

На правах рукописи

ЛАВРЕНТЬЕВ СЕРГЕЙ ЮРЬЕВИЧ

**ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В НЕПРЕРЫВНОМ И
ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКОМ ОПТИЧЕСКИХ РАЗРЯДАХ**

01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2021

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 МГУ им. М.В. Ломоносова

Мошаров Владимир Евгеньевич,
д.т.н., заместитель начальника НИО-7 «ЦАГИ
им. проф. Н. Е. Жуковского», профессор
кафедры Аэрофизического и летного эксперимента
МФТИ

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Федеральный исследовательский
центр «Институт общей физики им. А.М. Прохорова
Российской академии наук» (ИОФ РАН)

Защита состоится 16 декабря 2021 года в 15 часов на заседании диссертационного
совета Д002.240.01 при Институте проблем механики им. А.Ю. Ишлинского 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/diss/diss>.

Автореферат разослан " __ " _____ 2021 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.240.01
к.ф.-м.н.

Е.Я. Сысоева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Оптические разряды (ОР) и сопутствующие этому явлению гидро- и газодинамические процессы, активно изучаются уже более 50 лет.

В силу уникальности своих характеристик и, при наличии достаточно мощного источника лазерного излучения, простого способа реализации, особое место среди способов поддержания почти равновесной плазмы с высокой степенью ионизации занимают непрерывный оптический разряд (НОР) и волны светового горения (ВСГ), которые можно рассматривать как взаимодействие НОР с потоком газа [1, 2].

Решающий вклад в исследования НОР и ВСГ на первых этапах внесли работы Ю.П. Райзера, Н.А. Генералова, В.П. Зимакова, Г.И. Козлова, В.А. Масюкова, С.Т. Суржикова (ИПМех РАН), Ф.В. Бункина, И.А. Буфетова, В.И. Конова, А.М. Прохорова, В.Б. Федорова (ИОФ РАН), А.А. Веденова, Г.Г. Гладуша, Ф.В. Лебедева, А.П. Напартовича, (ФИАЭ им. Курчатова – ТРИНИТИ) А.П. Будника (ФЭИ), а также D.R. Keefer, M.C. Fowler, R.J. Glumb, H. Krier (США), J. Uhlenbusch (ФРГ) и других исследователей.

Сравнительно недавно, в 2000-х годах, в связи с развитием волоконной оптики и лазеров коротковолнового инфракрасного диапазона возобновился интерес к исследованию НОР и ВСГ. Исследовалось, в частности, распространение ВСГ в оптоволоконных световодах (В.Е. Фортов с сотрудниками (ОИВТ РАН) И.А. Буфетов, Е.М. Дианов с сотрудниками (ИОФ РАН)). С другой стороны, была обнаружена ранее неизвестная возможность поддержания НОР в инертных газах высокого давления лазерами коротковолнового ИК-диапазона при относительно небольшой средней мощности, в том числе, диодными лазерами мощностью несколько десятков ватт при КПД выше 50%, а также волоконными лазерами. Начались исследования в этой области и создание устройств, использующих НОР. Начали стремительно развиваться применения НОР, в первую очередь в качестве широкополосных источников излучения исключительной стабильности и яркости, способных повысить чувствительность и эффективность многих оптических, спектральных и аналитических приборов. В этой развивающейся области можно отметить изобретения D.K. Smith (Energetiq Technology, США) [3], I. Bezel, A. Shchemelinin с сотрудниками (KLA-Tencor, США), К.Н. Кошелева, В.М. Кривцуна с сотрудниками (Институт спектроскопии РАН), а также работы В.П. Зимакова с сотрудниками [4, 5].

Как чрезвычайно стабильные источники лазерного излучения, диодные и волоконные лазеры в принципе могут обеспечить исключительную стабильность плазмы НОР, что важно для многих применений. Тем не менее, оптические разряды, в силу характерной для них высокой плотности диссипации энергии, неизбежно порождают сильные возмущения в окружающей плазмообразующей среде, индуцируя потоки, оказывающие зачастую определяющее влияние на стабильность плазмы разряда. Исследованию взаимодействия оптических разрядов с потоками газа посвящены работы многих исследователей, среди которых, наряду с упомянутыми выше, можно выделить работы Багаева С.Н., Грачева Г.Н., Третьякова П.К.,

Тищенко В.Н. с сотрудниками (ИЛФ СО РАН) [8], Фомина В.М., Оришича А.М., Яковлева В.И. с сотрудниками (ИТПМ СО РАН), М.Н. Шнейдера с сотрудниками (ВНИЦ ВЭИ, МАЕ, Princeton University) и других.

Данная работа посвящена исследованию до сих пор мало изученных явлений самовоздействия оптических разрядов посредством ими же порождаемых гидро- и газодинамических потоков, таких как конвективные потоки вокруг непрерывных и импульсно-периодических (ИПОР) оптических разрядов, струйные течения, индуцируемые при импульсно-периодических оптических разрядах в газах и жидкостях, а также гидродинамические возмущения, возникающие вследствие возбуждения резонансных акустических колебаний при поддержании ИПОР в замкнутом разрядном объеме.

Актуальность работы.

Проявления пространственной и временной нестабильности НОР и ИПОР оказывает влияние на характеристики плазмы ОР, важные для их применений.

Известны опубликованные статьи и изобретения, посвященные регулярным колебаниям НОР, в которых изложены основные черты явления, зарегистрированы изобретения, предлагающие в некоторых частных случаях способы стабилизации колебаний НОР. Тем не менее, до сих пор в опубликованных источниках не было предложено удовлетворительного объяснения природы регулярных пульсаций плазмы НОР, что затрудняло в общем случае разработку методов ее стабилизации.

В случае ИПОР или комбинированного режима ИПОР, при котором на непрерывное лазерное излучение накладываются модулирующие импульсы, при которых плазма достигает значительно большей яркости и эффективности генерации коротковолнового УФ-излучения по сравнению с НОР, практически полностью отсутствуют исследования факторов, влияющих на стабильность и повторяемость от импульса к импульсу характеристик плазмы, физической природы наблюдаемых нарушений стабильности и повторяемости, и как следствие на момент начала работ по диссертации отсутствовали способы повышения стабильности плазмы ИПОР.

Цели и задачи работы.

Целью работы было исследование потоков, порождаемых ОР, и неустойчивостей ОР, вызываемых порождаемыми ими потоками. Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

1. Разработать и создать экспериментальные установки, позволяющие исследовать потоки, порождаемые ОР и влияющие на их стабильность, в том числе отработка схем теневой визуализации с излучением повышенной яркости, создаваемым плазмой НОР в качестве точечного источника излучения, достаточной для непрерывной скоростной видеосъемки.
2. Исследовать природу регулярных пульсаций НОР.
3. Исследовать условия возникновения и последствия возбуждения резонансных акустических колебаний при поддержании ИПОР (и комбинированного ИПОР) в замкнутом разрядном объеме.

4. Исследовать газодинамические струйные течения, индуцируемые ИПОР в инертных газах высокого давления и жидкостях.

Методы исследования.

При проведении исследований в данной работе использовались следующие методы:

1. Использование лазеров различных типов, в том числе диодных непрерывных и импульсно-периодических лазеров, а также фемтосекундного импульсно-периодического лазера для создания и поддержания НОР и ИПОР в инертных газах и жидкостях.
2. Применение НОР как метода создания широкополосного источника излучения высокой яркости для различных приложений, в частности, создание и применение осветителя для шлирен- и теневых приборов на основе НОР.
3. Теневой и шлирен методы визуализации течений нагретого газа и жидкости вокруг зон диссипации энергии ОР; метод скоростной шлирен-видеосъемки для регистрации динамического поведения газовых потоков.
4. Метод подсвечивания газовых пузырьков в жидкости «лазерным листом» – для визуализации структуры лазерно-индуцированных течений в жидкостях и оценки их скорости.
5. Аналитические и численные методы решения задач гидродинамики для построения аналитических и численных моделей конвективной неустойчивости НОР.
6. Методы волновой и многолучевой геометрической оптики для расчета положения и формы зон максимальной интенсивности лазерного излучения при точной фокусировке и фокусировке с астигматизмом.
7. Методы нелинейной оптики для оценки самофокусировки и дефокусировки излучения фемтосекундного лазера в жидкостях.

Научная новизна работы.

В работе получены следующие новые результаты:

1. Реализована и отработана схема теневой визуализации с плазмой НОР в качестве непрерывного точечного источника излучения высокой яркости.
2. Предложен закон подобия, позволяющий получить оценку частоты регулярных колебаний НОР, вызванных неустойчивостью факела термогравитационной конвекции. Установлено, что он совпадает с законом подобия, известным из исследований пламен, пульсирующих в условиях преобладающего влияния сил плавучести, что указывает на сходную причину наблюдаемой неустойчивости.
3. Путем сравнения результатов математического моделирования конвективного факела от сосредоточенного источника тепла, эквивалентного НОР, с результатами экспериментов доказана гидродинамическая природа регулярной осцилляции НОР.
4. Впервые экспериментально получены квазистационарные направленные потоки газа из зоны ИПОР в сфокусированном луче фемтосекундного лазера; доказано,

что интенсивность и направление газовых потоков определяется формой области диссипации энергии ИПОР; предложен способ управления направлением индуцируемых ИПОР газовых потоков за счет настройки оптики, фокусирующей лазерное излучение.

5. Впервые наблюдались направленные потоки в жидкостях под действием излучения фемтосекундного импульсно-периодического лазера; показано, что направление и форма наблюдаемых потоков зависит от формы области диссипации энергии, изменяющейся в зависимости от настройки фокусирующей оптики и степени самофокусировки излучения в жидкости; наряду с различиями, установлены общие черты поведения потоков, порождаемых ИПОР в жидкостях и газах высокого давления, которые могут указывать на сходные динамические механизмы генерации струйных течений.
6. Впервые проведено исследование самовоздействия ИПОР, возникающего вследствие возбуждения резонансных акустических колебаний в замкнутом разрядном объеме; установлено, что наряду с нарушением стабильности и повторяемости ИПОР акустические колебания могут приводить к стабилизации ИПОР с подавлением конвективных пульсаций.

Положения, выносимые на защиту.

На защиту выносятся следующие научные положения:

1. Эффективные точечные источники широкополосного излучения высокой яркости с непрерывным оптическим разрядом разработаны и реализованы в экспериментальных схемах теневой и шпирен-визуализации для скоростной съемки объектов и сред с градиентами коэффициента преломления.
2. Установлено, что регулярные колебания конвективного факела НОР, служащие одной из главных причин пульсаций положения и яркости плазмы НОР и источников излучения на основе НОР, имеют гидродинамическую природу, сходную с природой пульсаций ламинарных пламен.
3. Установлено, что под действием импульсно-периодического оптического разряда (ИПОР) в замкнутом разрядном объеме при определенных частотах повторения импульсов возникают неустойчивости, связанные с возбуждением резонансных акустических колебаний, проявляющиеся в низкочастотных колебаниях скорости и направления конвективных потоков в окрестности плазмы ИПОР и приводящие к нарушению режима поддержания плазмы вплоть до ее погасания.
4. Установлено, что в определенных случаях возбуждение резонансных акустических колебаний приводит к прекращению пульсаций и стабилизации конвективного потока от ИПОР.
5. Установлено, что оптические разряды, поддерживаемые повторяющимися фемтосекундными лазерными импульсами, генерируют квазистационарные струйные течения, форма и направление которых зависит от формы области диссипации энергии, зависящей в свою очередь от способа фокусировки

лазерного излучения. Генерируемые потоки, в зависимости от интенсивности и направления, могут вызывать или подавлять неустойчивости плазмы оптического разряда.

6. Экспериментально доказано, что интенсивностью и направлением потоков, индуцируемых импульсно-периодическим оптическим разрядом, можно управлять, контролируя форму области диссипации энергии разряда оптическими методами.
7. При взаимодействии с жидкостями сфокусированного излучения импульсно-периодического фемтосекундного лазера в области фокальных перетяжек образуются квазистационарные потоки, направленные вдоль оси лазерного луча в обе стороны от перетяжки.
8. В случае, когда перетяжек несколько (например, при самофокусировке, или фокусировке с астигматизмом) наряду с потоками вдоль луча наблюдаются участки с растекающимся в стороны от луча потоком, образующимся в результате столкновения встречных потоков, генерируемых в перетяжках с высокой интенсивностью лазерного излучения.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Обнаружены и исследованы новые явления, связанные со струйными течениями, индуцируемыми непрерывными и периодически повторяющимися ОР различных типов, способными оказывать как дестабилизирующее, так и стабилизирующее влияние на плазму ОР. Найдены способы управления направлением и интенсивностью генерируемых ОР потоков.

Успешно реализованная и отработанная схема теневой визуализации с плазмой НОР в качестве точечного источника излучения высокой яркости позволяет получать качественные теневые изображения при скоростной видеосъемке.

Результаты проведенных исследований НОР и ИПОР в инертных газах высокого давления позволяют добиться высокой стабильности и повторяемости характеристик плазмы ОР и могут служить основой для повышения эффективности применения ОР, в частности, в широкополосных источниках излучения высокой яркости.

Результаты проведенных исследований лазерно-индуцированных потоков в жидкостях могут использоваться в лазерных технологиях обработки или синтеза материалов с применением жидкостной среды, а также в оптомеханике.

Научные исследования, проведенные в работе, были выполнены в рамках проекта РФФИ 18-01-00534 А и госзадания № АААА-А17-117021310370-2.

Степень достоверности и апробация результатов работы.

Достоверность результатов исследования обусловлена достаточным пространственным и временным разрешением применяемых экспериментальных методов регистрации гидро- и газодинамических процессов для того, чтобы сделать качественные и количественные выводы о структуре течений; наблюдением исследуемых физических явлений разными способами; хорошим качественным и количественным согласием данных эксперимента с результатами математического

моделирования, а также опубликованными в научной литературе результатами исследований других авторов смежной тематики.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на всероссийских и международных конференциях и семинарах:

1. 9-я, 10-я, 11-я Международная конференция-школа молодых ученых «Волны и вихри в сложных средах», ИПМех РАН, Москва, 2018-2020 гг.
2. 10-я, 12-я, 13-я Всероссийские школы-семинары «Аэрофизика и физическая механика классических и квантовых систем», ИПМех РАН, г. Москва, 2016, 2018, 2019 гг.
3. Научные слушания, посвященные 110-летию со дня рождения С.А. Христиановича, "Современные проблемы механики и математики", ИПМех РАН, г. Москва, 2018 г.
4. 18-е и 19-е Международное Совещание по Магнитоплазменной Аэродинамике, ОИВТ РАН, г. Москва, 2019, 2020 гг.
5. 289-й Всероссийский семинар «Физико-химическая кинетика в газовой динамике», НИИ механики МГУ, г. Москва, 6 февраля 2020 г.
6. V Всероссийская научная конференция "Теплофизика и физическая гидродинамика", Крым, Ялта, 13–20 сентября 2020 г.

Публикации. Основные результаты работы изложены в 9 статьях, которые опубликованы в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ и/или индексируемых в Web of Science, Scopus, а также 12 работ, включенных в материалы школ и конференций и 1 патенте на изобретение.

Личный вклад автора. В работах [А3-А6, А9] автор непосредственно участвовал в постановке задач, планировании и проведении исследований, в работах [А1-А2, А7-А8] непосредственно занимался экспериментальными установками, эксплуатацией лазеров, измерительных схем. В работах [А3-А6, А9] автор выполнял обработку, анализ и представление полученных результатов. Во всех работах [А1-А9] обсуждение и интерпретация результатов проводились совместно с соавторами. Все основные результаты диссертации были получены соискателем лично или при его непосредственном участии.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы и 3 приложений. Общий объем диссертации составляет 202 страницы, включая 93 рисунка и 11 таблиц. Список литературы содержит 162 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В **первой главе** проведен обзор опубликованных работ и результатов исследований по теме диссертации.

Исследования и приложения непрерывных и импульсно-периодических ОР можно разделить на два этапа. На первом этапе преимущественно использовались CO₂-лазеры высокой мощности [1, 2]. Однако, несмотря на успехи в изучении и понимании НОР, его производственное и технологическое применение было ограничено высокой стоимостью эксплуатации, а также относительно низким КПД таких лазеров, и не выходило за рамки исследовательских лабораторий.

Современный этап связан с появлением коммерчески доступных диодных и волоконных лазеров, эффективно излучающих в диапазоне длин волн около 1 мкм с КПД 30-50% и выше, а также с обнаружением возможности поддержания НОР и ИПОР в инертных газах высокого давления лазерным излучением ближнего ИК-диапазона [3, 4]. Это позволило применять ОР в реальных практических приложениях, например, [3, 5, 6]. Расширяющееся применение ОР в задачах, предъявляющих повышенные требования к стабильности характеристик плазмы, сделало актуальным более глубокое исследование факторов, влияющих на устойчивость и повторяемость НОР и ИПОР.

Неустойчивости НОР и ИПОР оказывают влияние на характеристики плазмы оптических разрядов, важные для применений (например, в качестве широкополосных источников излучения высокой яркости) [3, 5, 7]. Для НОР главным фактором, определяющим стабильность горения, является термогравитационная конвекция. В случае ИПОР, помимо той же термогравитационной конвекции, важным фактором может быть вынужденная конвекция (непосредственно индуцируемые ИПОР квазистационарные газовые потоки [5, 8]), а также газовые потоки, возникающие в ограниченном разрядном объеме вследствие возбуждения в нем резонансных акустических колебаний. В опубликованной на момент начала работ по диссертации литературе не было общепринятого мнения о природе регулярных пульсаций НОР, а вопросы стабильности ИПОР и его разновидностей - комбинированного ОР, при котором на непрерывное лазерное излучение накладывается импульсное большей мощности, практически не исследовались.

Во **второй главе** описаны методики и экспериментальные установки для проведения исследований газодинамических явлений в НОР и ИПОР, а также принципы организации ОР.

Для исследования НОР и ИПОР в ксеноне высокого давления использовалась схема поддержания разрядов излучением диодных лазерных модулей, работающих на длине волны 970-980 нм. Использовались стандартные модули накачки волоконных лазеров производства IPG Photonics PLD-33, PLD-40 и PLD-70 с оптоволоконным выходом мощностью до 60 Вт и возможностью импульсно-периодической модуляции с частотами повторения до 50 кГц. Разряд осуществлялся в ксеноне высокого давления в замкнутых кварцевых колбах с различным давлением напуска от 10 до 30 бар, которое из-за нагрева в процессе работы могло увеличиваться до 15-50 бар и выше. Использовалась оптическая схема двух скрещенных пучков, при которой плазма ОР поддерживалась на пересечении двух сфокусированных лазерных лучей, подводимых к разрядному объему через прозрачную кварцевую стенку под углом 60° друг к другу [9]. Кроме того, что эта схема имеет преимущество с точки зрения стабильности ОР, она

позволяет поддерживать комбинированный ОР, при котором один из лазеров работает в непрерывном, а другой в импульсно-периодическом режиме. ОР инициировался путем кратковременного дугового разряда между вспомогательными электродами, расположенными вблизи зоны разряда. В целом используемая схема ОР была аналогична схеме лазерно-плазменного источника излучения ЛПИ-50 [5]. Для устранения аппаратных источников плазменных пульсаций рабочий ток диодных лазеров тщательно стабилизировался, рабочая температура корпусов лазерных диодов стабилизировалась с помощью термоэлементов Пельтье, исключались возможные колебания элементов конструкции и оптоволоконных кабелей транспортировки лазерного излучения, вызываемые вибрацией вентиляторов воздушного охлаждения.

Исследование **регулярных пульсаций оптических разрядов**, связанное, как выяснилось в ходе работ, с пульсациями конвективного факела, начиналось с измерения частот пульсаций яркости плазмы НОР с помощью системы регистрации на базе фотоэлектронного умножителя. Сигнал пульсации записывался для последующего анализа спектра частот с помощью преобразования Фурье (Рис. 5).

Для выяснения причин появления колебаний плазмы проводилась скоростная (до 1000 кадров в секунду) видеосъемка динамики теневого изображения окрестностей плазмы. Схема получения теневого изображения с использованием излучения самой плазмы или внешнего осветителя в качестве точечного источника показана на Рис. 1.

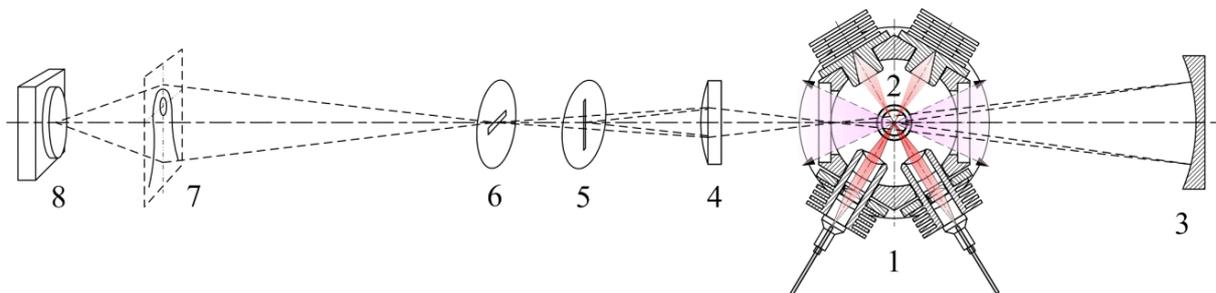


Рис. 1 Схема получения теневого изображения, использующая излучение исследуемого ОР. 1 – схема ОР с двумя скрещенными лучами; 2 - кварцевая колба с Хе; 3 – сферическое зеркало или оптический конденсор внешнего осветителя; 4 – объектив; 5,6 – щелевые диафрагмы; 7 – экран обратной проекции; 8 – камера.

Использование в данной работе плазмы НОР (самого исследуемого разряда, как на Рис. 1, или дополнительного внешнего источника с НОР) в качестве точечного источника излучения в теневых установках – новый метод, позволяющий повысить качество теневых изображений при непрерывной скоростной съемке.

Для исследования воздействия **резонансных акустических колебаний**, возбуждаемых в замкнутом объеме, ИПОР или комбинированный оптический разряд (непрерывный + импульсно-периодический) поддерживался в ксеноне при давлении от 15 до 50 бар в экспериментальной установке с двумя пересекающимися лазерными лучами. ИПОР или комбинированный ОР, способ организации которого аналогичен описанному в [5, 9], инициировался кратковременным электрическим разрядом, после чего поддерживался за счет поглощения лазерного излучения в плазме. Частота

следования лазерных импульсов могла меняться в пределах от нескольких сотен герц до нескольких десятков килогерц, длительность импульсов – от 10 до 100 мкс.

При модуляции мощности лазерного излучения, поддерживающего ОР, меняются размеры плазмы ОР. Анализ осциллограмм излучения плазмы показывает, что в этом случае спектр гармоник пульсаций размеров плазмы с частотой возбуждения обогащен гармониками на частотах, в несколько раз превышающих частоту возбуждения. Соответственно, при акустическом резонансе в разрядном объеме могут возбуждаться колебания на частотах, в несколько раз превышающих частоту модуляции. Кроме того, резонанс на высоких гармониках возможен из-за высокой добротности разрядного объема как акустического резонатора (малой диссипации энергии колебаний).

При определенных частотах повторения импульсов комбинированного ОР в разрядном объеме возникали резонансные акустические колебания. Звуковые волны, усиливающиеся при резонансе, регистрировались с помощью пьезокерамического датчика, связанного с кварцевой колбой стеклянным стержнем (стеклянный волновод), плотно прилегающим к ней. Схема подключения пьезокерамического датчика регистрации резонансных колебаний изображена на Рис. 2. Сигнал пьезокерамического датчика подавался через усилитель на цифровой осциллограф с функцией измерения частоты и быстрого Фурье преобразования для последующей обработки средствами математического пакета MathCAD.

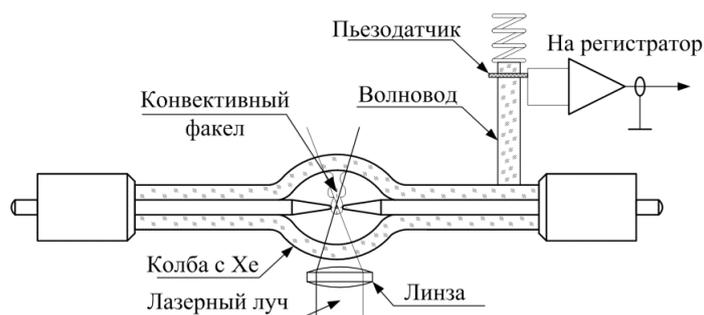


Рис. 2 Схема регистрации резонансных акустических колебаний в разрядном объеме комбинированного ИПОР.

Дополнительную информацию о характере акустических колебаний давало наблюдение конвективного факела комбинированного ОР, чувствительного к акустическим течениям, возникавшим в разрядном объеме под действием резонансных акустических колебаний большой амплитуды.

Для исследования **квазистационарных потоков**, генерируемых импульсно-периодическими оптическими разрядами, ИПОР реализовывался в испытательной камере. Источником лазерного излучения в экспериментах служила коммерческая модель фемтосекундного импульсно-периодического лазера непрерывного действия с усилителем типа S-pulse (Amplitude Systèmes) с энергией лазерных импульсов 135 и 270 мкДж/имп (два предустановленных уровня) и частотами повторения импульсов $f_r = 1.67, 3.33, 5$ и 10 кГц. Длительность импульса составляла $\tau = 450$ фс, длина волны $\lambda = 1023$ нм, диаметр луча на выходе $d = 2.5$ мм. При фокусировке достигалась плотность мощности до 10^{15} Вт/см² – на два порядка выше пороговой

интенсивности многофотонной ионизации аргона, что позволяло получить оптический пробой, контролируемый многофотонным поглощением.

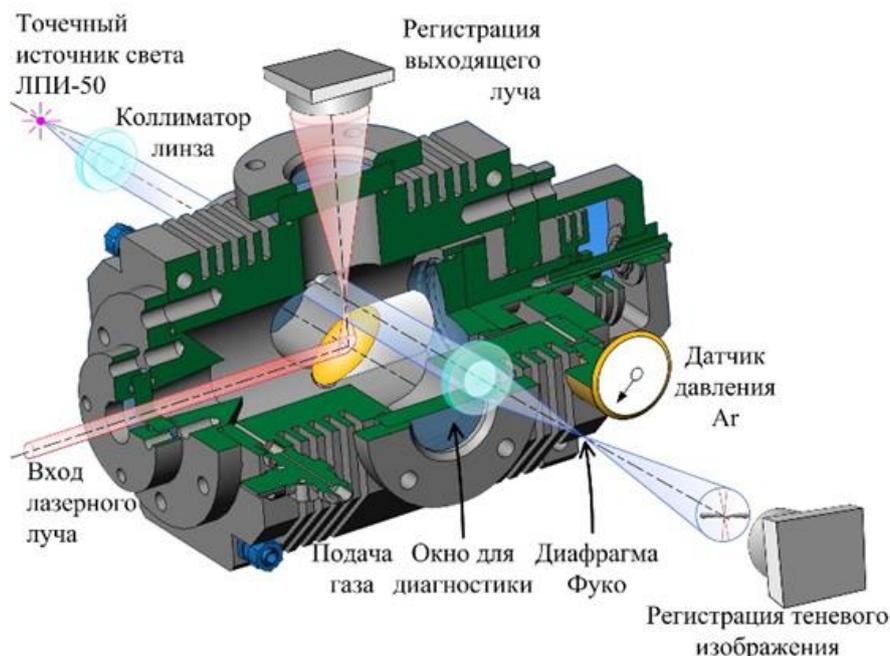


Рис. 3 Схема экспериментальной установки для исследования газодинамических потоков, создаваемых ИПОР.

Схема установки, предназначенной для поддержания ИПОР, регистрации параметров лазерного излучения, прошедшего через плазму, а также шлирен-изображений окрестности плазмы для визуализации генерируемых потоков, показана на Рис. 3. При этом в качестве точечного источника излучения для получения шлирен-изображения при непрерывной скоростной съемке использовался лазерно-плазменный источник ЛПИ-50 на основе НОР.

Лазерный луч фокусировался внутри камеры высокого давления (Ar , $p = 10$ бар) внеосевым (90°) параболическим фокусирующим зеркалом с эффективным фокусным расстоянием $f = 15$ мм (параметр фокусировки $f/5.8$). Минимальный диаметр луча в фокусе составлял 10 мкм. При наклоне и повороте камеры высокого давления вместе с ней наклонялось и поворачивалось фокусирующее зеркало, при этом за счет вносимого астигматизма изменялись условия фокусировки лазерного излучения.

В экспериментах по исследованию индуцируемых сфокусированным лазерным излучением **потоков в жидкостях** использовался фемтосекундный лазер S-pulse (Amplitude Systèmes), обеспечивавший в зоне взаимодействия энергию в импульсе 13, 135 и 250 мкДж при частотах повторения импульсов 1.43, 1.67, 3.33, 5 и 10 кГц при длительности импульсов $\tau = 450$ фс. Основная длина волны излучения $\lambda = 1023$ нм.

Лазерное излучение фокусировалось двояковыпуклыми кварцевыми линзами. Схемы подвода и фокусировки излучения показаны на Рис. 4. На Рис. 4 с) схема фокусировки с искусственным астигматизмом – линза смещена относительно оси лазерного луча на 0.7 мм вниз и наклонена на 1 градус вправо, положение точной настройки линзы и исходная ось луча показаны пунктиром. Исследования проводились

в воде, тяжелой воде, ацетоне, спиртах, хлорметанах. Во всех названных жидкостях, с учетом особенностей, связанных с различием в коэффициентах преломления и поглощения, наблюдалась сходная картина лазерно-индуцированных течений.

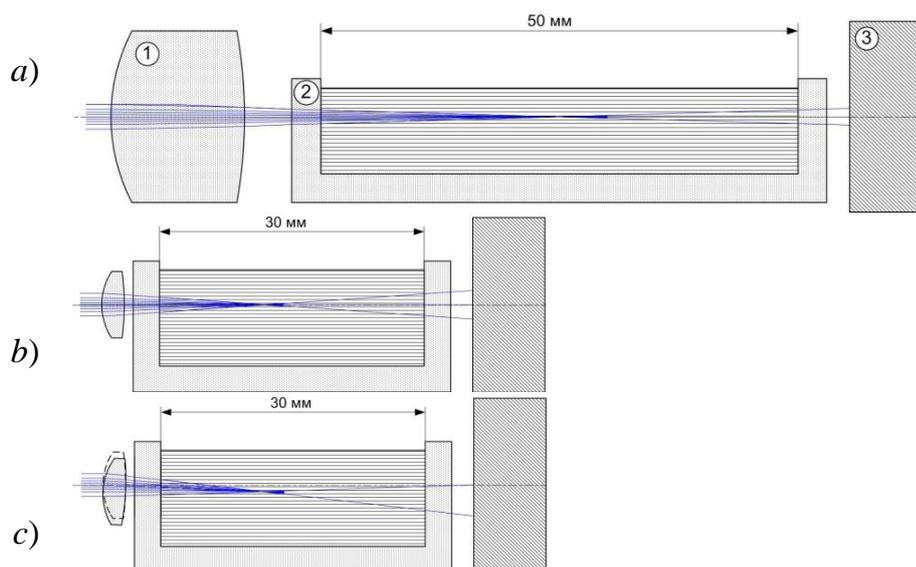


Рис. 4 Схемы фокусировки излучения: *a)* линза с фокусным расстоянием $f = 33.3$ мм; *b)*, *c)* линза с фокусным расстоянием $f = 13.2$ мм, *c)* с вносимым астигматизмом.

Образующийся поток жидкости наблюдали теневыми методами, просвечивая кювету с жидкостью, как и в других экспериментах, пучком широкополосного излучения от точечного лазерно-плазменного источника ЛПИ-50 [5]. Другая возможность наблюдения потоков возникала благодаря присутствию в жидкости пузырьков газа, образующихся в зонах повышенной интенсивности излучения в области перетяжек вследствие многофотонной фотодиссоциации и выбрасываемых из них генерируемыми потоками. Пузырьки подсвечивались лучом вспомогательного лазера с длиной волны 532 нм, развернутого с помощью цилиндрической линзы в линию и сфокусированного сферической линзой в «световой лист», имеющий максимальную интенсивность в области взаимодействия излучения фемтосекундного лазера с жидкостью. Теневые изображения и трассерные картины движения подсвеченных лазерным листом пузырьков регистрировалась с помощью скоростной видеосъемки.

Третья глава посвящена исследованию пульсаций конвективного факела НОР. Было проведено исследование относительно небольших (менее 1%) пульсаций яркости плазмы НОР в ксеноне при разных давлениях и мощности лазерного излучения. На Рис. 5 представлены запись временной диаграммы и частотный спектр пульсаций, полученный с помощью быстрого преобразования Фурье.

Обнаружено, что основная частота пульсаций, соответствующая на спектре максимуму узкого пика, увеличивается с давлением, но мало меняется при изменении мощности, диссипирующей в разряде.

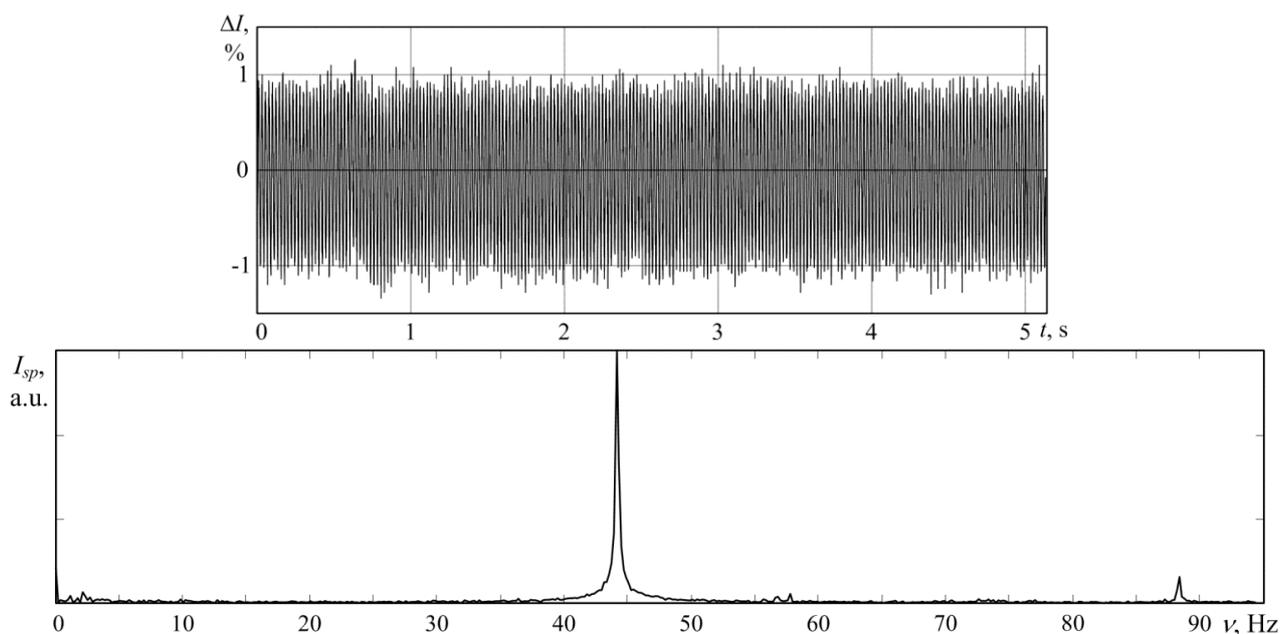


Рис. 5 Пульсации яркости НОР и их частотный спектр при рабочем давлении Хе $p_{\text{Хе}} = 30$ бар.

На Рис. 6 представлены теневые изображения, показывающие различные фазы одного периода пульсации с частотой $\nu = 44.4$ Гц. Было замечено, что по мере расширения и всплывания области нагретого газа из окрестности ОР в ней формируется тороидальный вихрь, который периодически отрывается от основного потока, что приводит к пульсации скорости потока и колебаниям ОР.

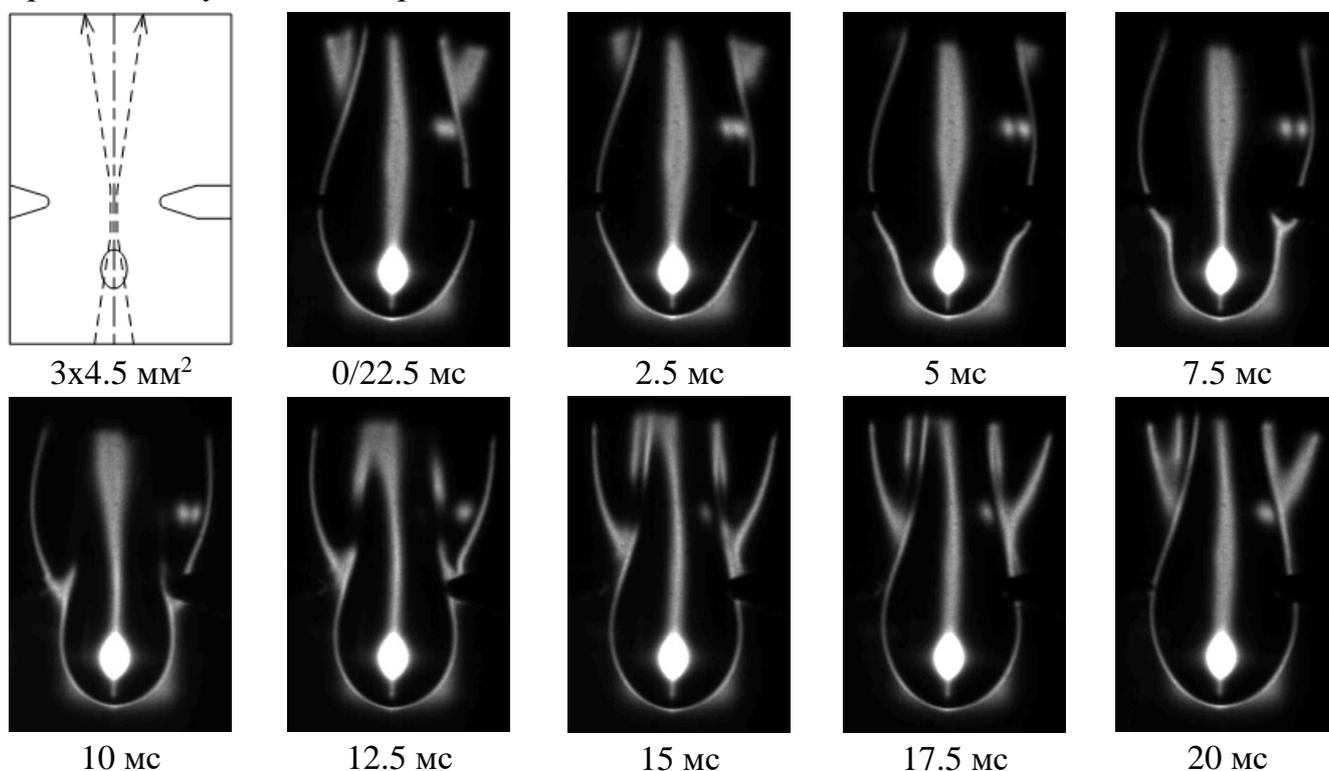


Рис. 6 Последовательные кадры скоростной съемки теневых изображений области нагретого газа, окружающей НОР, за время одной пульсации ($\tau = 22.5$ мс, $p_{\text{Хе}} = 30$ бар). Размер кадра 3×4.5 мм².

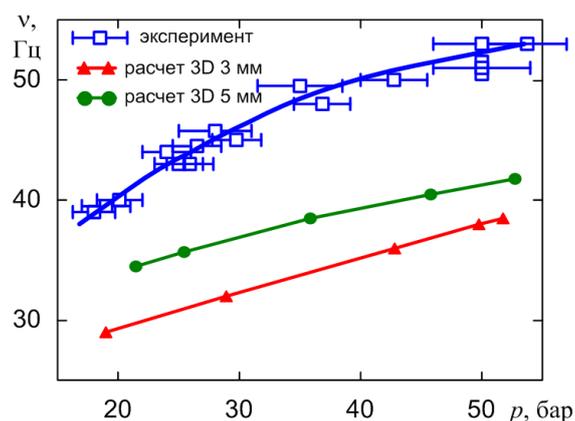


Рис. 7 Зависимость частоты пульсаций от давления в эксперименте (синий) и при численном моделировании (красный и зеленый) при различном диаметре области трехмерного расчета.

Результаты численного моделирования внесли ясность в вопрос о физических механизмах пульсаций и возможной роли факторов поглощения и рефракции лазерного излучения, проявлений неустойчивости волны светового горения и т.п. Проведенные в диссертации расчеты в рамках чисто гидродинамической модели (без упомянутой выше «лазерной специфики») дает картину пульсаций, качественно и с приемлемой точностью количественно соответствующую наблюдаемой в эксперименте (Рис. 7). То есть, неустойчивость, приводящая к регулярной пульсации НОР, имеет гидродинамическую природу и представляет собой неустойчивость сдвигового течения типа Кельвина-Гельмгольца, аналогичным образом возникающую также в ламинарных пламенах.

Для описания наблюдаемой зависимости частоты колебаний от давления и размеров конвективного факела, определяемых по теневым изображениям, была предложена физическая модель, выражающая тот факт, что граница конвективного факела формируется в результате установления равновесия между диффузионно-конвективным выносом тепла из зоны разряда к границе температурного фронта и всплывания менее плотного горячего газа в формирующемся факеле. В рамках этой модели получается оценка для диаметра конвективного факела, скорости конвективного течения газа и скорости расширения факела в зависимости от радиуса факела. Количественная оценка частоты колебаний ν получается из наблюдения, что в течение одного периода пульсации радиус факела уменьшается и увеличивается примерно вдвое: $\nu = 0.5 \sqrt{\frac{g}{2r_0}}$, где g – ускорение свободного падения, а r_0 – условный радиус конвективного факела в отсутствие пульсаций. Показано, что r_0 можно определить как $r_0 = \sqrt[5]{r_{max} \cdot r_{min}^4}$, где r_{max} и r_{min} – максимальный и минимальный радиусы пульсирующего факела. Полученная формула согласуется с наблюдаемой зависимостью частоты пульсаций от давления, а также совпадает с хорошо известным законом подобия для пульсирующих пламен (Рис. 8).

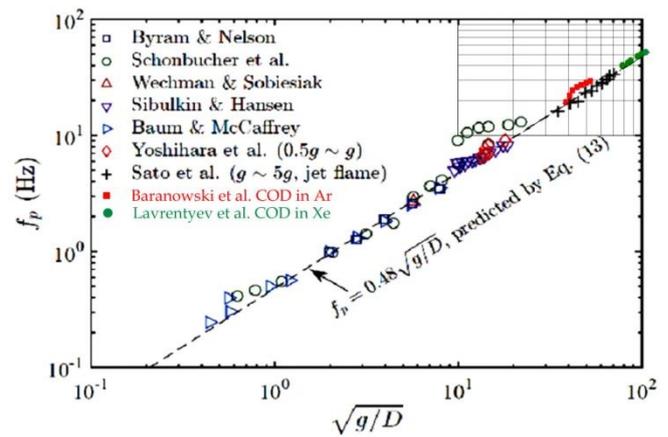
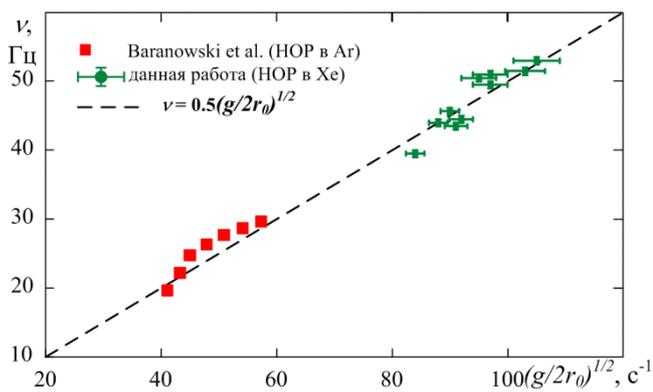
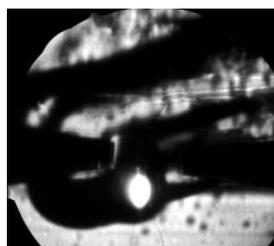


Рис. 8 Закон подобия для конвективных осцилляций НОР, а также пульсирующих пламен. Приведены результаты данной работы, а также других работ, взятые из [10, 11].

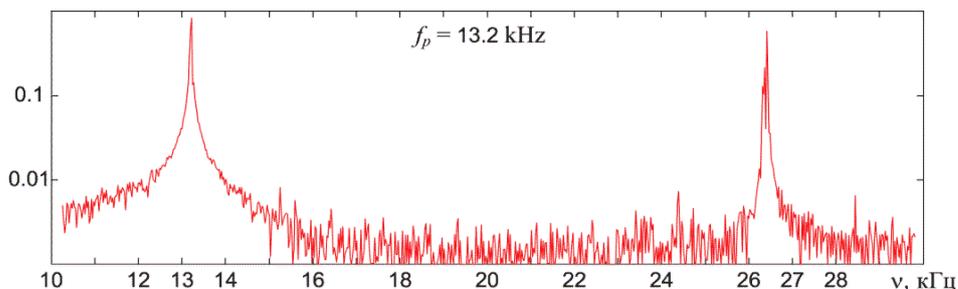
В четвертой главе исследовалось возбуждение резонансных акустических колебаний в замкнутом объеме – явление известное из исследований разрядов в дуговых газоразрядных лампах. Известны примеры использования высокочастотной модуляции тока для управления формой канала дуги. Также исследовались пульсации дугового разряда, возникающие при импульсной модуляции тока вследствие возбуждения акустических колебаний [11]. В данной работе метод визуализации отклонений в поведении конвективного факела ИПОР применяется для наблюдения и исследования возмущений в плазмообразующем газе (течений), развивающихся при возбуждении разрядом резонансных акустических колебаний в замкнутом разрядном объеме.

Конвективному факелу комбинированного ИПОР присущи регулярные пульсации, такие же, как в случае НОР, за исключением случаев, проявляющихся при определенных частотах повторения импульсов. В схеме комбинированного ИПОР при плавном изменении частоты повторения импульсов f_p от 1 до 40 кГц и одновременном наблюдении за пульсациями конвективного факела было обнаружено множество узких частотных интервалов, при которых происходило нарушение регулярности пульсаций конвективного факела. Всего наблюдалось четыре основных типа нарушения регулярности пульсаций конвективного факела.

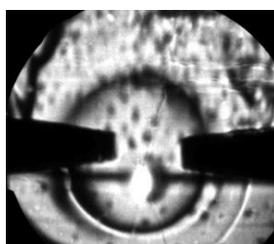
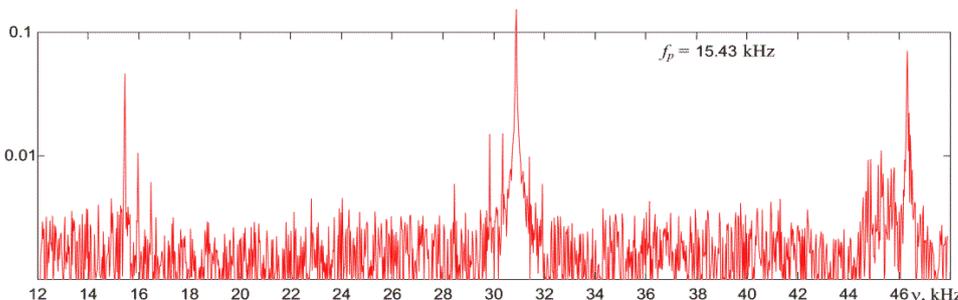
Каждому из типов соответствовал свой набор резонансных частот, которые при этом возбуждались. На Рис. 9 показаны теневые изображения различных типов нарушений регулярности пульсаций конвективного факела ИПОР с соответствующими спектрами регистрируемых при этом резонансных акустических колебаний.



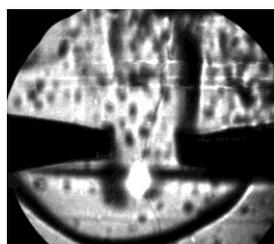
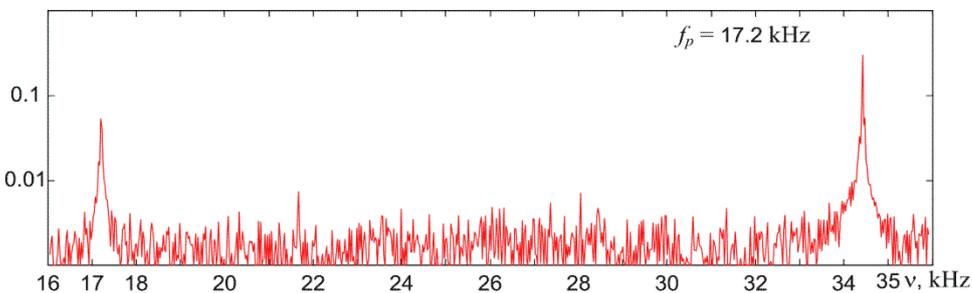
a) $f_p = 13.2$ кГц



b) $f_p = 15.4$ кГц



c) $f_p = 17.2$ кГц



d) $f_p = 29.9$ кГц

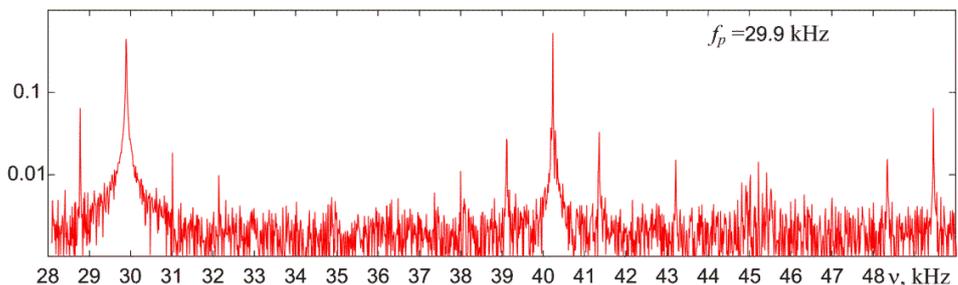
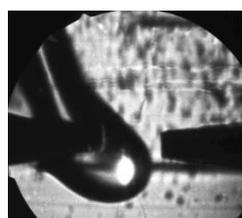
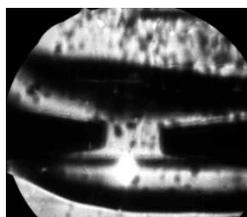


Рис. 9 Типы нарушений регулярных пульсаций конвективного факела комбинированного ИПОР. *a)* колебания из стороны в сторону; *b)* образование гигантских вихрей *c)* радиально пульсирующий факел *d)* супер-расширение факела.

На Рис. 10 показаны наблюдавшиеся явления стабилизации плазмы с подавлением регулярных колебаний конвективного факела, по-видимому, в результате возникающих под действием акустических колебаний определенной амплитуды и частоты направленных потоков газа в месте расположения плазмы, так называемых акустических потоков.



a) $f_p = 8.25$ кГц



b) $f_p = 23$ кГц

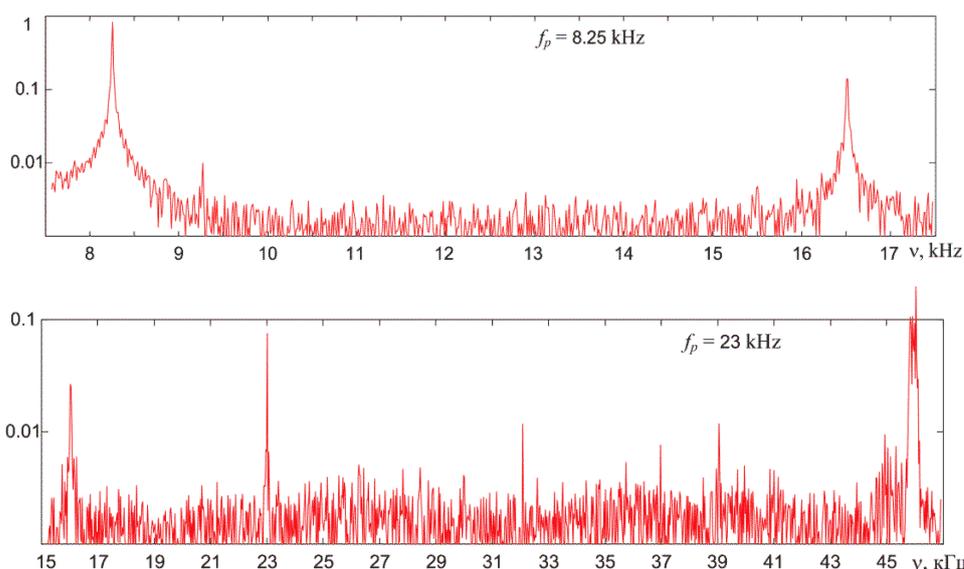


Рис. 10 Случаи стабилизации конвективного факела ИПОР под действием резонансных акустических колебаний. *a)* стационарный наклон факела; *b)* квазистабильное горизонтальное растекание горячего газа.

С помощью рассчитанных резонансных частот колебаний газа внутри идеального сфероида [7, 9] были сделаны оценки собственных частот резонансных акустических колебаний в разрядном объеме при рабочей температуре (~ 500 К) и установлено приблизительное соответствие между возбуждаемыми типами акустических колебаний и наблюдаемыми нарушениями колебаний конвективного факела. Скорость образующихся под действием резонансных колебаний акустических потоков оценивалась по изменению наклона конвективного факела, а также по зарегистрированному изменению частоты регулярных колебаний факела и составляла по порядку величины десятки сантиметров в секунду.

В **пятой главе** исследовались явления генерации импульсно-периодическими разрядами направленных потоков газа и влияние этих потоков на устойчивость самих разрядов.

В результате многофотонной ионизации газа излучением фемтосекундного лазера в области максимальной интенсивности лазерного излучения и последующей рекомбинации свободных электронов в окрестности фокуса возникала зона светящейся плазмы, форма и размеры которой зависели от точности настройки положения параболического зеркала. Отклонение зеркала от положения идеальной настройки приводило к нарушению фокусировки в виде астигматизма.

Наблюдавшийся разряд в основном демонстрировал высокую стабильность и повторяемость характеристик свечения от импульса к импульсу, но в некоторых случаях свечение заметно пульсировало.

Поведение разряда зависело от настройки фокусирующего зеркала – максимальные пульсации наблюдались при наилучшей настройке положения фокусирующего зеркала, при которой достигалось максимальное поглощение лазерного излучения

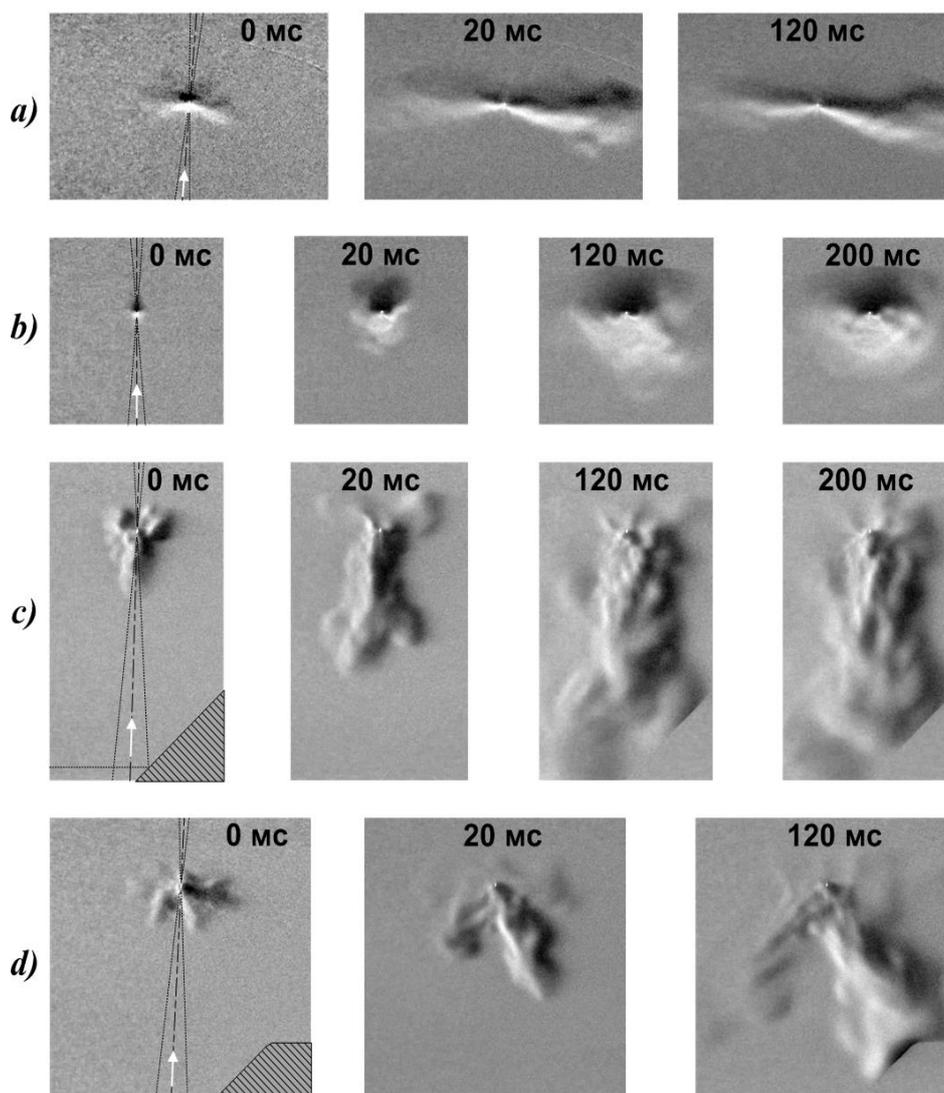


Рис. 11 Развитие конвективных потоков различной формы из области ИП-энерговыведения. Размер кадров в строке b) $10 \times 10 \text{ мм}^2$, остальные кадры в том же масштабе. a) $\alpha \approx 0.4^\circ$, $a \approx 0.3 \text{ мм}$; b) $\alpha \approx -0.33^\circ$, $a \approx 0.25 \text{ мм}$ (вид по направлению струи); c) $\alpha \approx 0^\circ$, $a \approx 0 \text{ мм}$; d) $\alpha \approx 0.2^\circ$, $a \approx 0.15 \text{ мм}$; здесь α – угол отклонения фокусирующего зеркала, a – параметр астигматизма. Лазерное излучение подводится снизу вверх. Светлая точка на фото – зона лазерного воздействия размером 0.1 мм .

Видеорегистрация теневых изображений окрестности области энерговыведения показала, что импульсно-периодическое воздействие лазера создает квазистационарные направленные потоки газа, вытекающие из области фокуса лазерного луча в виде струй, форма и направление которых зависело от настройки положения параболоидного зеркала (Рис. 11). Генерируемые оптическим разрядом потоки могли быть направлены перпендикулярно оси лазерного излучения, под углом к ней, а также вдоль оптической оси либо навстречу лазерному лучу, либо в обратном направлении.

Скорость образующихся потоков газа определялась по объемному расходу вытекающего из области фокуса нагретого газа (до $1 \text{ см}^3/\text{с}$) и составляла от нескольких метров в секунду до нескольких десятков метров в секунду, в зависимости от поперечного сечения потока, которое нарастало по мере увеличения расстояния от порождающей поток области.

Наблюдаемая конвекция являлась вынужденной и не могла быть объяснена термогравитационным механизмом, поскольку направление потока не зависело от ориентации лазерного луча относительно направления силы тяжести, т.е. скорость потока значительно превышала скорость термогравитационной конвекции.

Кадры на Рис. 11 в рядах *a)* и *b)* получены при астигматической фокусировке лазерного излучения. Каждый из рядов представляет собой временную последовательность развития потока после включения излучения. Газовые потоки, генерируемые областью энерговыделения, находящейся в одной из астигматических фокальных перетяжек, имеющей форму уплощенного неправильного диска толщиной ~ 10 мкм и шириной $\sim 50 \div 100$ мкм, вытекали нормально к поверхности «диска» в виде двух струй, направленных в стороны по отношению к оптической оси, как в ряду *a)*.

На Рис. 11, ряд *b)* показано развитие потока также при астигматической фокусировке, но при отклонении зеркала в перпендикулярной плоскости. Плазменный «диск» здесь расположен плоской поверхностью в сторону наблюдателя, на него же направлен поток.

Кадры на Рис. 11, ряд *d)* демонстрируют поток в виде двух струй, расположенных в форме буквы Λ , образующийся при промежуточном угле наклона фокусирующего зеркала между астигматическим пучком и точной настройкой. Поворачивая фокусирующее зеркало от положения астигматической настройки в сторону более точной, можно было наблюдать, как две газовые струи, первоначально направленные противоположно, постепенно поворачивались друг к другу, приближаясь к лазерной оси. В положении точной настройки доля поглощенной мощности возрастала до 55-60%, а две струи соединялись в одну, направленную противоположно лазерному лучу вдоль его оси (соответствующие Рис. 11 *c)*). Течение нагретого и возбужденного газа вдоль оси подводимого к плазме лазерного луча вызывало появление заметных колебаний положения плазмы и распределения интенсивности в сечении прошедшего через зону взаимодействия лазерного луча, что указывало на искажение волнового фронта лазерного луча на градиентах показателя преломления в колеблющейся газовой струе.

Стоит отметить, что наряду с потоком навстречу ходу лазерного луча также удавалось получать поток по ходу лазерного луча, но поток навстречу образовывался с большей вероятностью.

Направленные стационарные потоки, о которых идет речь в данной главе, вероятно, возникают в результате периодически повторяющихся с высокой стабильностью от импульса к импульсу циклов расширения и последующего асимметричного коллапса облака нагретого лазерным импульсом газа. Необходимая для направленности потока асимметрия возникает из-за асимметрии выделения энергии, которой можно управлять, меняя форму области максимальной интенсивности лазерного излучения при фокусировке.

Несмотря на то, что передача энергии лазерных импульсов газу в зоне взаимодействия происходит с образованием ударных волн, из-за относительно небольшого энерговыделения (до 100 мкДж в импульсе) ударные волны не

распространялись во всем разрядном объеме, как было бы при большой энергии в импульсе в режиме лавинного лазерного пробоя или лазерной искры. В результате в разрядном объеме отсутствовала обычно вызываемая ударными волнами турбулентность, что давало возможность наблюдать невозмущенное движение газа на больших расстояниях от зоны непосредственного энерговыделения.

В **шестой главе** исследовались лазерно-индуцированные потоки в жидкостях. В экспериментах при минимальной энергии E_p и мощности P лазерного импульса (с учетом потерь в оптическом тракте $E_p \approx 10$ мкДж, $P \leq 20P_{cr}$, где P_{cr} – мощность начала самофокусировки, определяемая с учетом длительности импульса) при частоте повторения импульсов 1.67 кГц и 5 кГц наблюдался квазистационарный поток жидкости, вытекающий из области фокальной перетяжки в обе стороны вдоль лазерного луча, а также в направлении, перпендикулярном лазерному лучу (Рис. 12). Поток вдоль лазерного луча наблюдался в том случае, когда лазерный луч фокусировался точно на оптической оси линзы без астигматизма (Рис. 12, *a*, *c*). Для внесения искусственного астигматизма центр линзы с фокусным расстоянием $f = 13.2$ мм (параметр фокусировки $f/5n$ в среде с коэффициентом преломления n) смещался поперек оси луча на 0.7-1 мм, одновременно линза наклонялась на угол 1.5-2.2 градусов.

Кадры Рис. 12 *a*), *c*) были получены при точной фокусировке лазерного излучения Рис. 12, *b*), *d*) - при внесенном астигматизме. Потоки визуализированы с помощью подсвеченных газовых пузырьков *a*), *b*) и теневым методом *c*), *d*); линии показывают границы луча, частота следования импульсов $\nu_r = 5$ кГц. Излучение на кадрах падает слева направо. Жидкость: *a*), *b*) вода, $n = 1.325$, *c*), *d*) – тетрахлорметан, $n = 1.45$. Размер кадра *a*), *b*) 3.8×2.1 мм², *c*), *d*) 19.6×11 мм².

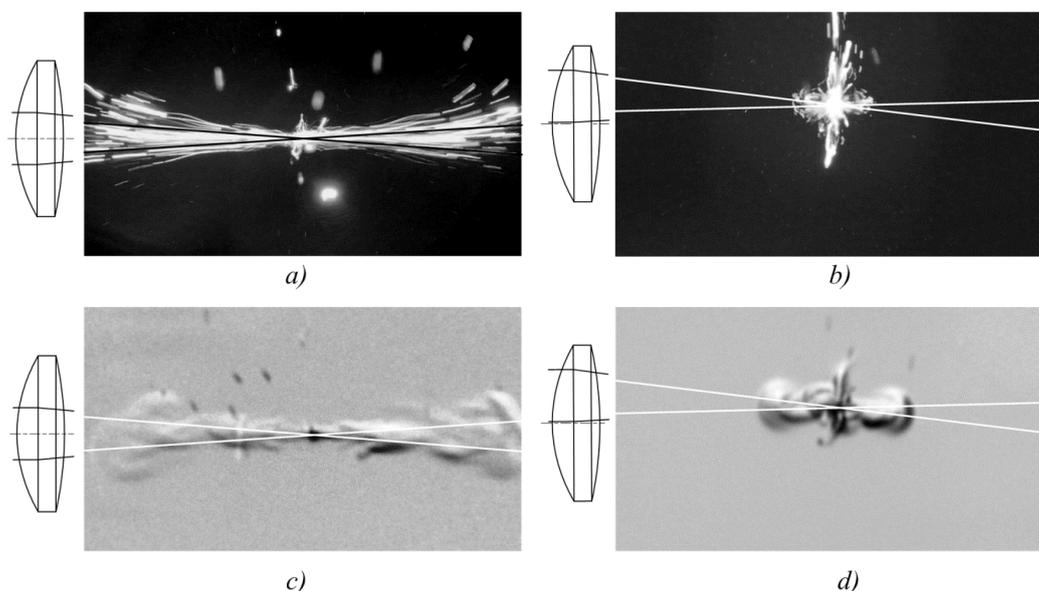


Рис. 12 Образование потоков в воде (*a*, *b*) и тетрахлорметане (*c*, *d*) при небольшой энергии в лазерном импульсе и соответственно слабой самофокусировке. Схематически показан ход лучей в области фокуса и положение линзы относительно луча.

Фокальная перетяжка при внесении астигматизма разделялась на два астигматических фокуса, расположенных на расстоянии $a = 0.5-1$ мм друг от друга по

оси луча. При характерной для слабой самофокусировки длине перетяжки $d < 0.25$ мм такое значение величины a означало, что фокусы отчетливо разделялись. В этом случае поток вдоль оптической оси ослабевал, и наблюдалось появление потока жидкости в перпендикулярном направлении. При анализе кадров видеосъемки видно, что в каждом из астигматических фокусов генерируется ослабленный осевой поток, а эффект поперечного растекания возникает в результате столкновения встречных осевых потоков из разных фокусов. Наблюдаемые скорости перемещения воздушных пузырьков в среднем сечении струи в положении точной настройки были более десяти сантиметров в секунду, что указывало на возможную скорость в минимальном сечении у фокуса метр в секунду и более. Скорость определялась по длине треков от движущихся пузырьков, как на Рис. 12, а), при известном времени экспозиции.

В случае, когда энергия в импульсе с учетом потерь в оптической системе составляла 100 мкДж и более ($P \geq 100P_{cr}$), наблюдалась более сложная картина течений, обусловленная тем, что в жидкости при достаточно большой интенсивности излучения проявлялся эффект самофокусировки (керровская линза), и не доходя до обычного фокуса луч сжимался в достаточно длинную перетяжку (до 15 мм). В области перетяжки происходит взаимодействие усилившегося поля световой волны с электронами молекул жидкости, вызывающее диссоциацию молекул и одновременно дефокусировку луча. Этот процесс на протяжении длины перетяжки повторяется несколько раз, пока луч, теряя мощность из-за поглощения, не перестает самофокусироваться. В результате на протяжении перетяжки образуется несколько зон высокой интенсивности, в каждой из которых жидкость приходит в движение по оси луча, так же, как в случае слабой самофокусировки, а между ними продольные потоки сталкиваются и растекаются в поперечном направлении.

На Рис. 13 показано в динамике формирование картины течений после включения излучения с частотой повторения импульсов 1.67 кГц, а также установившаяся картина продольных и поперечных течений при частоте повторения 5 кГц. Энергия в импульсе в обоих случаях 200 мкДж (с учетом потерь в системе подвода и фокусировки излучения), параметр фокусировки $f/(12.8n)$, $n = 1.45$, линиями показана граница луча в отсутствие самофокусировки. Излучение на кадрах падает слева направо. Размер кадра 19.6×11 мм².

В установившемся режиме картина потоков выглядит как два продольных потока, движущихся по каналу луча навстречу друг другу и растекающихся в стороны в месте столкновения. Тепло, выделяющееся вследствие поглощения лазерного излучения, в основном, в области перетяжек, переносится этими потоками к месту их столкновения, где после растекания жидкости в стороны образуется факел термогравитационной конвекции, уносящий выделяющееся тепло в верхние слои жидкости.

Поскольку общая картина течений во всех исследованных жидкостях была сходной, можно считать динамический механизм образования потоков в результате коллапса газовых пузырьков, образующихся при многофотонной диссоциации молекул

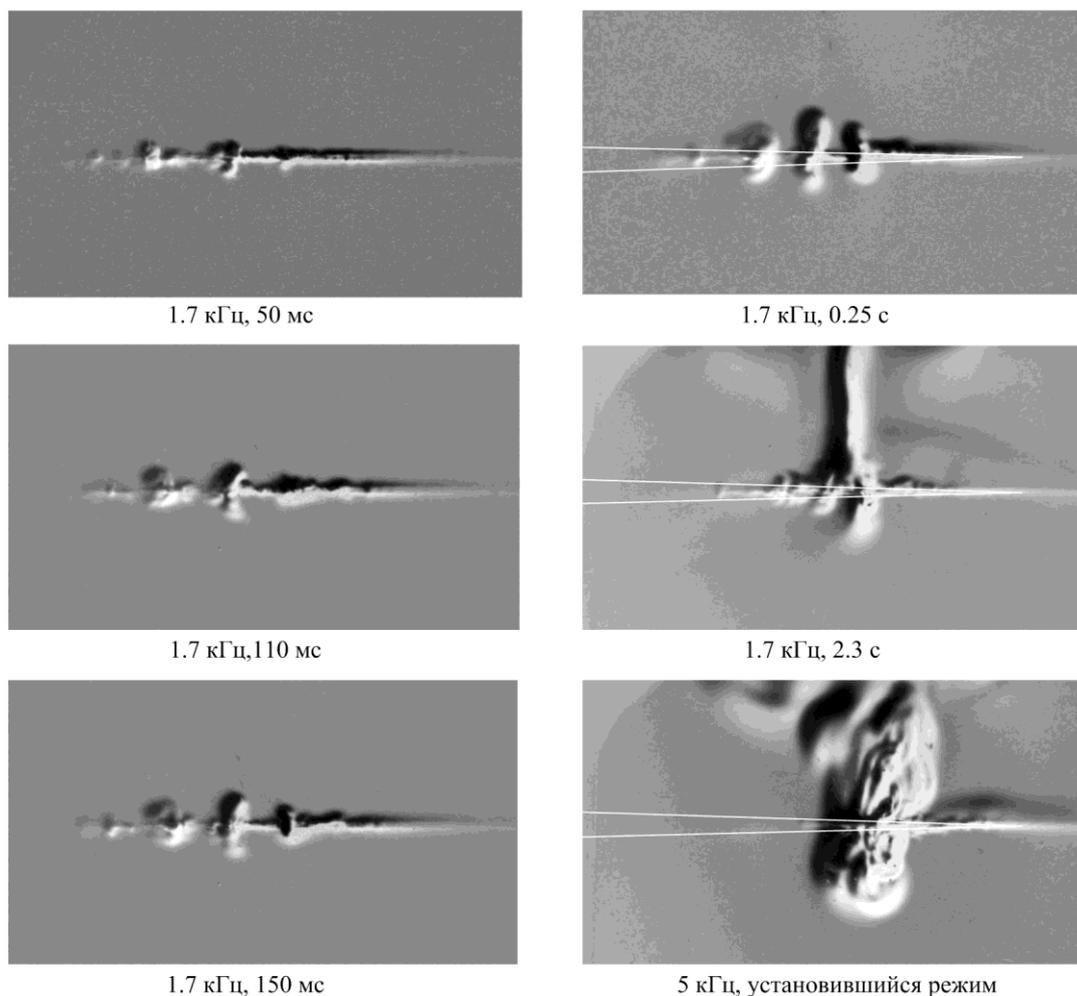


Рис. 13 Образование продольных и поперечных потоков в тетрахлометане в длинной фокальной перетяжке, образующейся в результате сильной самофокусировки.

жидкости, [13] наиболее вероятным механизмом, ответственным за образование наблюдаемых потоков.

Результаты проведенных исследований могут служить основой для применения в лазерных технологиях обработки или синтеза материалов с применением жидкостной среды, а также в оптомеханике.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей диссертации были получены следующие основные результаты:

1. Разработаны и реализованы экспериментальные установки, позволяющие исследовать потоки, порождаемые ОР и влияющие на их стабильность. Реализована и отработана схема теневой визуализации для скоростной шпирен-видеосъемки с плазмой НОР в качестве непрерывного точечного источника излучения высокой яркости.

2. Исследованы пульсации конвективного факела НОР, служащие одной из главных причин пульсаций положения и яркости плазмы НОР и источников излучения на основе НОР. Путем сравнения результатов математического моделирования конвективного факела от сосредоточенного источника тепла, эквивалентного НОР, с результатами экспериментов доказана гидродинамическая природа регулярной

осцилляции НОР. Предложен закон подобия, позволяющий получить оценку частоты регулярных колебаний НОР. Установлено, что он совпадает с законом подобия, известным из исследований пламен, пульсирующих в условиях преобладающего влияния сил плавучести, что указывает на сходную причину наблюдаемой неустойчивости.

3. Впервые проведено исследование самовоздействия ИПОР (и комбинированного ИПОР), возникающего вследствие возбуждения резонансных акустических колебаний в замкнутом разрядном объеме. Установлено, что при определенных частотах повторения импульсов возникают неустойчивости, проявляющиеся в низкочастотных колебаниях скорости и направления конвективных потоков в окрестности ИПОР, приводящие либо к нарушению режима поддержания плазмы вплоть до ее погасания, либо, в определенных случаях, к стабилизации конвективного факела ИПОР с прекращением регулярных пульсаций. Непосредственная причина наблюдаемых явлений – возникновение акустических потоков при возбуждении резонансных акустических колебаний в разрядном объеме под действием ИПОР.

4. Впервые наблюдались квазистационарные направленные потоки газа из зоны ИПОР в сфокусированном луче фемтосекундного лазера. Доказано, что интенсивность и направление газовых потоков определяется формой области диссипации энергии ИПОР. Предложен способ управления направлением индуцируемых ИПОР газовых потоков за счет настройки оптики, фокусирующей лазерное излучение. Доказано, что генерируемые потоки в зависимости от интенсивности и направления могут либо вызывать неустойчивости ИПОР, либо создавать условия для его стабильного поддержания.

5. Впервые наблюдались направленные потоки в жидкостях под действием излучения фемтосекундного импульсно-периодического лазера. Установлено, что в области фокальных перетяжек образуются квазистационарные потоки, направленные вдоль оси лазерного луча в обе стороны от перетяжки. В случае, когда перетяжек несколько (например, при самофокусировке, или фокусировке с астигматизмом) наряду с потоками вдоль луча наблюдаются участки с растекающимся в стороны от луча потоком, образующимся в результате столкновения встречных потоков, генерируемых в перетяжках с высокой интенсивностью лазерного излучения. Показано, что наряду с различиями, установлены сходные черты поведения потоков, порождаемых ИПОР в жидкостях и газах высокого давления, указывающие на сходство динамических механизмов генерации струйных течений в ИПОР в газах и жидкостях.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных журналах, индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus, RSCI:

- A1. 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. В. 2. <http://chemphys.edu.ru/issues/2016-17-2/articles/653/>

- A2. Зимаков В.П., Лаврентьев С.Ю., Соловьев Н.Г., Шемякин А.Н., Якимов М.Ю. Пространственная и временная нестабильность оптических разрядов // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2018. Т.19, вып. 4. <http://chemphys.edu.ru/issues/2018-19-4/articles/754/>
- A3. Лаврентьев С.Ю., Соловьев Н.Г., Шемякин А.Н., Якимов М.Ю. Лазерно-индуцированные потоки в жидкостях в зависимости от условий фокусировки излучения фемтосекундного лазера // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2019. Т.20, вып. 3. <http://chemphys.edu.ru/issues/2019-20-3/articles/852/>
- A4. Lavrentyev S.Yu, Solovyov N.G., Shemyakin A.N., Yakimov M.Yu. Gasdynamic effects in optical discharges produced by periodic pulse femtosecond laser // Journal of Physics: Conference Series. 2019. 1250. 012027 <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1250/1/012027>
- A5. Lavrentyev S.Yu, Solovyov N.G., Shemyakin A.N., Yakimov M.Yu. Buoyancy driven convection instability and related pulsing of continuous optical discharges // Journal of Physics: Conference Series. 2019. 1394. 012012 <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1394/1/012012>
- A6. Lavrentyev S.Yu, Solovyov N.G., Shemyakin A.N., Yakimov M.Yu. Hydrodynamic phenomena in optical discharges in liquids under self-focusing of periodic-pulse laser radiation // Journal of Physics: Conference Series. 2020. 1698. 012017 doi:10.1088/1742-6596/1698/1/012017
- A7. Kotov M.A., Lavrentyev S.Yu, Solovyov N.G., Shemyakin A.N., Yakimov M.Yu. Dynamics of laser plasma convective plume in high pressure xenon // Journal of Physics: Conference Series. 2020. 1675. 012073 <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1675/1/012073>
- A8. Kotov M.A., Lavrentyev S.Yu, Solovyov N.G., Shemyakin A.N., Yakimov M.Yu. Acoustic resonances in a pressurized discharge volume with xenon and instabilities of periodic-pulse optical discharges // Journal of Physics: Conference Series. 2020. 1698. 012018
- A9. Лаврентьев С. Ю., Соловьев Н. Г., Шемякин А. Н., Якимов М. Ю. Визуализация лазерно-индуцированных потоков в жидкостях в зависимости от условий фокусировки излучения фемтосекундного лазера // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2021. Т.22, вып. 2. <http://chemphys.edu.ru/issues/2021-22-2/articles/928/>
- A10. Соловьев Н.Г., Лаврентьев С.Ю., Шемякин А.Н., Якимов М.Ю. Способ предотвращения колебаний оптического разряда. Патент на изобретение RU 2 734 111 С1. Заявка № 2020118918 от 08.06.2020. Дата регистрации 13.10.2020, опубликовано 13.10.2020, бюллетень № 29.
- A11. Лаврентьев С. Ю., Соловьев Н. Г., Шемякин А. Н., Якимов М. Ю. Образование стационарных газовых потоков под действием импульсно-периодических оптических разрядов // Волны и вихри в сложных средах: 9-ая международная конференция – школа молодых ученых. Москва, 5-7 декабря 2018 г. Сборник материалов школы

- A12. Зимаков В.П., Лаврентьев С.Ю., Соловьев Н.Г., Шемякин А.Н., Якимов М.Ю. Вынужденная конвекция в оптических разрядах, создаваемых излучением фемтосекундного лазера // Современные проблемы механики и математики: Научные слушания, посвященные 110-летию со дня рождения С.А. Христиановича; 15-16 ноября 2018 г., Москва: Сборник материалов
- A13. Лаврентьев С. Ю., Соловьев Н. Г., Шемякин А. Н., Якимов М. Ю. Пульсации конвективного потока от сосредоточенного источника тепла – непрерывного оптического разряда // Волны и вихри в сложных средах: 10-ая международная конференция - школа молодых ученых; 03-05 декабря 2019 г., Москва: Сборник материалов конференции
- A14. Lavrentyev S.Yu, Solovyov N.G., Shemyakin A.N., Yakimov M.Yu Quasy-stationary gas motion induced by periodic-pulse optical discharges // Proceedings of the 18th Workshop on Magneto-Plasma Aerodynamics. Ed. V.A. Bityurin. 2019.
- A15. Котов М.А., Лаврентьев С.Ю., Соловьев Н.Г., Шемякин А.Н., Якимов М.Ю. Резонансные акустические колебания в замкнутом объеме с ксеноном и неустойчивости импульсно-периодического оптического разряда // Proceedings of the 19th Workshop on Magneto-Plasma Aerodynamics Ed. V.A. Bityurin. 2020
- A16. Котов М.А., Лаврентьев С.Ю., Соловьев Н.Г., Яценко Е.А., Монахов Н.А. Разработка усилителя сигнала для использования в импульсном газодинамическом эксперименте // XXXI Международная конференция "Лазеры в науке, технике, медицине" (2020 год, Том 31)
- A17. Лаврентьев С. Ю., Соловьев Н. Г., Шемякин А. Н., Якимов М. Ю. Образование направленных потоков в жидкостях под действием излучения фемтосекундного импульсно-периодического лазера // Волны и вихри в сложных средах: 11-ая международная конференция - школа молодых ученых, 1-3 декабря 2020 г., Москва: Сборник материалов школы
- A18. Котов М.А., Лаврентьев С.Ю., Соловьев Н.Г., Шемякин А.Н., Якимов М.Ю. Динамика конвективного потока от оптического разряда в ксеноне при высоком давлении // Волны и вихри в сложных средах: 11-ая международная конференция - школа молодых ученых, 1-3 декабря 2020 г., Москва: Сборник материалов школы
- A19. Котов М.А., Лаврентьев С.Ю., Соловьев Н.Г., Шемякин А.Н., Якимов М.Ю. Гидро- и газодинамические неустойчивости, вызываемые оптическими разрядами // XXXI Международная конференция "Лазеры в науке, технике, медицине" (2020 год, Том 31)
- A20. Котов М.А., Лаврентьев С.Ю., Соловьев Н.Г., Шемякин А.Н., Якимов М.Ю. Влияние резонансных акустических колебаний в разрядном объеме на устойчивость оптических разрядов // Волны и вихри в сложных средах: 11-ая международная конференция - школа молодых ученых, 1-3 декабря 2020 г., Москва: Сборник материалов школы
- A21. Котов М.А., Лаврентьев С.Ю., Соловьев Н.Г., Шемякин А.Н., Якимов М.Ю., Манзенюк О.Ю., Мухина Т.Н., Марьин М.А., Журина М.В. Бактерицидное действие коротковолнового УФ, генерируемого плазмой, поддерживаемой

лазерным излучением // XXXI Международная конференция "Лазеры в науке, технике, медицине" (2020 год, Том 31)

- A22. Котов М.А., Лаврентьев С.Ю., Соловьев Н.Г., Шемякин А.Н., Якимов М.Ю. Динамика конвективного факела от лазерной плазмы в ксеноне при высоком давлении // V Всероссийская научная конференция «Теплофизики и физическая гидродинамика» с элементами школы молодых учёных. 2020

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Райзер Ю.П. Оптические разряды // Успехи физических наук, т.132, вып.3, с. 549-581 (1980)
2. Суржиков С.Т. Физическая механика газовых разрядов // (М.: Изд-во МГТУ им. Н.Е.Баумана, 2006) 640 с.
3. Smith D.K., et al. Laser Driven Light Source / US patent #7435982, 2008; #8309943, 2012.
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.
5. 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. В. 2. <http://chemphys.edu.ru/issues/2016-17-2/articles/653/>
6. Котов М.А., Лаврентьев С.Ю., Соловьев Н.Г., Шемякин А.Н., Якимов М.Ю., Манзенюк О.Ю., Мухина Т.Н., Марьин М.А., Журина М.В. Бактерицидное действие коротковолнового УФ, генерируемого плазмой, поддерживаемой лазерным излучением // XXXI Международная конференция "Лазеры в науке, технике, медицине" (2020 год, Том 31)
7. Heins A M, Guo Chunlei 2012 High stability breakdown of noble gases with femtosecond laser pulses Optics Letters 37(4) pp 599-601 <https://doi.org/10.1364/OL.37.000599>
8. 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, 38(1), с. 82–87 <http://mi.mathnet.ru/rus/qe/v38/i1/p82>.
9. Зимаков В.П., Кузнецов В.А., Рудой И.Г., Соловьев Н.Г., Сорока А.М., Шемякин А.Н., Шилов А.О., Якимов М.Ю. Импульсно-периодические и комбинированные режимы поддержания оптических разрядов // «Физико-химическая кинетика в газовой динамике», т. 16, вып. 2, 2015. <http://chemphys.edu.ru/issues/2015-16-2/articles/548/>
10. Барановский А., Муха З., Перадзыньский З. Неустойчивость непрерывного оптического разряда в газах// Успехи механики, 1978. Т. 1(3/4). С. 125-147.
11. Xia Xi, Zhang Peng. A vortex-dynamical scaling theory for flickering buoyant diffusion flames // 2018 Journal of Fluid Mechanics 855 1156-1169

12. Gallo C.F., Lama W.L. Acoustical resonances in modulated compact arc lamps // Applied Optics. 1977. V. 16(4). P. 819-820.
13. Han B., Köhler K., Jungnickel K., Mettin R., Lauterborn W., Vogel A. Dynamics of laser-induced bubble pairs // J. Fluid Mech. 2015. V. 771. P. 706-742.