

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу Андросенко Владислава Николаевича
**«Управление потоками, генерируемыми оптическими разрядами
различных типов, с целью стабилизации их характеристик»**

на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по
специальности 1.1.9. Механика жидкости газа и плазмы

Диссертация Андросенко В.Н. посвящена экспериментальному исследованию направленных течений, возникающих при непрерывных и импульсно-периодических оптических разрядах в замкнутых разрядных объемах с инертными газами под высоким давлением. В работе исследуется влияние газовых потоков на стабильность и повторяемость от импульса к импульсу характеристик самих разрядов, а также возможностей для воздействия на потоки с целью повышения стабильности непрерывных разрядов и улучшения повторяемости характеристик от импульса к импульсу импульсно-периодических разрядов.

Интерес к исследованиям на стыке лазерной физики, физики плазмы и термогазодинамики обусловлен растущими потребностями новых технологий, в электронной промышленности, аналитическом приборостроении, биологии, технологии материалов, аэрокосмической технике и других отраслях. В частности, в электронной промышленности большое развитие получило использование непрерывного оптического разряда в качестве источника широкополосного излучения высокой яркости, прежде всего в ультрафиолетовом диапазоне, для задач инспекции литографического процесса при производстве микросхем. Для таких применений наряду с высокими удельными характеристиками разрядов требуется также высокая стабильность.

Стабильность и повторяемость от импульса к импульсу оптических разрядов стационарного типа (то есть, поддерживаемых в течение длительного времени) в значительной степени обусловлена возникающими квазистационарными потоками плазмообразующего газа в замкнутом разрядном объеме. Таким образом, вопросы, рассматриваемые в диссертации, представляются актуальным.

В научной литературе влияние самоиндуцируемых потоков на характеристики оптических разрядов представлено относительно небольшим количеством статей, так что публикации с участием автора по теме диссертации на этом фоне выглядят заметными и цитируются.

В диссертации автор большое внимание уделяет условиям поддержания и характеристикам непрерывного оптического разряда в аргоне и ксеноне, методам подавления пульсаций конвективного потока от непрерывного оптического разряда, исследованию факторов высокой стабильности тихого импульсно-периодического оптического разряда, а также нарушению стабильности при переходе от тихого разряда к импульсно-периодическому пробоя, сопровождающемуся резким изменением характера генерируемых разрядом струйных течений. Кроме того, на основе проведенных исследований Андросенко В.Н. предлагает и реализует оптическую схему подвода лазерного излучения, позволяющую за счет воздействия на структуру индуцируемых потоков значительно повысить повторяемость характеристик импульсно-периодического пробоя при высокой частоте повторения импульсов.

Для поддержания оптических разрядов автор применяет оптические схемы, которые могут быть использованы в реальных конструкциях источников излучения с оптическими разрядами, что повышает практическое значение результатов, полученных в диссертации.

В диссертации используются различные методы исследования потоков в условиях непрерывных и импульсно-периодических оптических разрядов. В частности, автор применяет теневой прибор с непрерывным оптическим разрядом в качестве точечного источника излучения, что дает дополнительные возможности при скоростной съемке, важные для исследования структуры исследуемых течений. Относительно новой является методика эмиссионной оптической спектроскопии, применяемая для абсолютных измерений спектральной яркости плазмы, а также ее температуры и концентрации. Новым и интересным является использование оптической схемы с разделением лазерного луча для формирования симметричной области тепловыделения вблизи фокуса, при этом симметризация дает значительный стабилизирующий эффект в режиме импульсно-периодического оптического пробоя. Для регистрации и анализа лазерного излучения автор использует несколько типов измерителей мощности и анализатор распределения интенсивности по сечению лазерного луча. Активное использование автором комплекса экспериментальных методов повышает надежность и достоверность проведенных исследований.

Диссертация состоит из **введения**, пяти **глав** и **заключения**.

Во **введении** обозначены цели и задачи диссертации, обсуждается актуальность и практическая значимость работы, кратко охарактеризованы применяемые методы исследования, выделены новые результаты и сформулированы научные положения.

В **первой главе** проведен обзор научной литературы, относящейся к теме диссертации, в частности об особенностях и проблемах поддержания оптических разрядов лазерами ближнего ИК-диапазона, влияющих на стабильность плазмы, и причинах, вызывающих нарушение стабильности и связанных с генерацией и структурой газовых потоков.

Во **второй главе** приведены результаты экспериментального исследования непрерывного оптического разряда (НОР) в аргоне, поддерживаемого излучением лазера на длине волны 1,08 мкм. Получены данные по пороговой мощности поддержания НОР и характеристикам плазмы разряда. Определена частота пульсации факела термогравитационной конвекции вокруг НОР в диапазоне давлений 23-50 бар. Проведено сопоставление полученных экспериментальных данных с теоретическими оценками.

В **третьей главе** приведены результаты исследования эффекта стабилизации (подавления пульсаций) потока термогравитационной конвекции непрерывного оптического разряда в ксеноне в зависимости от расстояния между вспомогательными электродами. Также исследовано влияние волн плотности, вызываемых пульсациями конвективного потока вокруг разряда в цилиндрическом разрядном объеме, на однородность и стабильность разрядной плазмы.

Четвёртая глава посвящена исследованию квазистационарных газовых потоков, возникающих при импульсно-периодическом оптическом разряде в режимах тихого оптического разряда и оптического пробоя, а также при переходе от одного режима к другому.

В **пятой главе** показаны возможности управления направлением потоков, индуцируемых при импульсно-периодическом оптическом пробое, с целью повышения стабильности и повторяемости характеристик плазмы в схеме фокусировки лазерного излучения с двумя пересекающимися лучами.

Заключение содержит основные выводы диссертации.

Следует особо отметить **новые результаты**, полученные Андросенко В.Н. в диссертации.

Пороговые мощности поддержания непрерывного оптического разряда лазерным излучением на длине волны 1.08 мкм и характеристик пульсаций конвективного факела НОР в аргоне при высоком давлении **впервые** определены в комплексе с полным набором характеристик лазерного излучения и геометрических факторов, характеризующих плазму разряда и конвективный поток вокруг него. Это позволило автору провести корректное сравнение полученных данных с теоретическими оценками и получить удовлетворительное согласие как по пороговой мощности с учетом реальных

характеристик лазерного луча, так и по частотам колебаний конвективного потока.

Впервые исследован механизм подавления пульсаций конвективного факела НОР при взаимодействии с восходящими потоками от расположенных рядом нагретых электродов. Это исследование позволило определить условия подавления конвективных пульсаций и предложить численную модель для дальнейших исследований.

Впервые исследовано происхождение структурированных потоков от тихого импульсно-периодического разряда. Важный факт отсутствия потоков, направленных вдоль оптической оси, в разряде этого типа объясняется низким поглощением лазерного излучения и в результате высокой симметрией области импульсного тепловыделения. Сложная структура потоков также нашла объяснение на основе моделирования структуры перетяжки лазерного луча при наличии астигматизма.

Впервые удалось значительно повысить стабильность плазмы импульсно-периодического оптического пробоя, как от импульса к импульсу, так и в среднем по времени, с помощью предложенной автором оптической схемы, в которой лазерный луч делится на две компоненты, а разряд располагается на пересечении двух сфокусированных лучей. Оказалось, что схема с пересекающимися лучами позволяет получить гораздо более симметричное тепловыделение в зоне разряда и за счет этого принципиально изменить направление потока, генерируемого разрядом.

Эффект изменения картины течения газа вокруг разряда при возникновении резонансных акустических колебаний в разрядном объеме сам по себе не является новым, но факт присутствия этого эффекта хотя бы в течение нескольких секунд в условиях импульсно-периодического лазерного пробоя говорит о достижении весьма высокого уровня стабильности разряда, что также можно квалифицировать как **новое** достижение.

Особо хотелось отметить **уровень публикаций** работы. Все 5 статей в рассматриваемых областях относятся к категории К1 перечня ВАК (причем 4 статьи относятся также к первому квартилю Q1, и одна – Q2). Это подтверждает, что работа полностью соответствует мировому уровню в данной области.

Принципиальных замечаний по диссертации нет. В качестве частных замечаний можно отметить следующее:

1. Конечно, работа, в основном, экспериментальная, но теоретические оценки в ней делаются, и они принципиально важны для понимания (и количественного, и качественного) наблюдаемых эффектов. Таких оценок, в особенности по параметрам подобия, хотелось бы видеть больше.

2. Практически линейный график зависимости пороговой мощности подавления конвективных пульсаций от расстояния между электродами (рис.3.4) порождает мысль о простой зависимости, которую можно было бы проанализировать.

3. Очень интересный результат связан с генерацией акустического резонанса и акустических течений. Генерация акустической волны и стабилизация с помощью акустики, безусловно, выглядят очень интересно и заслуживают в дальнейшем более подробных исследований.

4. Работа предоставляет объемный материал для моделирования и, в то же время, результаты такого моделирования позволили бы рассмотреть вопросы уточнения констант и оптимизации параметров, которые пока рассматриваются только в оценочном варианте. Понятно, что данный пункт в значительной мере является, скорее, пожеланием на будущее.

Тем не менее, высказанные замечания не влияют на общую оценку диссертационной работы и справедливость сформулированных в ней научных положений.

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную исследовательскую работу на актуальную тему, в которой автор продемонстрировал владение экспериментальными методами гидродинамики, оптики, лазерной физики, а также методами математического моделирования, и успешно решил важную задачу оптимизации сложных физико-гидродинамических процессов в оптических разрядах. Полученные Андросенко В.Н. с соавторами новые важные научные результаты демонстрируют возможности управления оптическими разрядами путем генерации ими потоков, что важно для применений оптических разрядов в различных отраслях науки и техники.

Научные положения, сформулированные в диссертации, достаточно обоснованы и не вызывают сомнений. Результаты диссертации опубликованы в ведущих рецензируемых научных изданиях, известны широкому кругу специалистов и получили достаточную апробацию на Всероссийских и международных научных конференциях.

Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации.

Считаю, что диссертация отвечает критериям Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Андросенко Владислав Николаевич заслуживает

присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы.

“26” октября 2026 г.

Официальный оппонент Уваров Александр Викторович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры молекулярных процессов и экстремальных состояний вещества физического факультета Московского государственного университета им. М.В.Ломоносова.

Адрес: 119991, г.Москва, ГСП-1, Москва Ленинские горы, МГУ имени М.В. Ломоносова, дом 1, строение 2, Физический факультет тел. +7(916)501-52-24, эл почта : uvarov@phys.msu.ru.

Даю согласие на обработку своих персональных данных.



А.В.Уваров

Подпись профессора А.В.Уварова заверяю.

И.о. декана физического факультета МГУ,
профессор



В.В.Белокуров

Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова,
физический факультет

Адрес: 119991, ГСП-1, Москва Ленинские горы, МГУ имени М.В. Ломоносова, дом 1, строение 2, Физический факультет, тел. +7 (495) 939-16-82

E-mail: info.ff@org.msu.ru, сайт : phys.msu.ru