

ОТЗЫВ официального оппонента  
о диссертации Лаврентьева Сергея Юрьевича  
«Газодинамические явления в непрерывном и импульсно-периодическом  
оптических разрядах», представленной на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 (1.1.9) –  
«Механика жидкости, газа и плазмы»

*Актуальность темы и практическая значимость.* Диссертация посвящена явлениям движения газа и жидкости под действием непрерывных и импульсно-периодических оптических разрядов (ОР). Эти разряды могут использоваться в непрерывных и импульсно-периодических генераторах плазмы для различных практических целей. Одно из таких применений, активно развивающееся в последнее время – плазменные источники широкополосного излучения высокой спектральной яркости. Эти источники могут использоваться для скоростной съемки в том числе и в приборах Теплера. Отсутствие электродов и других источников примесей делают ОР удобным объектом для спектроскопии, проверки теоретических моделей лучистого теплообмена. Можно также говорить о лазерных плазмотронах для модификации поверхности и нанесения покрытий.

Для многих применений ОР существенное значение имеет стабильность и повторяемость характеристик плазмы, что зависит от воздействия на плазму потоков газа в разрядном объеме.

*Научная новизна.* В диссертации исследованы новые явления и получен ряд важных результатов. Во-первых, это соотношение подобия, связывающее диаметр конвективного факела оптического разряда с частотой его пульсаций. Выявлена гидродинамическая природа пульсаций.

Впервые проведено исследование влияния резонансных акустических колебаний в разрядном объеме на устойчивость импульсно-периодического оптического разряда. Установлено, что возникающие при этом акустические потоки могут как нарушать стабильность оптического разряда вплоть до погасания плазмы, так и стабилизировать разряд с подавлением конвективных пульсаций.

Впервые наблюдались направленные стационарные потоки газа из зоны оптического разряда в фокусе луча фемтосекундного импульсно-периодического лазера в инертных газах при высоком давлении и в жидкостях. Доказано, что интенсивность и направление наблюдаемых потоков определяется геометрией области диссипации энергии лазерного

излучения и предложен способ оптического управления индуцируемыми потоками.

Проведенные исследования объясняют нестабильность плазмы оптических разрядов и позволяют улучшить стабильность характеристик плазмы за счет методов управления потоками. Найденные методы стабилизации защищены патентом с участием Лаврентьева С.Ю.

*Достоверность полученных результатов* следует из физической обоснованности постановки экспериментальных задач, применением апробированных методов регистрации и исследования потоков газов и жидкостей, соответствием данных экспериментов и численного моделирования, повторяемостью результатов экспериментов, а также соответствием полученных результатов результатам других авторов.

Диссертационная работа изложена на 202 страницах и состоит из введения, шести глав и заключения.

*Во введении* обоснована актуальность темы диссертации, определена цель работы, ее практическая значимость, новизна полученных результатов, описаны методы исследования и сформулированы защищаемые положения.

В первой главе дан обзор литературы по способам организации оптических разрядов и факторам, влияющим на стабильность плазмы оптических разрядов.

*Во второй главе* описаны методы исследований, проведенных в диссертации, применяемые способы организации оптических разрядов, а также экспериментальные схемы, используемые для регистрации течений вокруг оптических разрядов и сопутствующих явлений.

Описаны методы исследования конвективных пульсаций непрерывного оптического разряда, резонансных акустических колебаний и их воздействия на стабильность импульсно-периодического оптического разряда, а также струйных течений, генерируемых импульсно-периодическими разрядами в газах и жидкостях.

*В третьей главе* приведены результаты исследования пульсаций конвективного факела непрерывного оптического разряда в широком диапазоне давления плазмообразующего газа. Экспериментально получена зависимость частоты пульсаций и характеристик конвективного факела от давления газа. На основании предварительного теоретического рассмотрения предложен метод обработки экспериментальных данных, выявляющий закономерности исследуемого явления. Показано, что соотношение диаметра конвективного факела и частоты пульсаций подчиняется закону подобия,

схожему с аналогичным законом подобия для мерцающих пламен. Проведено численное моделирование пульсаций конвективного факела от сосредоточенного источника тепла, эквивалентного оптическому разряду. Качественное и количественное соответствие результатов моделирования и данных эксперимента доказывает гидродинамическую природу пульсаций.

*Четвертая глава* посвящена исследованию воздействия резонансных акустических колебаний и индуцируемых ими акустических течений на устойчивость и повторяемость от импульса к импульсу комбинированного оптического разряда с импульсно-периодической модуляцией энерговыклада.

При определенных частотах повторения импульсов, соответствующих или кратных частотам собственных акустических колебаний в разрядном объеме, наблюдались явления, указывающие на появление акустических потоков, способных как нарушать стабильность горения разряда, так и стабилизировать его за счет, например, подавления конвективных колебаний, аналогичных исследованным в предыдущей главе. Описаны различные виды проявления указанных эффектов, получены спектры возникающих при этом акустических колебаний.

*В пятой главе* представлены результаты исследования струйных течений, генерируемых импульсно-периодическими оптическими разрядами, предложены методы управления направлением генерируемых потоков и механизмы влияния этих потоков на устойчивость оптического разряда.

На основании оценок и ссылок на исследования других авторов основным механизмом поддержания оптического разряда излучением фемтосекундного лазера названа многофотонная ионизация. Показано, что форма области энерговыделения в таком разряде определяется формой фокальной перетяжки, зависящей от настройки фокусирующего зеркала. Показано, как при изменении настройки фокусирующего параболического зеркала можно менять направление индуцируемого газового потока от перпендикулярного оптической оси лазера до коаксиального.

*В шестой главе* исследуются в целом аналогичные предыдущей главе явления, возникающие при фокусировке излучения импульсно-периодического фемтосекундного лазера в жидкости. При малой энергии в импульсе генерируемые потоки жидкости ведут себя в целом аналогично случаю предыдущей главы. При увеличении энергии в импульсе выше порога самофокусировки ситуация меняется, поскольку в этом случае форма области энерговыделения задается уже не фокусирующей оптикой, а формируется в результате действия явления самофокусировки и периодической дефокусировки в областях сильного взаимодействия излучения с жидкостью, в которых происходит изменение характеристик

среды за счет диссоциации. Показано, что наблюдаемая картина течений фомируется за счет взаимодействия потоков, индуцируемых отдельными областями энерговыделения, расположенными вдоль протяженной перетяжки, образующейся вследствие самофокусировки.

При общей положительной оценке диссертационной работы можно высказать также ряд *замечаний*:

1. Все статьи в рецензируемых научных журналах, индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus, RSCI написаны претендентом в соавторстве, как минимум с тремя коллегами. Это затрудняет оценить личный вклад претендента.

2. Несмотря на то, что предметом диссертации являются газо- и гидродинамические явления, возникающие при оптических разрядах, а не сама плазма, рассмотрение этих явлений невозможно без знания параметров плазмы, как минимум, ее температуры.

Тем не менее, прямых измерений температуры плазмы в диссертации проведено не было.

3. Экспериментальные точки на рис.3.14 (положение изотермы 3000K) недостаточно обоснованы, т.к. для нахождения положения изотермы из прямолинейной визуализации использовался расчет, который и должен валидироваться экспериментом.

4. На ряде рисунков (1.5, 3.9 - 3.13, 3.18, 3.20, 5.9) распределения физических величин представлены в псевдоцвете, но не приведены цветовые шкалы.

5. Диссертационная работа хорошо структурирована, к каждой главе есть выводы, причем даже несколько избыточные, но при этом нет выводов ко второй главе.

Приведенные замечания, тем не менее, не могут повлиять на общую положительную оценку работы.

На основании сказанного можно заключить, что представленная диссертация вносит существенный вклад в решение важных задач приоритетной области взаимодействия оптических разрядов с индуцируемыми ими же потоками газа и жидкости, а ее автор продемонстрировал высокую квалификацию в области экспериментальных методов гидродинамики и взаимодействия лазерного излучения с веществом.

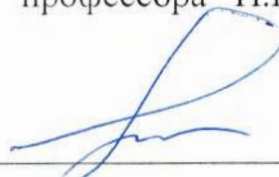
Результаты диссертации достаточно полно представлены в 9 научных статьях из перечня ВАК, индицируемых Web of Science и Scopus, одном изобретении, а также трудах всероссийских и международных конференций, известны широкому кругу специалистов в нашей стране и за рубежом.

Автореферат соответствует содержанию диссертации, а содержание диссертации соответствует указанной научной специальности 01.02.05 (1.1.9) – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Считаю, что диссертационная работа Лаврентьева С.Ю. представляет собой законченную научно-квалификационную работу, полностью удовлетворяющую требованиям, предъявляемым к диссертация на соискание ученой степени кандидата наук Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 №842 (с изменениями, внесенными постановлением Правительства РФ от 21.04.2016 №335), а ее автор Лаврентьев Сергей Юрьевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 (1.1.9) – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Официальный оппонент

Мошаров Владимир Евгеньевич, заместитель начальника отделения Измерительной техники и метрологии (НИО-7) ФГУП «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского», доктор технических наук, доцент



В.Е. Мошаров

р.т. 4955563733 vladimir.mosharov@tsagi.ru

(ФГУП «ЦАГИ» 140180 г. Жуковский, Мос. обл. ул. Жуковского д.1  
www.tsagi.ru)

Подпись руки д.т.н. В.Е. Мошарова заверено

Учёный секретарь диссертационного совета ЦАГИ 31.1.006.01 (Д  
403.004.01) д.ф.-м.н., доцент



М.А. Брутян