевых линз с фокусными расстояниями $f = 75; 50; 32 \text{ мм}$, соответственно.

Луч, прошедший через колбу, попадает на коллимирующую линзу. После линзы сформированный ею параллельный пучок проходит через светоделительную кварцевую пластину. Проходящая часть попадает на измеритель мощности Ophir StarLite 50A-BB-SH-26. Отражённый от светоделительной пластины луч, последовательно проходит через нейтральный, затем граничный светофильтр, пропускающий только ИК-излучение, а также через рассеивающую пластину. После чего направляется на быстродействующий датчик ИК-излучения ФЭУ-62. Линза собирает излучение плазмы, которое проходит через граничный светофильтр и попадает на ФЭУ-69, подключенный к частотомеру ЧЗ-34 для счёта количества и частоты пробоев. Потоки визуализируются теневыми методами с применением источника излучения ЛПИ-50 с НОР [2].

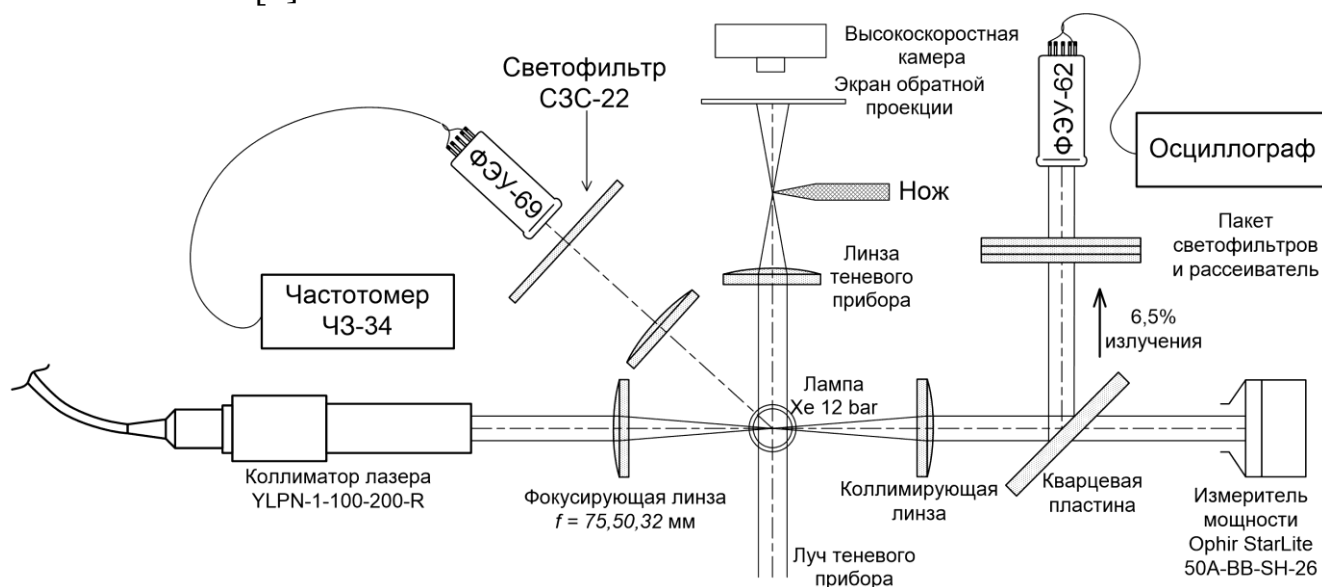


Рисунок 10 — Схема экспериментальной установки (вид сверху). Луч импульсно-периодического лазера с помощью линзы фокусируется в центре колбы с Хе $p = 12$ бар.

Справа система измерения средней мощности излучения и формы импульса. Слева система регистрации импульса излучения плазмы и частоты лазерных пробоев. В центре теневой прибор для регистрации течений вокруг разряда

Обнаружены квазистационарные направленные потоки, генерируемые как тихим оптическим разрядом, так и ИП оптическим пробоем. Получены последовательности теневых изображений нескольких основных структур данных потоков. Кроме того, даны оценки для скорости потоков, генерируемых ИП оптическим пробоем (3 м/с), тихим оптическим разрядом (60 мм/с), а также оценка объёмного расхода газа ($3.5 \text{ мм}^3/\text{с}$) в отдельной струе, генерируемой тихим оптическим разрядом.

В случае тихого оптического разряда было обнаружено четыре различных режима, различающихся видом структурированных потоков, исходящих от тихого

оптического разряда, по мере изменения его характеристик при переходе к сериям оптических пробоев. Эти структуры показаны на рисунке 11, *a–e*.

В каждом из режимов наблюдаются картины струйных течений газа из трёх фиксированных точек вдоль перетяжки сфокусированного луча, занятой тихим оптическим разрядом. Отдельные струи объединяются в потоки, движущиеся в различных направлениях под углом к оси лазерного луча. Стрелками показано направление потоков. Их движение заметно при замедленном воспроизведении видеороликов, соответствующих кадрам рисунка 11.

При ИП лазерном пробое из-за увеличенного поглощения образуется быстрый турбулентный поток, направленный навстречу лазерному лучу (рисунок 11, *e*). Такой поток оказывает определяющее влияние на стабильность и повторяемость характеристик разряда, поскольку за счёт фазовых искажений на хаотически распределённых градиентах плотности и коэффициента преломления характеристики луча сильно изменяются перед тем, как он достигнет фокуса.

В главе показано, что структура струйных течений, образующихся при тихом оптическом разряде, отвечает распределению интенсивности лазерного излучения в фокальной перетяжке с несколькими максимумами излучения, возникающими вследствие астигматизма и дефокусировки наведённой разрядом газовой тепловой линзой. Направление образующихся потоков нагретого газа в стороны от оптической оси способствует стабильности тихого оптического разряда.

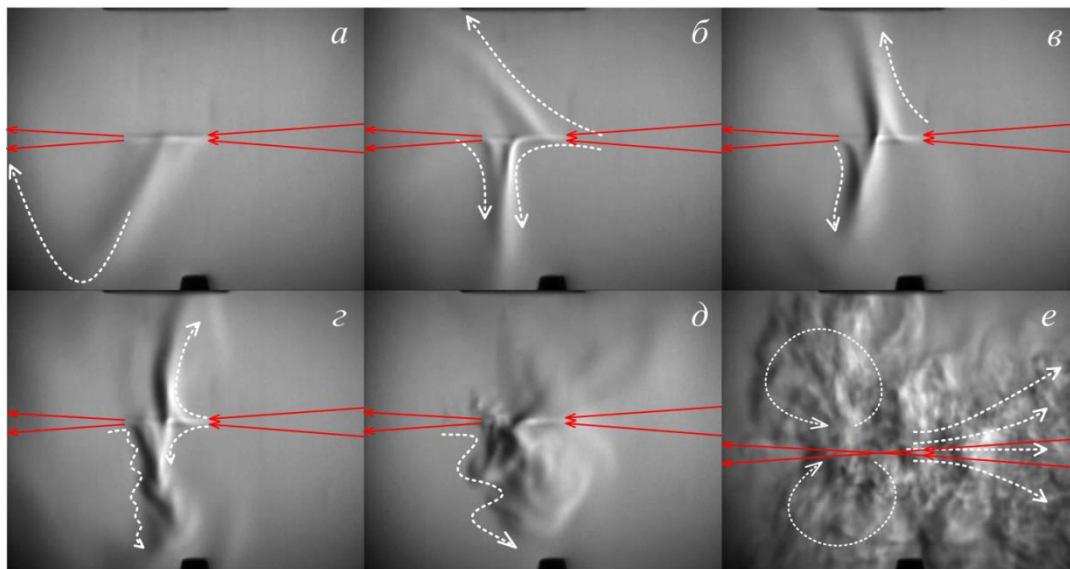


Рисунок 11 — Теневые фотографии режимов течений вокруг тихого оптического разряда (*a-d*) и вокруг ИП оптического пробоя (*e*). $\nu_p = 26$ кГц, $E_p = 1$ мДж, $f/d = 10.6$ (красные стрелки обозначают границы луча). Сила тяжести направлена вниз. Лазерный луч падает справа налево. *a, б, в* — квазистационарные ламинарные струйные потоки вокруг тихого оптического разряда. *г, д* — при увеличении интенсивности лазерного излучения струи осциллируют, быстро меняя направление. Режим *e* — картина турбулентных потоков после серии оптических пробоев

Методом модуляции ИП лазерного излучения с периодом 0.3–1 мс получены кадры начальных этапов установления течения при оптическом пробое, при которых наблюдаются потоки от отдельных импульсов или от небольшой серии импульсов оптического пробоя (рисунок 12). Эти кадры позволяют лучше понять механизм возникновения потоков вследствие коллапса области пониженной плотности газа, периодически образующейся при импульсном тепловыделении в ИП оптическом пробое или тихом оптическом разряде.

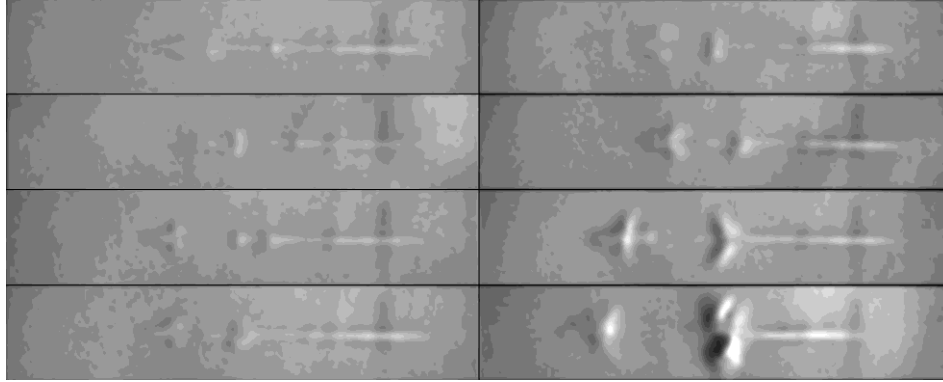


Рисунок 12 — Теневые фотографии начальных этапов ИП оптического пробоя, иллюстрирующие динамику его развития за время < 1 мс. Параметр фокусировки $f/d = 15.8$. Частота повторения импульсов $\nu_p = 20$ кГц, энергия в импульсе $E_p = 1$ мДж. Луч направлен справа налево. Размер каждого кадра 2.5×0.5 мм²

Исследована динамика изменения среднего по времени поглощения лазерного излучения в ИПОР при переходе из режима тихого разряда в режим лазерного пробоя, а также непосредственно в тихом оптическом разряде и ИП оптическом пробое в течение отдельного лазерного импульса (рисунок 13).

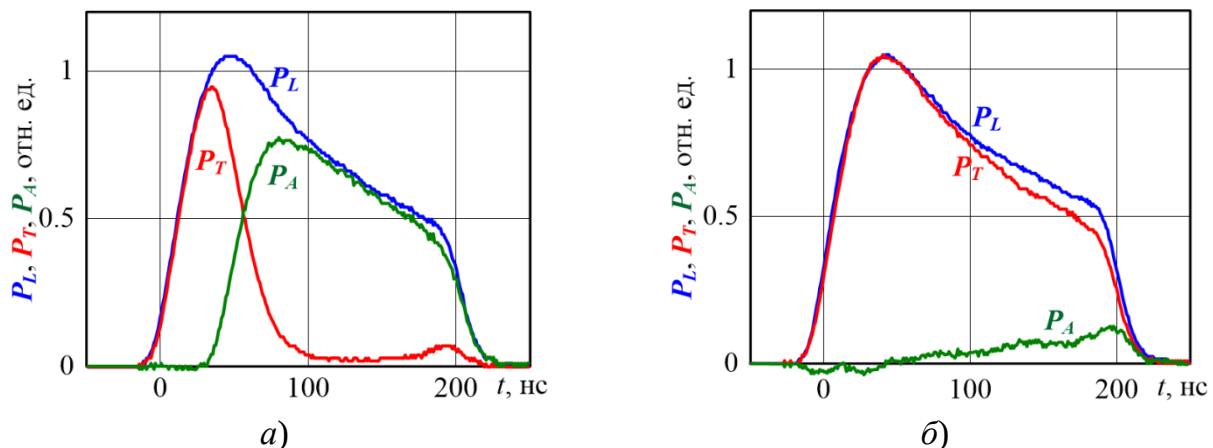


Рисунок 13 — Осциллограммы импульса подводимого излучения лазера YLPN-1-100-200-R с энергией в импульсе $E_p = 1$ мДж и частотой $\nu_p = 30$ кГц, сфокусированного в объёме колбы с $f/d = 10.6$ ($P_L(t)$, синяя линия), осциллограммы импульсов прошедшего излучения при тихом разряде (красная линия $P_T(t)$, а) и при оптическом пробое (красная линия $P_T(t)$, б). Зелёная линия $P_A(t) = P_L(t) - P_T(t)$ (соответствует поглощению в плазме) при оптическом пробое, а и при тихом разряде, б

ИП оптический пробой характеризуется высоким поглощением в импульсе (от 70 до 100 %, тогда как среднее поглощение около 15 %) и высоким энерговыделением на уровне сотен микроджоулей, и соответственно более высокими скоростями генерируемых потоков.

Переход от тихого оптического разряда к оптическому пробую при импульсно-периодическом режиме исследовался в виде зависимостей доли средней по времени мощности лазерного излучения, поглощённой разрядом (рисунок 14), а также частоты оптических пробоев (рисунок 15) в зависимости от:

— энергии в импульсе от 0.35 до 1 мДж при частоте следования импульсов $\nu_p = 20$ кГц и параметрах фокусировки $f/d = 10.6$; 7; 4.5.

— частоты следования импульсов от 20 до 55 кГц при энергии в импульсе $E_p = 1$ мДж и параметрах фокусировки $f/d = 10.6$; 7; 4.5.

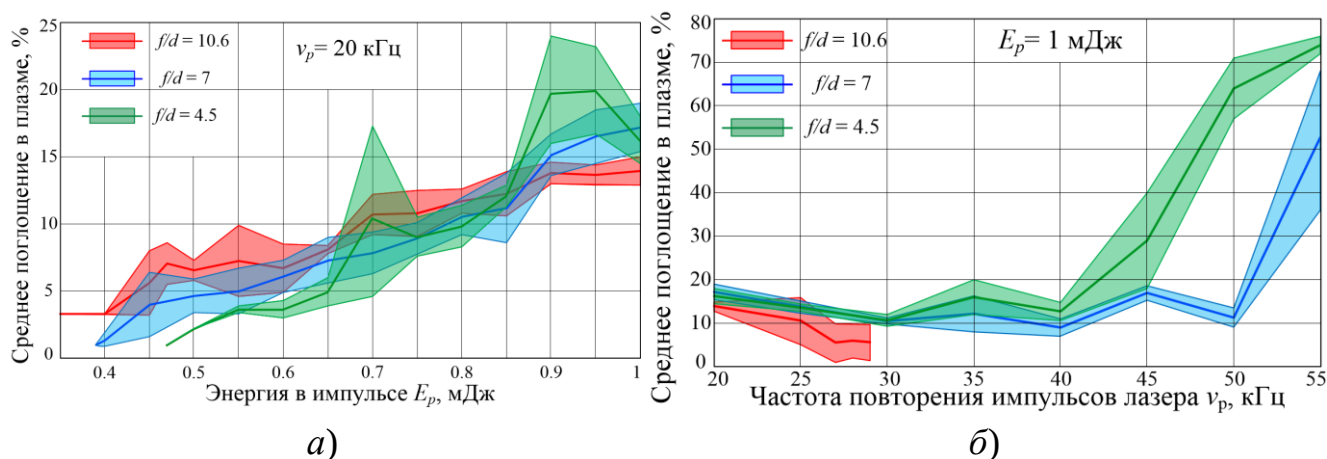


Рисунок 14 — Влияние энергии в импульсе при частоте импульсов $\nu_p = 20$ кГц (а) и частоты следования импульсов при энергии в импульсе $E_p = 1$ мДж (б) на процент поглощения мощности при пробое при параметрах фокусировки $f/d = 10.6$; 7; 4.5.

Заштрихованные области вдоль кривых показывают статистические отклонения

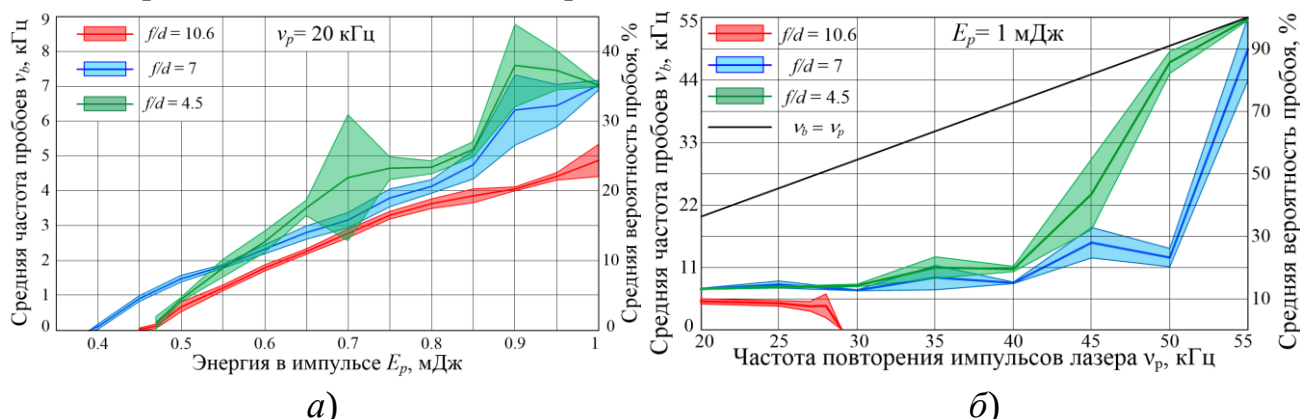


Рисунок 15 — Влияние энергии в импульсе при частоте импульсов $\nu_p = 20$ кГц (а) и частоты следования импульсов при энергии в импульсе $E_p = 1$ мДж (б) на среднюю частоту пробоев в секунду при параметрах фокусировки $f/d = 10.6$; 7; 4.5.

Заштрихованные области вдоль кривых показывают статистические отклонения

Определён диапазон интенсивности лазерного излучения для существования тихого оптического разряда в данных условиях при частоте повторения импульсов $\nu_p = 20$ кГц от 1.3×10^9 до 1.5×10^9 Вт/см². При интенсивности свыше 4×10^9 Вт/см² и частоте повторения выше 50-55 кГц наблюдаются пробой в каждом импульсе при параметре фокусировки $f/d \leq 7$. При $f/d = 10.6$ и $\nu_p > 28$ кГц тихий оптический разряд не переходит в импульсно-периодический оптический пробой по причине дефокусировки тепловой линзой.

Обнаружено, что диапазон энергий в импульсе, при котором реализуется тихий оптический разряд, сужается при фокусировке короткофокусными линзами с $f \leq 75$ мм (параметр фокусировки $f/d \leq 10.6$). При такой или лучшей фокусировке за пределами диапазона 0.3–0.4 мДж либо возникает импульсно-периодический оптический пробой, либо тихий оптический разряд гаснет. Увеличение интенсивности в фокусе за счёт уменьшения aberrаций также ведёт к переходу от тихого оптического разряда к импульсно-периодическому оптическому пробую, и наоборот. Самыми благоприятными для устойчивой реализации тихого оптического разряда являются фокусные расстояния $f \geq 112$ мм ($f/d \geq 15.8$). В устойчивых режимах тихого оптического разряда, далёких от пробоя, наблюдается только термогравитационная конвекция без генерации динамических структурированных потоков в различных направлениях.

Установлено, что более высокая частота оптических пробоев при $f/d = 7$ области энергий в импульсе от 0.4 до 0.55 мДж наблюдается по причине того, что из-за сферической aberrации, вносимой фокусирующими линзами, параметр фокусировки $f/d = 7$ соответствует минимальному диаметру фокальной перетяжки.

В пятой главе изложены результаты исследования ИПОР, поддерживаемого на пересечении двух сфокусированных лучей.

Создана оптическая схема для поддержания НОР и ИПОР в двух лазерных лучах, пересекающихся вблизи фокальных перетяжек, на основе непрерывного или ИП лазера с близкими пространственными характеристиками излучения (рисунок 16). Два луча получают путём разделения лазерного луча на две компоненты с последующей их фокусировкой и сведением в одном разрядном объёме с пересечением. Излучение фокусировалось внеосевыми параболическими зеркалами вблизи межэлектродного промежутка короткодуговой лампы, наполненной 12 бар Хе. Для реализации режима поддержания ИПОР в пересекающихся лучах использовалась светоделительная пластина с коэффициентами отражения и пропускания около 50 %.

В схеме ИПОР с двумя лазерными лучами, пересекающимися в области фокальных перетяжек, было экспериментально продемонстрировано, что

генерация потоков в перетяжке одного луча и в области пересечения двух лучей происходит по-разному. При ИПОР в перетяжке одного луча (второй луч был перекрыт) образуется квазистационарный турбулентный поток, направленный вдоль оптической оси, преимущественно навстречу подводимому лазерному лучу (рисунок 17, а).

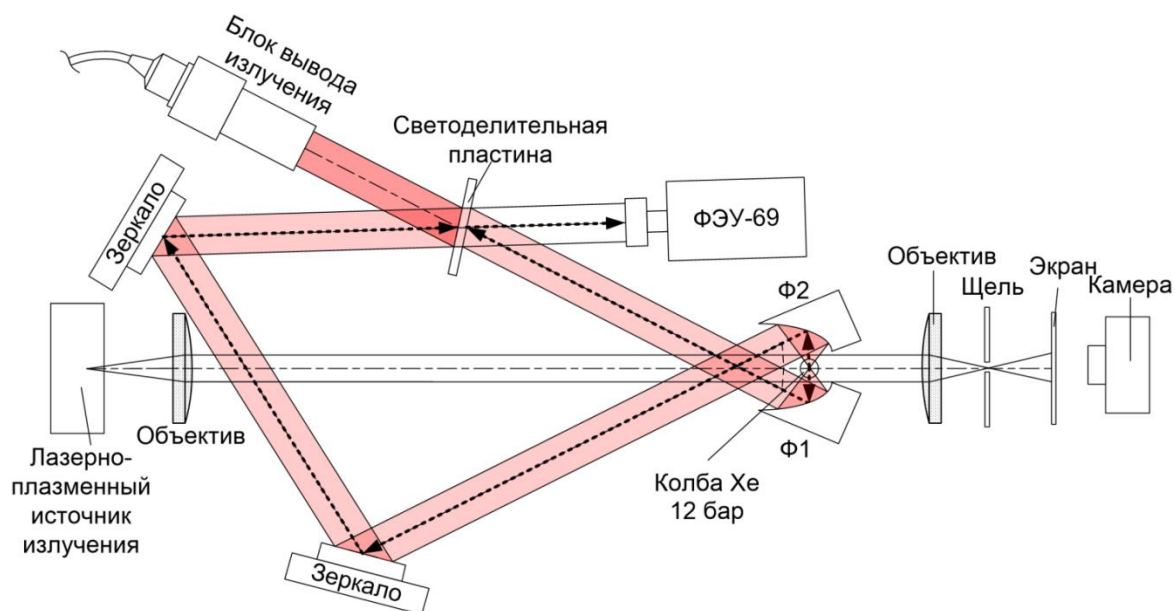


Рисунок 16 — Оптическая схема поддержания НОР и ИПОР в пересекающихся лучах и теневого прибора. Луч лазера разделяется на светоделительной пластине. Каждый из лучей фокусируется вблизи центра колбы с ксеноном внеосевым параболическим зеркалом с $f = 25.4$ мм. Вблизи горизонтальной оси рисунка показан теневой прибор для скоростной съёмки образующихся потоков. ФЭУ используется для регистрации лазерного излучения, проходящего через плазму (пунктирные линии со стрелками)

При ИПОР в области пересечения двух сфокусированных лазерных лучей генерируется результирующий поток, направленный в стороны от оптических осей, что на теневой картине выглядит как две турбулентных струи, направленных вверх и вниз, тогда как оба падающих луча расположены почти горизонтально (рисунок 17, б). Это интерпретируется как проекция единого широкого веерообразного потока с преимущественным направлением в сторону скоростной камеры. Было отмечено повышение стабильности и повторяемости от импульса к импульсу характеристик ИПОР в схеме пересекающихся лазерных лучей.

Разработана единая методика измерения средней по времени яркости НОР и ИПОР. В сходных условиях поддержания разрядов и методов измерения были получены данные по размерам и спектральной яркости плазмы НОР и ИПОР. Одновременно с измерением спектральной яркости регистрировалось распределение яркости плазмы как тела свечения для НОР и ИПОР в выделенной

спектральной полосе. В одной и той же оптической схеме с близкими пространственными характеристиками лазерных лучей была продемонстрирована возможность получения высокой спектральной яркости как НОР, так и ИПОР. Графики максимальной спектральной яркости плазмы НОР и ИПОР представлены на рисунке 18. На основании полученных распределений яркости и результатов измерения спектральной яркости плазмы проведено сравнение излучательных характеристик НОР и ИПОР по яркости и силе света в УФ диапазоне.

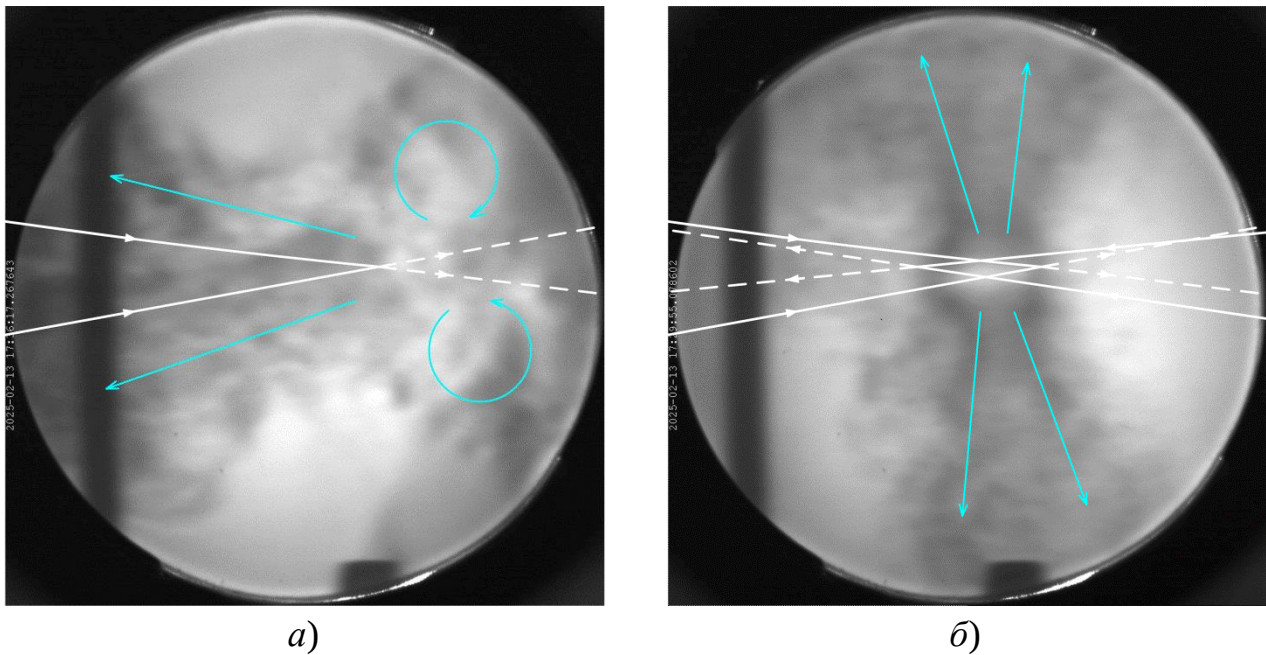


Рисунок 17 — Кадры скоростной теневой съёмки (1000 к/с) потоков, генерируемых ИПОР. (а) Случай одного луча (второй перекрыт); (б) случай двух лучей, пересекающихся в зоне ИПОР. Голубые линии показывают направление потоков. Белые линии показывают границы и направление лазерных лучей. Частота импульсов $f_p = 20$ кГц, энергия в импульсе 0,4 мДж (а), 0.8 мДж (б). Размер кадров 2.74×2.74 мм²

Сравнение спектральной яркости ИПОР при близком уровне средней мощности на частоте повторения импульсов $f_p = 200$ кГц показало, что в синем и УФ диапазонах спектральная яркость ИПОР увеличивается более чем в 2 раза по сравнению с НОР с накачкой близкой или даже большей средней по времени лазерной мощностью. Это обусловлено значительно меньшими размерами плазмы ИПОР при сопоставимом уровне поглощённой мощности лазерного излучения.

Из излучательных характеристик ИПОР определена максимальная яркость в импульсе, а также оценивается нестабильность характеристик. Отмечено, что импульсная яркость плазмы в непрерывном спектре в УФ-диапазоне достигает 700 мВт/(мм²·нм·Ср), а в группе спектральных линий ХеII в области 230 нм — 1400 мВт/(мм²·нм·Ср). Оценка максимальной концентрации электронов в плазме по измеренной максимальной яркости и измеренному радиусу плазмы составляет $N_e \cong 2 \cdot 10^{19}$ см⁻³. Оценка максимальной концентрации электронов из условия

рефракции, приводящей ко второму максимуму на осциллограмме проходящего излучения, даёт $N_e \cong 2.4 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, что близко к оценке по максимуму яркости.

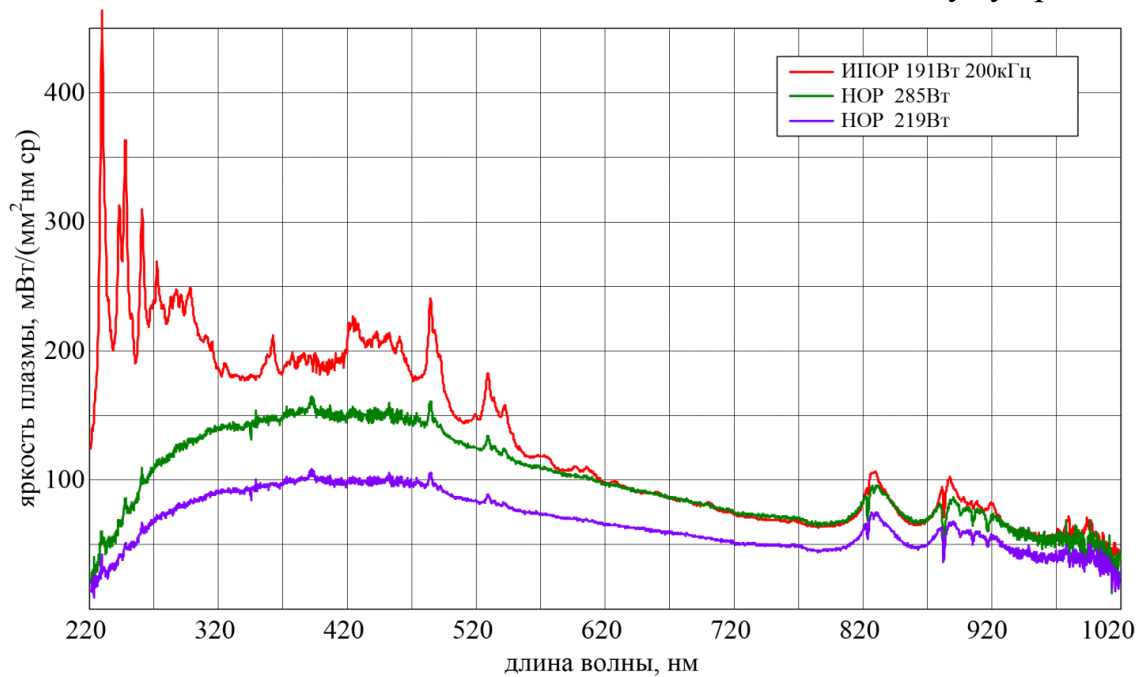


Рисунок 18 — Средняя по времени максимальная спектральная яркость НОР при лазерной мощности $P = 219 \text{ Вт}$ (зелёная линия); $P = 285 \text{ Вт}$ (фиолетовая линия) и ИПОР при $f_p = 200 \text{ кГц}$, $P = 191 \text{ Вт}$ (красная линия) в пересекающихся лазерных лучах

Также обнаружена возможность дополнительной стабилизации потоков вокруг ИПОР за счёт возбуждения акустических резонансных колебаний в разрядном объёме. Определён диапазон частот следования импульсов ИПОР, в котором наблюдаются резонансные колебания. Возникающие акустические течения значительно меняют картину течений вокруг ИПОР (рисунок 19).

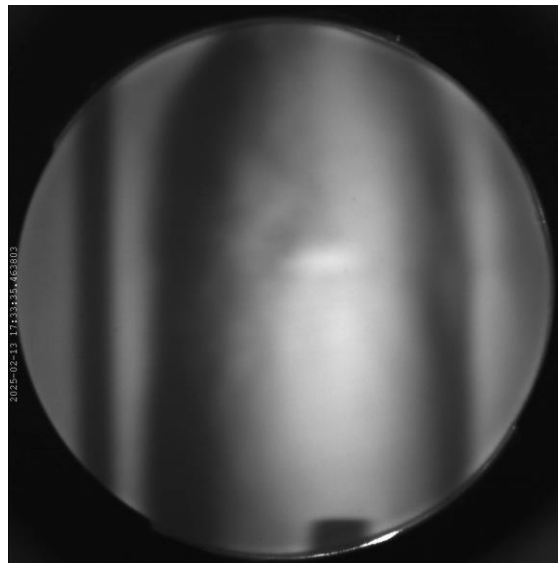


Рисунок 19 — Теневая картина потоков вокруг ИПОР, возникающих в условиях акустического резонанса на частоте 21.2 кГц . Тёмная вертикальная полоса слева — тень от провода диаметром 0.2 мм , проходящего снаружи колбы

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В диссертации впервые экспериментально определены пороговые мощности поддержания НОР в аргоне при давлениях 23–50 бар, проведены оценки характеристик плазмы с учётом особенностей фокусировки лазерного излучения. Сопоставление полученных данных с теоретическими оценками пороговой мощности подтверждает сделанные ранее выводы о механизмах поглощения лазерного излучения с определяющим вкладом поглощения в крыльях спектральных линий. Установлено, что частоты пульсаций конвективного факела в аргоне при давлениях 25–35 бар подчиняются закону подобия, установленному в другом диапазоне параметров. Методами количественной эмиссионной спектроскопии определены концентрация электронов и температура аргонной плазмы НОР в зависимости от мощности лазерного излучения.

2. Экспериментально обнаружен эффект стабилизации конвективного факела НОР при повышении мощности лазерного излучения выше некоторого предела, зависящего от расстояния между вспомогательными электродами. Установлено, что стабилизация конвективного факела НОР с ростом мощности происходит по мере нагрева вспомогательных электродов, увеличение конвективного потока от которых приводит к уменьшению сдвига скорости на границе холодного и горячего газа, препятствуя возникновению кольцевых вихрей.

3. Экспериментально определены области существования тихого оптического разряда и импульсно-периодического оптического пробоя в ксеноне высокого давления в зависимости от интенсивности лазерного излучения, частоты повторения импульсов и параметра фокусировки. Исследованы потоки, генерируемые тихим оптическим разрядом и импульсно-периодическим оптическим разрядом (ИПОР) при переходе от тихого разряда к ИПОР при изменении параметров лазерного излучения.

4. Показано, что структура струйных течений, образующихся при тихом оптическом разряде, определяется распределением интенсивности лазерного излучения в фокальной перетяжке с несколькими максимумами излучения, возникающими вследствие астигматизма и дефокусировки наведённой разрядом газовой тепловой линзой.

5. Исследована динамика изменения среднего по времени поглощения лазерного излучения в ИПОР при переходе из режима тихого разряда в режим лазерного пробоя, а также непосредственно в тихом оптическом разряде и импульсно-периодическом оптическом пробое в течение отдельного лазерного импульса. В отличие от тихого разряда, ИПОР в режиме лазерного пробоя отличается нестабильностью вплоть до пропуска импульсов.

6. Установлено, что при переходе от тихого импульсно-периодического оптического разряда к импульсно-периодическому оптическому пробую в фокальной перетяжке одиночного лазерного луча образуется турбулентный поток нагретого газа из зоны разряда, направленный навстречу лазерному лучу. Этот поток вносит фазовые неоднородности в подводимый луч, вследствие чего нарушается стабильность и повторяемость ИПОР от импульса к импульсу. Показано, что в оптической схеме с пересекающимися лазерными лучами можно изменить направление генерируемого потока с осевого на перпендикулярное к оптической оси, вследствие чего удаётся повысить стабильность и повторяемость ИПОР в режиме лазерного пробоя.

7. Для ИПОР, удельные характеристики которого были повышены за счёт повышения стабильности, приведены оценки максимальной концентрации электронов в плазме по измеренному профилю яркости плазмы и по рефракции лазерного излучения на плазме. Полученные значения совпадают в пределах точности проведённых оценок.

8. Разработана и реализована оптическая схема для поддержания ИПОР в пересекающихся лучах с системой скоростной теневой видеосъёмки газодинамических процессов. Исследованы газовые потоки, генерируемые в данной конфигурации разряда. Получены данные по излучательным характеристикам и стабильности плазмы, свидетельствующие о повышении стабильности ИПОР. Обнаружен эффект изменения картины газовых течений вокруг ИПОР при возбуждении резонансных акустических колебаний в разрядном объёме.

9. Проведено сравнение спектральной яркости НОР и ИПОР при близких мощностях лазерного излучения в одной и той же оптической схеме с пересекающимися лучами. При сопоставлении излучательных характеристик НОР и ИПОР в схеме с пересекающимися лучами обнаружено, что при частоте повторения импульсов до 200 кГц и постоянной энергии в импульсе около 1 мДж плазма в зоне пересечения лучей имеет среднюю по времени спектральную яркость, превышающую спектральную яркость НОР при близком уровне средней по времени мощности лазерного излучения.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

[A1] Androsenko V. N., Kotov M. A., Solovyov N. G., Shemyakin A. N., Yakimov M. Yu. Properties of a continuous optical discharge sustained by short-wave infrared laser radiation in high pressure argon // Journal of Physics D: Applied Physics. 2024. Vol. 57. No. 47. Paper 475203. DOI: 10.1088/1361-6463/ad6f23.

[A2] Androsenko V. N., Kotov M. A., Solovyov N. G., Shemyakin A. N., Yakimov M. Yu. Gas flows generated by pulse-periodic optical breakdown and quiet optical discharge // *Physics of Fluids*. 2024. Vol. 36. No. 10. Paper 475203. DOI: 10.1063/5.0229754.

[A3] Androsenko V. N., Kotov M. A., Solovyov N. G., Torchick M. V., Shemyakin A. N., Yakimov M. Yu. Stabilization of laser-sustained plasma convective plume in the interelectrode gap of high-pressure xenon lamps // *Physics of Fluids*. 2025. Vol. 37. No. 6. Paper 064113. DOI: 10.1063/5.0273723.

[A4] Androsenko V. N., Kotov M. A., Shemyakin A. N., Solovyov N. G., Torchick M. V., Yakimov M. Yu. Control of streams generated by pulse-periodic laser breakdown in the intersected focused beams in high-pressure xenon // *Physics of Fluids*. 2025. Vol. 37. No. 12. Paper 124118. DOI: 10.1063/5.0307160.

[A5] Androsenko V. N., Kotov M. A., Shemyakin A. N., Solovyov N. G., Torchick M. V., Yakimov M. Yu. Continuous and pulse-periodic optical discharges in a unified optical scheme with crossed laser beams // *Optics & Laser Technology*. 2026. Vol. 204. Part B. Paper 116130. DOI: 10.1016/j.optlastec.2026.116130.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. М. : Интеллект, 2009. — 736 с.
2. Зимаков В. П., Кузнецов В. А., Лаврентьев С. Ю., Соловьев Н. Г., Шемякин А. Н., Шилов А. О., Якимов М. Ю. Новые возможности применения оптических разрядов в аэрофизическом эксперименте // *Физико-химическая кинетика в газовой динамике*. 2016. Т. 17. №2.
3. Тищенко В. Н., Грачев Г. Н., Павлов А. А., Смирнов А. Л., Павлов А. А., Голубев М. П. Газодинамические эффекты взаимодействия неподвижного оптического пульсирующего разряда с газом // *Квантовая электроника*. 2008. Т. 38 № 1. С. 82—87.
4. Зимаков В. П., Кузнецов В. А., Соловьев Н. Г., Шемякин А. Н., Шилов А. О., Якимов М. Ю. Взаимодействие лазерного излучения ближнего ИК-диапазона с плазмой непрерывного оптического разряда // *Физика плазмы*. 2016. Т. 42. №1. С. 74—80. DOI: 10.7868/S0367292115110104.
5. Райзер Ю. П. Оптические разряды // *УФН*. 1980. Т. 132. №3. С. 549—581.
6. Kotov M. A., Lavrentyev S. Y., Shemyakin A. N., Solovyov N. G., Yakimov M. Yu. Oscillations of convective flow around a continuous optical discharge in high-pressure xenon // *Plasma Sourc. Sci. Tech*. 2022. V. 31. No. 12. Paper 124002.
7. Kotov M. A., Lavrentyev S. Y., Solovyov N. G., Shemyakin A. N., Yakimov M. Y. Dynamics of laser plasma convective plume in high pressure xenon // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2020. Vol. 1675. Paper 012073.
8. Барановский А., Муха З., Перадзыньский З. Неустойчивость непрерывного оптического разряда в газах // *Успехи механики*. 1978. Т. 1(3/4). С. 125—147.
9. Масюков В. А., Шлехта И. Диагностика свободной аргоновой струи плазмотрона по сплошному и интегральному излучению М. : Изд-во ИПМ АН СССР, 1985. Препр. №244. — 40 с.
10. Биберман Л. М., Норман Г. Э. Непрерывные спектры атомарных газов и плазмы // *УФН*. 1967. Т. 91. №2. С. 193—246.

АНДРОСЕНКО ВЛАДИСЛАВ НИКОЛАЕВИЧ

**УПРАВЛЕНИЕ ПОТОКАМИ, ГЕНЕРИРУЕМЫМИ ОПТИЧЕСКИМИ
РАЗРЯДАМИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ, С ЦЕЛЬЮ СТАБИЛИЗАЦИИ ИХ
ХАРАКТЕРИСТИК**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Подписано в печать ИПМех РАН 09.09.2026 г. Заказ №____
Формат 60х90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 80 экз.