

Отзыв

официального оппонента о диссертационной работе **Ефимова Александра Валерьевича** «Развитие методов комплексного спектрального анализа многокомпонентной движущейся плазмы импульсных разрядов», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы

Диссертационная работа А.В. Ефимова посвящена развитию комплекса спектральных и визуальных методов диагностики нестационарной пространственно-неоднородной плазмы сложного компонентного состава, и его реализации в экспериментальных исследованиях свойств и параметров импульсного капиллярного разряда с испаряющейся стенкой.

Актуальность диссертационной работы обусловлена необходимостью совершенствования традиционных спектроскопических методов диагностики плазмы и внедрения новых высокопроизводительных технологий регистрации и обработки данных. Необходимость в развитии спектроскопических методов особенно остро проявляется в задачах диагностики движущейся пространственно-неоднородной и нестационарной плазмы импульсных разрядов, к которым можно отнести капиллярный разряд с испаряющейся стенкой. Проблемы физики плазмы газового разряда в последние годы вновь привлекают повышенный интерес исследователей. Это связано, с одной стороны, с большим многообразием и сложностью явлений, протекающих в низкотемпературной плазме, а также их недостаточной изученностью, с другой стороны – с их важным практическим применением в различных плазменных технологиях. Плазменные технологии широко используются в различных плазмохимических реакторах, разрабатываемых для получения новых наноматериалов, модификации свойств поверхности, нанесения защитных и упрочняющих покрытий. Капиллярный разряд рассматривается как высокоинтенсивный источник излучения в ультрафиолетовом и оптическом диапазоне, источник неидеальной плазмы, в качестве плазменных антенн и волноводов для транспортировки лазерного импульса высокой мощности, как источник высокоскоростных плазменных струй, используемых для управления параметрами набегающего потока, для снижения аэродинамического сопротивления летательного аппарата, организации воспламенения топливно-воздушных смесей в высокоскоростных потоках.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы.

Во **введении** обоснована актуальность темы исследований. Сформулирована цель и кратко изложена структура диссертации.

В **первой главе** дан обзор литературы по спектроскопическим исследованиям эрозионной плазменной струи. Проанализированы работы, в которых наряду с изучением динамики и структуры плазменной струи, генерируемой эрозионным разрядом в капилляре, проводились измерения пространственно-временной эволюции температуры плазмы и концентрация электронов с помощью спектроскопических и зондовых методов, а также при использовании микроволновой и лазерной интерферометрии.

Во **второй главе** диссертации приводится описание экспериментальной установки и диагностического комплекса, с помощью которого исследовалась эрозионная плазма. Объект диагностики представляет собой быстроменяющееся плазменное пространственно-неоднородное образование с многокомпонентным составом. Для диагностики таких сложных нестационарных объектов диссертантом использовались высокоскоростные видеокамеры и цифровые спектрографы, обеспечивающие измерение параметров с высоким пространственно-временным и спектральным разрешением. Подробно описана автоматизированная система сбора и обработки спектроскопических данных. Представлены также спектры излучения эрозионной плазменной струи в дозвуковом и сверхзвуковом режимах истечения.

Третья глава диссертации посвящена описанию методов определения параметров плазмы. Рассмотрены модели состояния плазмы и метод определения локальных характеристик из измеряемых интегральных значений при помощи компьютерной томографии плазмы. Подробно описаны методики определения концентрации и температуры электронов и атомов, а также метод моделирования спектра двухатомных молекул. Проведен анализ состава плазменной струи, генерируемой капиллярным разрядом с испаряющейся стенкой.

В **четвертой главе** описаны экспериментальные результаты, полученные с использованием созданного комплекса спектральной диагностики эрозионной плазмы капиллярного разряда. Представлены данные о пространственно-временных распределениях температуры и концентрации электронов в дозвуковом и сверхзвуковом режимах истечения плазменной струи.

В **Заключении** сформулированы основные результаты, полученные в диссертации.

Научная значимость работы заключается в следующем:

- создан программный комплекс для автоматизированной обработки экспериментальных данных с целью получения пространственно-временных

- распределений параметров плазмы и основных свойств эрозионной струи капиллярного разряда;
- исследована пространственно-временная эволюция эрозионных разрядов и получены новые представления о многослойной структуре и динамике развития плазменной эрозионной струи;
 - выполнено моделирование спектра излучения молекулы AlO , позволившее оценить колебательную T_v и вращательную T_r температуры молекул в плазме на периферии струи, а также в релаксационной плазме в период после окончания подвода энергии;
 - получен комплекс экспериментальных данных о пространственно-временных изменениях основных излучательных свойств эрозионной струи, а также её плазменных параметрах в диапазоне удельного энерговыделения $2.5-35 \text{ МВт/см}^3$, который охватывает как дозвуковой, так и сверхзвуковой режимы истечения струи.

Основные научные положения, выносимые на защиту, соответствуют выбранной теме и подробно обоснованы в диссертации. Результаты работы являются новыми, представляют значительный научный и практический интерес, в полной мере опубликованы в научных журналах и трудах конференций.

Представленные в диссертации результаты являются полезными для широкого круга исследователей и могут быть использованы в различных институтах: МРТИ РАН (г. Москва), ИНХС РАН (г. Москва), ИОФ РАН (г. Москва), ИПФ РАН (г. Нижний Новгород), МФТИ (г. Москва), МГУ имени М.В. Ломоносова (г. Москва), ОИВТ РАН (г. Москва).

Диссертация Ефимова Александра Валерьевича является законченным научным исследованием, выполнена на достаточно высоком уровне, полученные им основные результаты являются надежными, достоверность их подтверждается сравнением с экспериментальными результатами российских авторов.

Тем не менее, считаю необходимым указать на определенные недостатки работы.

1. Хорошо известно, что общий вид, динамика развития и параметры плазменной струи капиллярного разряда с испаряющейся стенкой сильно изменяются от пуска к пуску. Это связано с разрушением стенок капилляра, его диаметр увеличивается, что приводит к изменению начальных условий реализации разряда. При этом первый пуск, как правило, плохой. В течение первого пуска эрозионная струя либо вообще не реализуется, либо не удастся получить нормальную плазменную струю со стабильными параметрами. При малых энерговыделениях в экспериментах с одним капилляром удастся реализовать не больше 6-7 пусков, после этого необходимо заменять капилляр. С увеличением энерговыделения число нормальных пусков

уменьшается. В тексте диссертации не упоминается, в течение какой реализации проводились основные измерения. В диссертации следовало бы представить зависимость исследуемых параметров плазменной струи от номера пуска, а также усредненные значения за несколько реализаций.

2. В диссертации получен большой объем экспериментальных данных о пространственно-временной эволюции температуры и концентрации электронов в плазме эрозионной струи, истекающей в затопленное пространство в дозвуковом и сверхзвуковом режимах. Однако, кроме констатации того факта (смотри, например, стр. 128-129), что концентрация электронов изменяется в продольном направлении по экспоненциальному закону с различными постоянными спада n_e (внутри капилляра медленно, а вдоль начального участка струи быстрее), в тексте диссертации не обсуждается физический механизм, объясняющий полученный результат. Это же замечание относится и к данным по продольному распределению температуры электронов.
3. В режиме дозвукового истечения эрозионной струи на стр. 118-120 представлены данные о продольном распределении температуры электронов, полученные различными методами. Температура электронов, измеренная по относительным интенсивностям линий атомов меди, изменяется в диапазоне 0.9-0.6 эВ. Температура электронов, определенная по относительной интенсивности атомарной и ионной линиям меди, изменяется в диапазоне 1.1-1.3 эВ. Использование для измерения линий бальмеровской серии водорода дает значение для температуры электронов 0.7-1.0 эВ. В тексте на стр. 122 приводится значение температуры электронов на начальном участке струи и внутри капилляра, равное 1.7 эВ (смотри также рис. 4.1.2.2). Следовало бы подробно описать возможность применения данных методов для определения температуры электронов, так как при использованной в работе модели локального термодинамического равновесия температура электронов, измеренная по различным компонентам, должна иметь одно и то же значение.
4. На стр. 135 автор утверждает, что «... в периферийной зоне температура плазмы существенно ниже температуры приосевой зоны...». Можно использовать понятие «температура плазмы» только для системы, находящейся в термодинамическом равновесии или локальном термодинамическом равновесии. Неправомерно применять понятие температура плазмы для неравновесной системы, которая характеризуется различными температурами (электронной, колебательной, вращательной и др.).

Приведенные замечания не снижают в целом хорошего впечатления от рассматриваемой работы и ее научной ценности.

Обоснованность и достоверность использованных экспериментальных методов подтверждается физической обоснованностью постановки задачи, сравнением собственных экспериментальных результатов с данными других авторов, а также соответствием расчетных и экспериментальных данных. Основные результаты диссертации в полной мере опубликованы в научных журналах из списка ВАК и сборниках трудов конференций по профилю работы.

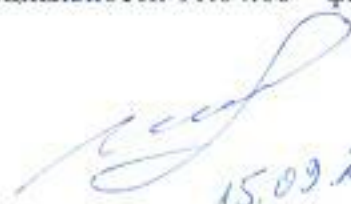
Тема диссертационной работы А.В. Ефимова соответствует специальности 01.04.08 – физика плазмы.

Автореферат правильно и полно отражает основное содержание диссертации.

Диссертация написана на понятном языке с использованием общепринятой терминологии. Основные положения, выносимые на защиту, соответствуют выбранной теме и подробно обоснованы в диссертации. Достоверность результатов обеспечивается использованием совокупности независимых спектроскопических методик. Экспериментальные данные получены при помощи современных измерительных средств, обеспечивающих необходимое пространственно-временное и спектральное разрешение. Квалификационная ценность результатов исследований признана научным сообществом. Полученные в диссертации результаты являются новыми, а выводы – обоснованными.

Считаю, что рецензируемая диссертационная работа «Развитие методов комплексного спектрального анализа многокомпонентной движущейся плазмы импульсных разрядов» представляет собой законченную научно-исследовательскую работу на актуальную тему. Работа соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатской диссертации, установленным в п. 9 действующего Положения о присуждении ученых степеней № 842 от 24 сентября 2013 г., а ее автор Ефимов Александр Валерьевич, несомненно, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

Профессор физического факультета
МГУ имени М.В. Ломоносова,
доктор физико-математических наук



15.09.2017

В.М. Шибков

Рабочий адрес: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, физический факультет МГУ.
Рабочий телефон: (495)939-13-37 или (495)939-25-47.
E-mail: shibkov@phys.msu.ru

Подпись В.М. Шибкова удостоверяю.

Декан
физического факультета МГУ
профессор



Н.Н. Сысоев