

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу Лаврентьева Сергея Юрьевича

«Газодинамические явления в непрерывном и импульсно-периодическом оптических разрядах»

на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по
специальности 01.02.05 (1.1.9) – «Механика жидкости, газа и плазмы»

Диссертация Лаврентьева С.Ю. посвящена получению и экспериментальному исследованию оптических разрядов, возникающих в газах и жидкостях при непрерывном или импульсно-периодическом воздействии интенсивного лазерного излучения и сопровождаемых генерацией конвективных и газодинамических потоков, а также гидродинамических возмущений вследствие возбуждения резонансных акустических колебаний в разрядном объеме.

Интерес к подобным исследованиям на стыке лазерной физики, физики плазмы, газодинамики и химической гидродинамики обусловлен растущими потребностями новых технологий, все шире использующих оптические разряды в электронной промышленности, аналитическом приборостроении, биологии, технологии материалов, авиакосмической технике и других отраслях.

Очевидно, что возникающие потоки и неустойчивости должны контролироваться, предсказываться и, возможно, создаваться при необходимости интенсификации перемешивания. То есть, в качестве сверхзадачи можно говорить об управлении потоком за счет вариации энергоподвода. Для оптического разряда эта задача не кажется неразрешимой и в работе элементы такого управления рассмотрены. Таким образом, обнаружение и исследование механизмов генерации потоков оптическими разрядами представляет собой важную и актуальную задачу.

Исследование возникновения гидродинамических течений при объемном энерговыделении, а также возникающих в потоке неустойчивостей является одной из самых важных и часто обсуждаемых проблем физики горения и взрыва, физики плазмы, гидродинамики релаксирующих и реагирующих сред. Но в более узкой области, связанных с исследованием генерации потоков оптическими разрядами количество работ не так велико и исследования автора диссертации вносят заметный вклад в развитие этого направления.

В диссертации автор уделяет существенное внимание выяснению природы пульсаций конвективного потока от непрерывного оптического разряда, исследованию нарушений стабильности импульсно-периодического оптического разряда под действием резонансных акустических колебаний в разрядном объеме, а также получению и исследованию струйных течений, возникающих в газах и жидкостях при импульсно-периодическом воздействии лазерного излучения высокой интенсивности. Исследование акустических возмущений, которые замыкают обратную связь в дозвуковом потоке, является очень важным, по мнению рецензента, аспектом данной работы.

Для получения оптических разрядов автором применяются оптические схемы, эквивалентные используемым в плазменных источниках излучения с оптическими разрядами. Поэтому исследуемые в диссертации физические и гидродинамические явления

непосредственно влияют на работу реальных приборов с оптическим разрядами, и это повышает практическое значение результатов, полученных в диссертации.

В диссертации используются различные методы получения, визуализации и исследования потоков в условиях непрерывных и импульсно-периодических оптических разрядов. Использование непрерывного оптического разряда в качестве точечного источника излучения в теновом приборе является новым и дает дополнительные возможности для повышения пространственного и временного разрешения теневых изображений при скоростной съемке, что важно для изучения структуры исследуемых течений. В работе рассмотрены оптические методы изменения параметров фокусировки лазерного излучения для управления потоками, генерируемыми импульсно-периодическим разрядами в газах и жидкостях, а также использование резонансных акустических колебаний для стабилизации импульсно-периодического оптического разряда. То есть речь идет об элементах системы управления потоками, которая является сверхзадачей таких исследований. Активное использование автором методов математического моделирования в сочетании с экспериментом позволяет существенно улучшить анализ результатов и обосновать их достоверность.

Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения.

В первой главе проведен обзор научной литературы, относящейся к кругу вопросов диссертации, в частности о применениях оптических разрядов, в которых важна стабильность плазмы, и причинах, вызывающих нарушение стабильности и связанных с образованием газовых потоков. Непрерывный оптический разряд был впервые реализован в группе Н.А.Генералова в Институте проблем механики АН СССР и совершенно естественно, что исследования воздействия такого разряда проводятся в этом месте и сегодня. Разумеется, опыт работы с такими разрядами накоплен очень большой.

Во второй главе описаны методы получения оптических разрядов и экспериментальные установки для исследования потоков, их пульсаций, пространственной неоднородности, а также акустических эффектов в разрядном объеме.

В третьей главе приведены результаты исследования природы регулярных пульсаций конвективного факела непрерывного оптического разряда в ксеноне при различном давлении. В частности, установлена зависимость частоты пульсаций и размера конвективного факела от давления газа и показано, что сходная зависимость имеет место для конвективных явлений в ламинарных пламенах, что указывает на общую природу пульсаций. В качестве непосредственной причины пульсаций названо периодическое образование вихрей вследствие неустойчивости Кельвина-Гельмгольца, возникающей при резком расширении газа на входе в конвективный факел.

В четвертой главе исследуются гидродинамические явления, возникающие при импульсно-периодических разрядах вследствие генерации в разрядном объеме резонансных акустических колебаний при воздействии плазмы, пульсирующей с частотой повторения импульсов. Акустический резонанс возникает при частотах повторения импульсов, целым кратным которых являются частоты собственных акустических колебаний газа в разрядном объеме. В некоторых случаях частота возникающего резонансного колебания могла превышать частоту повторения импульсов в 8-10 раз. Поскольку резонансная частота зависит не только от геометрии разрядного объема, но и от температуры, резонанс мог возникать периодически и затухать, вызвав перераспределение газа в объеме и изменение его температуры. Возникновение акустических колебаний

большой амплитуды приводит к генерации акустических потоков. Было отмечено, что возникающие потоки в зависимости от направления и стабильности чаще всего нарушали, но в некоторых случаях, наоборот, стабилизировали оптический разряд.

В пятой главе исследовались направленные струйные течения, возникающие при импульсно-периодическом разряде, поддерживаемом излучением импульсно-периодического фемтосекундного лазера. Оптический разряд в сфокусированном луче фемтосекундного лазера возникал вследствие многофотонной ионизации газа в области фокальной перетяжки. При быстром выделении тепловой энергии за счет электрон-ионной рекомбинации сразу после импульса в области разряда возникало газодинамическое возмущение, при релаксации которого возникает направленный газовый поток, интенсивность и направление которого зависит от конфигурации области энерговыделения. То есть из-за указанных особенностей при достаточной стабильности характеристик лазерного излучения от импульса к импульсу при импульсно-периодическом воздействии возникает квазистационарный направленный поток, интенсивностью и направлением которого можно управлять, изменяя геометрию области разряда, например, за счет внесения небольшого искусственного астигматизма при фокусировке. В результате за счет небольших вариаций угла установки фокусирующего параболического зеркала удавалось в широких пределах менять направление генерируемых потоков – от перпендикулярного оптической оси лазерного излучения до соосного. Установлено, что поток газа из области разряда навстречу лазерному лучу, наблюдающийся при точной юстировке фокусирующего зеркала, является причиной фазовых искажений лазерного луча и нарушения стабильности плазмы оптического разряда.

В шестой главе исследовались лазерно-индуцированные потоки в жидкостях. Направлением и интенсивностью наблюдавшихся потоков также можно было управлять за счет внесения искусственного астигматизма при фокусировке. Картина наблюдаемых потоков усложнялась наличием эффекта самофокусировки при высокой интенсивности лазерного излучения. Тем не менее, можно утверждать, что и в случае жидкости причиной генерации направленных течений выступает динамический механизм схлопывания газового пузырька, в целом аналогичный релаксации области газодинамического расширения в случае газа.

В заключении сформулированы основные выводы диссертации.

Следует отметить **новые результаты**, полученные автором в диссертации.

1. Разработаны и созданы теневые приборы, использующие оптические разряды в качестве точечных источников широкополосного излучения высокой яркости.
2. Установлен закон подобия для частоты колебаний факела термогравитационной конвекции вокруг оптического разряда. Показано, что он совпадает с аналогичным законом для частоты пульсации ламинарных пламен, что указывает на общую гидродинамическую причину неустойчивости, как и соответствие результатов проведенного автором математического моделирования конвективных пульсаций и результатов экспериментов.
3. Впервые исследованы направленные потоки газа из зоны оптического разряда, создаваемого сфокусированным излучением импульсно-периодического фемтосекундного лазера. Показано, что интенсивностью и направлением газовых потоков можно эффективно управлять с помощью оптики, фокусирующей лазерное излучение.

4. Впервые наблюдались направленные потоки из зоны взаимодействия излучения импульсно-периодического фемтосекундного лазера с жидкостью. Вместе с различиями, связанными с эффектами самофокусировки излучения в жидкостях, показаны сходные черты потоков, образующихся под действием импульсно-периодического лазерного излучения в жидкостях и газах высокого давления, указывающие на сходство механизмов генерации потоков в рассмотренных случаях.
5. Впервые проведено исследование эффектов, связанных с возбуждением резонансных акустических колебаний в газовом объеме под действием импульсно-периодического оптического разряда. Показано, что акустические колебания могут приводить как к дестабилизации, так и к стабилизации разряда с подавлением конвективных пульсаций.

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

1. Уравнения (3.1)-(3.6) представляют собой очень упрощенные оценки. Они дают верную зависимость от параметров, но коэффициенты приходится получать из эксперимента. На самом деле, с точки зрения рецензента, можно было бы рассчитать и поподробнее, архимедову силу, влияние вязкости, изменение размеров в процессе нагрева и т.д. Из-за малых времен процессов многие оценки, наверное, были бы не очень трудными.

2. В численных решениях глав 3 и 4 хотелось бы видеть больше подробностей об используемых пакетах, уравнениях, методах решения. Численная часть работы существенно уступает экспериментальной в подробности описания, в «фундаментальности». Она выполнена фрагментарно - что-то написано достаточно подробно, что-то не написано совсем, что, безусловно, связано с использованием стандартных пакетов. Понятно, что данные расчетов сравнивались с экспериментальными результатами и из этого сравнения видно, что качественно и даже количественно результаты во многих случаях схожи, но более подробное описание было бы совершенно не лишним.

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

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 Лаврентьевым С.Ю. 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 Лаврентьев Сергей Юрьевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 (1.1.9) – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Отзыв составил

д.ф.-м.н., профессор кафедры молекулярных процессов и экстремальных состояний вещества физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова Уваров Александр Викторович, уч. звание профессор.

“22” ноября 2021 г.  А.В. Уваров

Адрес: 119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинские горы, д.1., стр.2. физический факультет МГУ, тел. 8(495)939-26-94, uvarov@phys.msu.ru

Декан физического факультета МГУ
профессор, д.ф.-м.н.





Н. Н. Сысоев

Адрес: 119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинские горы, д.1., стр.2. физический факультет МГУ, тел. +7(495)939-10-97, dean@phys.msu.ru

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», физический факультет, 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, физический факультет, +7 (495) 939-16-82, info@physics.msu.ru