

На правах рукописи

Ефимов Александр Валерьевич

**РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ КОМПЛЕКСНОГО СПЕКТРАЛЬНОГО
АНАЛИЗА МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ ДВИЖУЩЕЙСЯ ПЛАЗМЫ
ИМПУЛЬСНЫХ РАЗРЯДОВ**

Специальность 01.04.08 – физика плазмы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2017

Работа выполнена в лаборатории «Оптическая спектроскопия» Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Объединенный институт высоких температур Российской академии наук» (ОИВТ РАН)

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории «Оптическая спектроскопия» Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Объединенный институт высоких температур Российской академии наук» (ОИВТ РАН)
Чиннов Валерий Федорович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией «Плазмохимия и физикохимия импульсных процессов» Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт нефтехимического синтеза им. А.В.Топчиева Российской академии наук» (ИНХС РАН)
Лебедев Юрий Анатольевич

доктор физико-математических наук, профессор Физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»
Шибков Валерий Михайлович

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Физический институт им. П.Н.Лебедева Российской академии наук» (ФИАН)

Защита диссертации состоится 04 октября 2017 года в 11 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 002.110.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Объединенный институт высоких температур Российской академии наук» по адресу: 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИВТ РАН и на сайте <http://jiht.ru/> в разделе «Диссертационный совет».

Отзывы по данной работе в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2, диссертационный совет Д 002.110.02.

Автореферат разослан «___» _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.110.02,
кандидат физ.-мат. наук



М.М. Васильев

Общая характеристика работы

Актуальность

При экспериментальном изучении сложных плазменных объектов возникает необходимость в совершенствовании традиционных методов и внедрении новых высокопроизводительных технологий регистрации и обработки данных. Особенно остро эта необходимость проявляется в задачах диагностики движущейся пространственно неоднородной и нестационарной плазмы импульсных разрядов сложного состава, в которых важную роль приобретает интерпретация получаемых результатов, требующая учета специфики условий эксперимента.

Объектом исследований настоящей работы является многокомпонентная плазма импульсного капиллярного разряда с аблирующей стенкой. Капиллярный разряд представляет интерес для многих практических приложений. Он рассматривается как высокоинтенсивный источник излучения в УФ и оптическом диапазоне, источник неидеальной плазмы [1]. Капиллярный разряд изучается в связи с проблемами создания двигателей космических летательных аппаратов [2] и сильноточных прерывателей электрических цепей. В последнее время интерес к капиллярному разряду проявляется в связи с проблемой транспортировки лазерного импульса высокой мощности ($\sim 5 \cdot 10^{16}$ Вт/см²), где разряд в капилляре рассматривается в качестве лазерного волновода [3]. В приложениях магнитоплазменной аэродинамики импульсный разряд в капилляре с аблирующей стенкой представляет интерес как источник высокоскоростных плазменных струй, используемых для управления параметрами набегающего потока, снижения аэродинамического сопротивления ЛА, организации поджига и стимулированного горения топливо-воздушных смесей в высокоскоростных потоках [4], в качестве плазменных антенн [5], плазменных абсорберов электромагнитного излучения СВЧ диапазона и др.

Несмотря на достаточно большое, в целом, количество работ, посвященных изучению свойств плазменных эрозионных струй, объем экспериментальных данных, полученных на основе методов спектральной диагностики, весьма ограничен. Наиболее детальные спектроскопические исследования плазменных струй, инжектируемых в атмосферу воздуха при нормальных условиях, были проведены в начале 1990-х годов группами исследователей НИИРП, НИИТП [6], МГУ [7] и МИФИ [8]. В результате исследований идентифицированы основные излучающие компоненты, получены сведения о стадиях и динамике развития струи, выявлены масштабы её структурной неоднородности, получены профили электронной концентрации и температуры плазмы в продольном и поперечном сечениях. В то же время, выявлено несоответствие измеренных значений

концентрации электронов $n_e > 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и температуры $T \sim 0.4-0.6 \text{ эВ}$. Полученное несоответствие могло быть следствием неполноты данных о состоянии плазмы и пространственной принадлежности спектральных компонентов, интенсивность излучения которых зависит от температуры, парциального давления компонентов и может изменяться немонотонно в радиальном и осевом направлениях. Кроме того, трудности получения надежных экспериментальных данных об основных параметрах плазмы капиллярного разряда (концентрации и температуры электронов, температуры тяжелой компоненты) во многом обусловлены ограниченными возможностями существовавших на тот момент времени регистрирующей аппаратуры и средств обработки результатов эксперимента.

Развиваемые в настоящей работе методы спектральной диагностики основаны на использовании современной высокопроизводительной регистрирующей аппаратуры, обеспечивающей высокое пространственное (25-30 мкм) и временное разрешение (10-50 мкс) в оптическом диапазоне длин волн ($\Delta\lambda = 200\div 800 \text{ нм}$, $\delta\lambda = 0.1 \text{ нм}$). Выбор наиболее надежных методов определения основных параметров плазмы (электронной концентрации, характеристических температур) производится на основе критического анализа термодинамического состояния плазмы, установления пространственной принадлежности спектральных компонентов, сопоставления альтернативных методов определения того или иного параметра, и использования, в случае необходимости, упрощенной модели расчета ее компонентного состава. Для обработки результатов измерений разработаны специализированные программные комплексы автоматизированной обработки данных с использованием средств малоракурсной томографии, обеспечивающие возможность детализации структуры и получения профилей основных параметров эрозийной плазмы.

Цели

Целью работы является развитие комплекса спектральных и визуальных методов диагностики нестационарной пространственно-неоднородной плазмы сложного компонентного состава и его реализация в экспериментальных исследованиях свойств и параметров импульсного капиллярного разряда.

В основные задачи входит:

- Разработка и организация системы синхронизированных визуальных наблюдений и спектральных измерений параметров неоднородного и нестационарного плазменного объекта с характерными размерами радиуса и длины 1.5 x 50 мм, существующего в течение разрядного импульса длительностью 1÷20 мс;

- Создание программного комплекса для автоматизированной обработки экспериментальных данных с целью получения пространственно-временных распределений концентрации и температуры электронов и температуры тяжёлых частиц плазмы исследуемого разряда;
- Получение комплексных данных о пространственно-временных изменениях основных излучательных свойств эрозионной струи и её плазменных параметров в диапазоне удельных энергокладов $2.5 \div 35$ МВт/см³, который охватывает как дозвуковой, так и сверхзвуковой режимы истечения струи;
- Анализ, на основе выполненных измерений, параметров состояния (температуры, давления, степени ионизации) плазмы в формируемой разрядом дозвуковой и сверхзвуковой эрозионной струе, с использованием упрощенной модели расчёта её компонентного состава.

Научная новизна работы

- Благодаря реализации совместной и синхронизированной работы высокоскоростных камер и быстродействующего спектроскопического оборудования исследована пространственно-временная эволюция эрозионных разрядов и получены новые представления о многослойной структуре и динамике развития плазменной эрозионной струи;
- Создан универсальный программный комплекс, средствами автоматизированной обработки спектров устанавливающий пространственные распределения концентрации n_e и температуры T_e электронов плазмы эрозионного разряда. В результате впервые получены надёжные и непротиворечивые данные о продольном и радиальном распределениях n_e и T_e в дозвуковом ($2.5 \div 5$ МВт/см³) и сверхзвуковом ($10 \div 35$ МВт/см³) режимах истечения. Выполнено сравнение полученных распределений n_e и T_e с результатом экспериментальной оценки колебательной T_v и вращательной T_r температур молекул C_2 и CN плазменной струи;
- Использование развитых методов однокурсной томографии (для анализа радиальных распределений основных излучателей плазмы) и результатов расчёта равновесного состава смеси $H:C:O:Si$ позволило выявить картину радиального распределения основных параметров (температуры и давления) сверхзвуковой эрозионной струи в области диска Маха, где особенно велика роль неизобаричности сверхзвукового течения;

- Выполнено моделирование спектра излучения молекулы AlO (переход $B^2\Sigma^+ - X^2\Sigma^+$), позволившее оценить колебательную T_v и вращательную T_r температуры молекул в плазме на периферии струи и в дуге вблизи катода (внешний электрод), а также в релаксационной плазме в период после окончания подвода энергии. Результаты определения T_v , T_r в период послесвечения проанализированы совместно с данными о температуре частиц T , полученными при помощи метода спектральной пирометрии.

Научные положения, выносимые на защиту

- Методы и результаты получения пространственно-временных профилей излучательных характеристик основных плазменных компонент в протяженных нестационарных плазменных струях, формируемых разрядом в $C_5H_8O_2$ капилляре с характерными размерами 1×5 мм в диапазонах удельного энерговклада $2.5 \div 35$ МВт/см³ и длительности разрядного импульса $1 \div 20$ мс;
- Программный комплекс, включающий в себя процедуры идентификации спектральных линий, локализации экспериментальных данных с использованием средств компьютерной томографии, определения концентрации и температуры электронов n_e и T_e на основе совокупных данных о наблюдаемых спектральных компонентах, оценки T_v , T_r на основе моделирования спектра излучения двухатомной молекулы AlO (переход $B^2\Sigma^+ - X^2\Sigma^+$);
- Пространственные распределения n_e , T_e плазмы приосевой области струи, формируемой разрядом в $C_5H_8O_2$ капилляре в диапазоне удельных энерговкладов $2.5 \div 5$ МВт/см³, соответствующих дозвуковому режиму истечения, находятся в качественном и количественном согласии с результатами, полученными для стационарной водородной дуги атмосферного давления при близких значениях разрядного тока и размерах канала разряда [9];
- Пространственные распределения n_e , T_e плазмы приосевой области струи, формируемой разрядом в $C_5H_8O_2$ капилляре в диапазоне удельных энерговкладов $10 \div 35$ МВт/см³, отличающиеся высокой пространственной неоднородностью, находятся в качественном согласии с результатами, полученными для стационарных сверхзвуковых плазменных струй [10];
- Экспериментальная оценка значений колебательной и вращательной температур T_v , T_r двухатомных молекул (C_2 , CN и AlO) плазменной оболочки струи в

диапазоне удельных энергокладов $2.5 \div 35$ МВт/см³ и их сравнение с измеренными локальными значениями n_e , T_e , указывающее на значительную неизотермичность плазмы. Экспериментальная оценка значений T_v , T_r релаксационной плазмы в период после окончания разрядного импульса, составивших 3000К;

- Метод совместного использования «нормальных» температур (основных излучателей) и модельной оценки состава многокомпонентной плазменной среды и получение с его помощью радиальных распределений давления и температуры плазмы в области вблизи диска Маха, характеризующейся сильной неизобаричностью и пространственной неоднородностью.

Научная и практическая значимость

Критически отобраны и экспериментально реализованы методы комплексной диагностики пространственно неоднородной неизобарической плазмы сложного состава. Получены самосогласованные данные о пространственно-временных распределениях основных параметров эрозионного разряда, позволяющие развивать теоретические модели его описания.

Развитые в работе методы комплексного спектрального анализа нестационарных плазменных объектов с использованием средств автоматизации и малоракурсной томографии, а также программные комплексы и методики обработки экспериментальных результатов находят применение в работах, проводимых по плану НИР ОИВТ РАН, а также по ряду проектов и договоров.

Степень достоверности

Экспериментальные данные получены при помощи современных измерительных средств, обеспечивающих необходимое пространственно-временное и спектральное разрешение. Достоверность результатов анализа обеспечивается путём использования совокупности развитых в плазменной диагностике независимых спектроскопических методик и модельных описаний, и критического анализа границ их применимости.

Личный вклад автора

Автор принимал участие в постановке, подготовке, проведении экспериментальных исследований, анализе и обсуждении полученных результатов. При этом основной вклад автора в проводимых исследованиях заключается в метрологическом сопровождении плазменных экспериментов и решении комплекса вопросов, связанных с выбором,

обоснованием и реализацией методов спектральной диагностики и обработкой экспериментальных результатов. Все результаты, изложенные в диссертации, получены автором лично, либо при его определяющем личном участии. Представление результатов, полученных в совместных исследованиях, согласовано с соавторами.

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 9 работ. Работы 1 – 5 нижеследующего списка опубликованы в журналах из Перечня рецензируемых научных изданий ВАК при Министерстве образования и науки РФ. Работы 6 – 9 опубликованы в материалах конференций.

- 1) А.С. Пашина, А.В. Ефимов, В.Ф. Чиннов. Оптические исследования многокомпонентной плазмы капиллярного разряда. Дозвуковой режим истечения// ТВТ, 2016, том 54, № 4, с. 513–528.
- 2) А.С. Пашина, А.В. Ефимов, В.Ф. Чиннов. Оптические исследования многокомпонентной плазмы капиллярного разряда. II. Сверхзвуковой режим истечения// ТВТ, 2017, том 55, № 5.
- 3) А.С. Пашина, А.В. Ефимов, В.Ф. Чиннов, А.Г. Агеев. Особенности радиального распределения параметров плазмы начального участка сверхзвуковой струи, формируемой импульсным капиллярным разрядом// Прикладная физика, 2016, № 2, с. 29-35.
- 4) Битюрин В.А., Григоренко А.В., Ефимов А.В., Климов А.И., Коршунов О.В., Кутузов Д.С., Чиннов В.Ф. Спектральный и кинетический анализ газоразрядной гетерогенной плазмы в потоке смеси AL, H₂O, AR //ТВТ, 2014 ,52 ,1 ,с. 3-13.
- 5) Т.Ш. Белялетдинов, С.В. Горячев, А.В. Ефимов, Э.Х. Исакаев, В.Ф. Чиннов. Спектральное определение локальных значений концентрации и температуры электронов в сильно-ионизованной азотной плазме с использованием ПЗС – матриц//Оптика и спектроскопия, 2010, том 109, № 5, с. 721–727.
- 6) Pashchina A.S., Klimov A.I.,Efimov A.V.. Influence of Nano-Scale Clusters on Gas Dynamics Parameters of Plasma Jet Created by Capillary Type Discharge (AIAA 2014-0517). 52nd Aerospace Sciences Meeting, 2014, p.1-11.
- 7) A.G. Ageev, V.A. Bityurin, V.F. Chinnov, A.V. Efimov and A.S. Pashchina. Features of spatial distribution of the parameters on the initial section of a supersonic plasma jet,

created by pulsed discharge in a capillary with ablative wall// Journal of Physics: Conference Series, Volume 774, Number 1.

- 8) Pashchina A.S., Chinnov V.F., Andriyanova Y.N., Efimov A.V. The Space-Time Spectroscopy of the Pulsed High Enthalpy Plasma Jet// Physics of Extreme States of Matter. Moscow, 2014, P. 176-178.
- 9) Chinnov V., Efimov A., Goryachev S., Pashchina A. The Space-Time Spectroscopy of Pulse Heterogeneous Plasma Jet// 31st ICPIG, Granada, Spain, July 14-19, 2013, 6, PS2-040.

Апробация работы

Результаты работы докладывались и обсуждались на 11 международных конференциях:

1. 15th International Workshop on Magneto-Plasma Aerodynamics, Moscow, ИИТ RAS, April 19-21, 2016;
2. XLIII Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, 8 – 12 февраля 2016;
3. 14th International Workshop on Magneto-Plasma Aerodynamics, April 21-23, 2015 / ed. Bityurin V. Moscow, Russia: ИИТ RAS, 2015;
4. XLII Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, 2015;
5. 13th International Workshop on Magneto-Plasma Aerodynamics, April 8-10, 2014;
6. 52nd Aerosp. Sci. Meet. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2014;
7. XXIX International Conference on Equations of State for Matter. Russia, Elbrus, Kabardino-Balkaria, 2014;
8. XLI Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, 10 – 14 февраля 2014;
9. 12th International Workshop on Magneto-Plasma Aerodynamics. Moscow, ИИТ RAS, March 24-26, 2013;
10. 31st ICPIG, July 14-19, 2013, Granada, Spain.;
11. The 11th International Workshop on Magneto-Plasma Aerodynamics, 2012.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, включающего 118 наименований. Объем диссертации составляет 144 страницы, включая 82 рисунка и 20 таблиц.

Краткое содержание работы

Во введении приводится краткая характеристика диссертационной работы, обоснована актуальность темы и сформулированы её цели и задачи. Указана научная новизна и практическая ценность работы, а также положения, выносимые на защиту.

В первой главе приводится обзор литературы по теме диссертационной работы. Отмечается, что на данный момент отсутствуют комплексные и непротиворечивые данные об основных параметрах исследуемой плазмы.

Вторая глава посвящена описанию экспериментальной установки, средств измерения и представлению характерных для исследуемой плазмы спектров излучения.

В первом разделе главы приводится описание принципиальной конструктивной и электрической схем инициирования разряда в капилляре с аблирующей стенкой (Рис. 1).

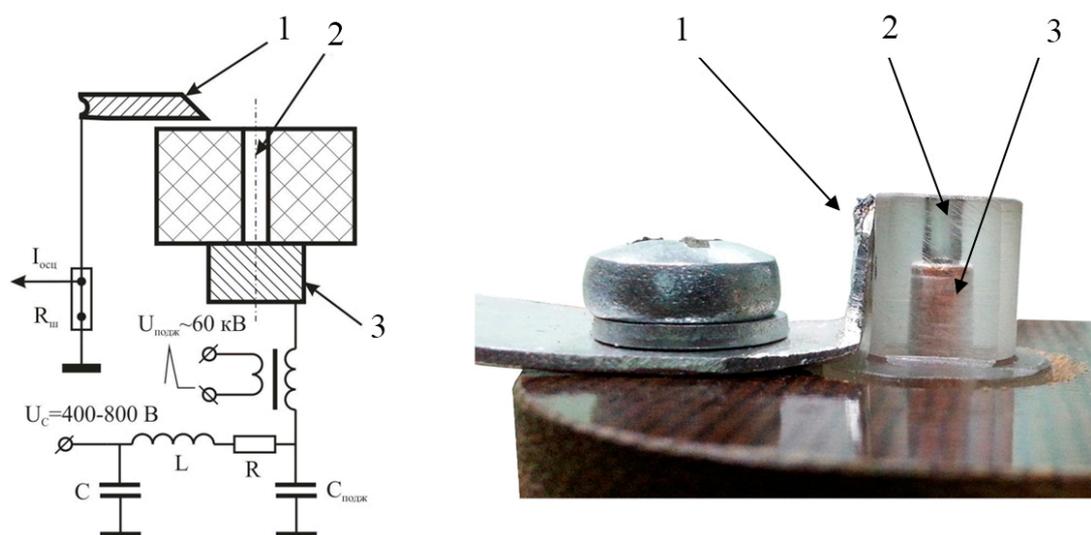


Рис. 1 Принципиальная электрическая и конструктивная схемы эрозионного разрядника: 1 – наружный электрод (Al); 2 – капилляр ($C_5H_8O_2$); 3 – внутренний электрод (Cu);

Разряд зажигается между двумя электродами, один из которых (как правило, анод) плотно установлен на входе капилляра, а второй (как правило, катод) размещается в плоскости среза капилляра примерно на расстоянии 3-5 мм от его оси. Мощность разрядного импульса, определяющая дозвуковой или сверхзвуковой режим истечения плазменной струи, устанавливалась выбором времязадающей индуктивности, последовательно включенной в цепь разрядника. Особенности данной экспериментальной установки являются малый масштаб (размеры капилляра — 1 x 5 мм) и короткая длительность разрядного импульса ($t_{дз} = 10 \div 20$ мс, $t_{сз} = 1 \div 2$ мс).

Во втором разделе приводится описание комплекса спектральной и высокоскоростной визуальной регистрации данных, созданного для диагностики пространственно-неоднородных мелкомасштабных нестационарных плазменных объектов (Рис. 2).

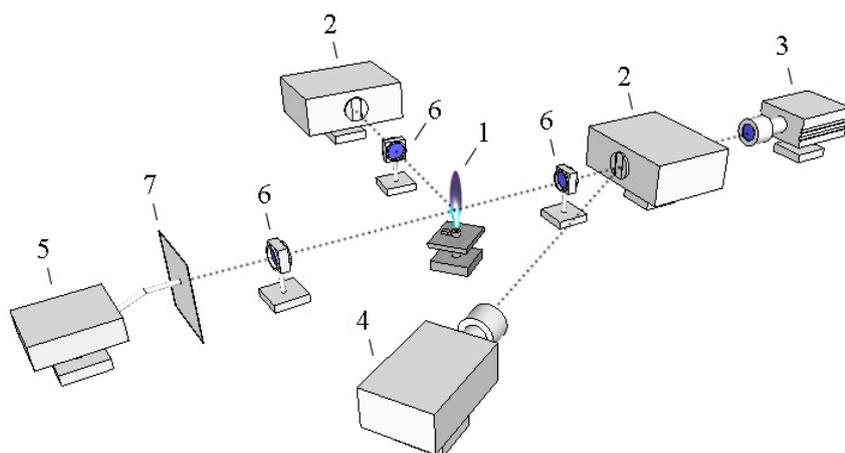


Рис. 2 Система оптических измерений параметров эрозионной плазменной струи:

1 – исследуемый объект, 2 – спектрограф Oriel MS-257, 3 – камера Andor/Andor iStar DH720/VS Fast, 4 – камера MotionPro, 5 – спектрограф AvaSpec 2048, 6 – кварцевая линза, 7 – экран с масштабной сеткой.

В системе автоматизированного сбора данных одновременная покадровая регистрация включает в себя:

а) видеосъемку камерой Motion Pro (частота кадров до $2 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$) входной щели ($\delta=20\text{мкм}$) спектрометра MS-257, на которую проектируется резкое изображение плазменного факела в масштабе 1:3 (в альтернативном варианте камера Motion Pro регистрирует изображение струи);

б) регистрацию спектра излучения ядра струи с помощью многоканального оптоволоконного спектрометра AvaSpec-UL2048 в диапазоне длин волн $250\div 800\text{нм}$ (длительность экспозиции – 2 мс);

в) видеосъемку камерой Video Sprint (частота кадров до $10^4 \cdot \text{с}^{-1}$, 1248×1024 пикселя, пиксель $8 \times 8 \text{ мкм}$) пространственно-разрешенного спектра излучения плазмы, изображение которого формируется в выходной фокальной плоскости спектрометра MS-257,

г) однокадровую регистрацию камерой Andor/Andor iStar DH720, размещенной в выходной фокальной плоскости спектрометра MS-257, пространственно-разрешенного ($30\text{-}50 \text{ мкм}$) спектра излучения плазмы, позволяющего получить изображение с короткой экспозицией кадра ($10\text{-}50 \text{ мкс}$) в выбранный момент времени (Рис. 3).

Синхронизация работы спектрометра и видеокамер относительно начала разрядного импульса осуществлялась с помощью генератора импульсов Г5-56.

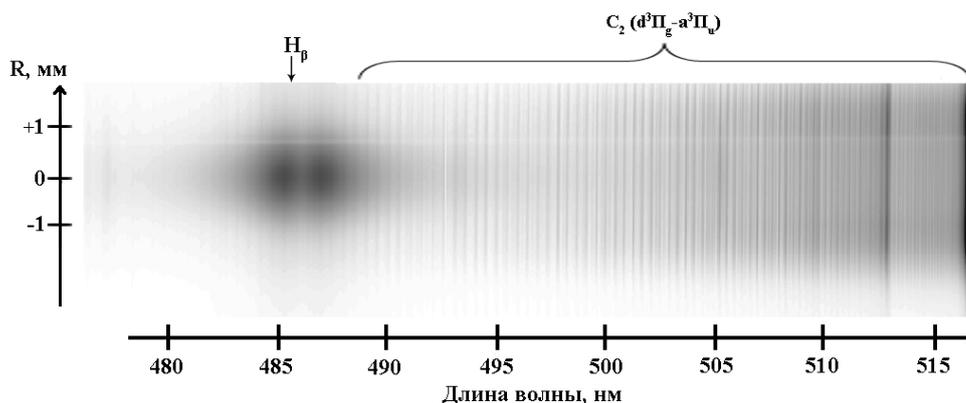


Рис. 3 Пространственно-разрешённый спектр плазменной струи в дозвуковом режиме истечения

В третьем разделе второй главы приводятся спектры излучения плазмы капилляра и формируемой струи. Показаны отличительные особенности спектров при различных значениях мощности энерговыклада, момента времени и координаты регистрации. Расшифрованные спектры плазменной струи при дозвуковом и сверхзвуковом режимах истечения, зарегистрированные в момент максимальной величины энерговыклада, представлены на Рис. 4.

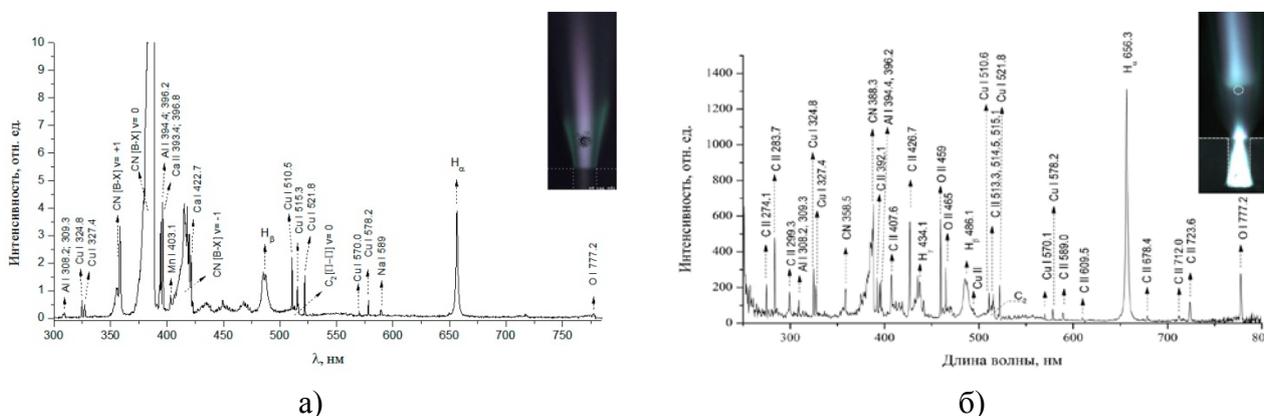


Рис. 4 Спектр излучения на начальном участке струи ($h=3.5$ мм вверх от границы капилляра). Режим истечения струи: дозвук (а) и сверхзвук (б). На цветных вставках светлым кружком показаны области регистрации спектров а) и б)

В третьей главе обосновывается выбор методов спектральной диагностики эрозивной плазмы. Результаты оценок состояния плазмы, выполненных в первом разделе главы, приводят к необходимости индивидуального выбора методов и объектов спектральной диагностики для разных областей неоднородного объекта. Задача перехода к

локальным коэффициентам эмиссии излучающих плазменных компонент решается процедурой, основанной на использовании методов компьютерной томографии плазмы [11]. В соответствующем разделе главы излагаются особенности применения данной процедуры в характерных для исследуемой плазменной струи условиях.

Далее рассматриваются методы измерения концентрации электронов n_e , основанные на использовании линейного эффекта Штарка применительно к наблюдаемым бальмеровским линиям H_α и H_β [12]. Один из методов реализован в виде программного комплекса автоматической обработки массива регистрируемых данных, позволяющего анализировать пространственно-временные распределения n_e . Пример профиля зарегистрированной линии H_β и принцип установления её полуширины отображены на Рис. 5.

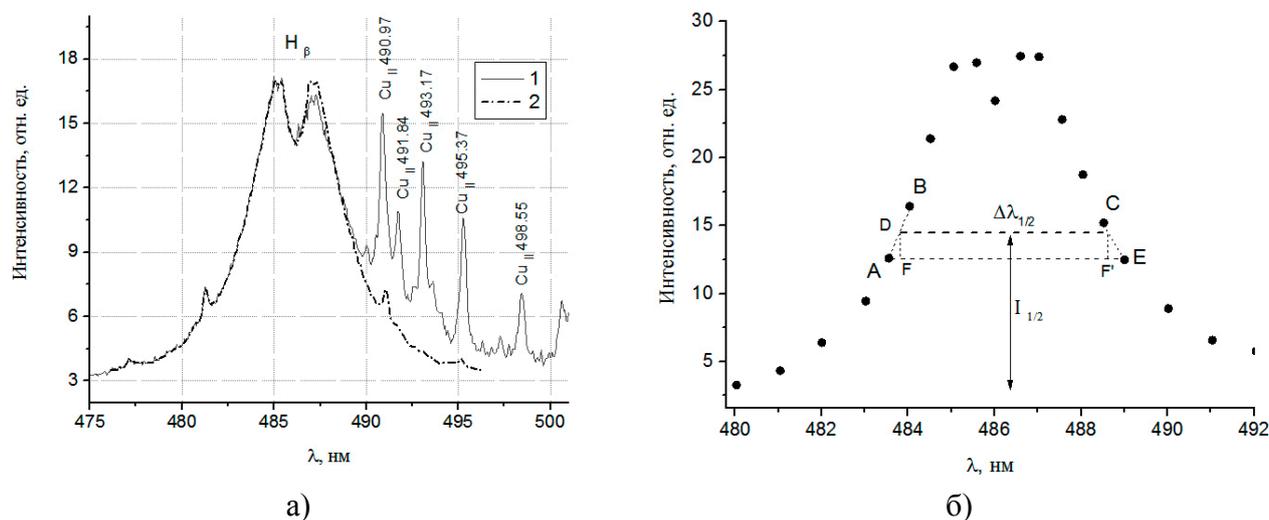


Рис. 5 (а) Зарегистрированный профиль спектральной линии H_β в сверхзвуковом режиме истечения, 10 мм над капилляром: 1 - изначальный вид спектра, 2 – симметризация контура; (б) процедура установления полуширины (FF') линии

В четвёртом разделе главы рассматриваются методы измерения температуры электронов T_e , основанные на экспериментальном определении относительных заселенностей возбуждённых состояний излучающих частиц данного сорта с отличающимися энергиями возбуждения [13]. Объясняются особенности работы алгоритма в программном комплексе автоматической обработки массива регистрируемых данных, позволяющем анализировать пространственные распределения T_e . Рис. 6 (а) отображает короткий участок спектра, в котором разница энергий возбуждения наблюдаемых линий $C II$ $\Delta E > 6$ эВ и превышает, таким образом, ожидаемую величину T_e . На Рис. 6 (б) демонстрируется результат использования метода «большмановской экспоненты», применяемого для определения T_e на начальном участке плазменной струи.

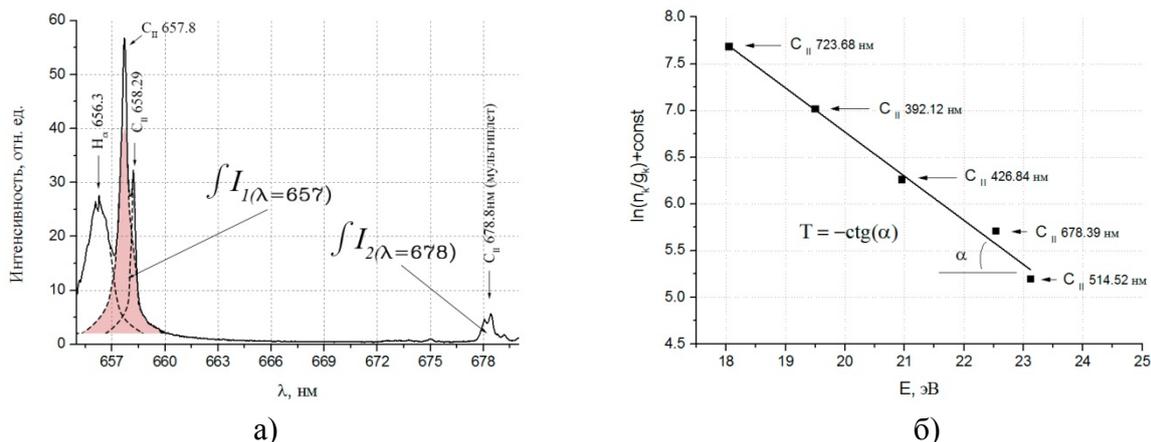


Рис. 6 (а) Спектр плазменной струи с линиями ионов углерода в области 655÷680 нм и (б) «больцмановская экспонента» заселённостей ионов углерода в сверхзвуковом режиме истечения струи ($T_e = 2.12 \pm 0.34$ эВ, $h = 2$ мм)

В табл. 1 приведены данные о линиях и мультиплетах иона C_{II} , используемые для построения «больцмановской экспоненты» и нахождения электронной температуры.

Используемые линии, нм	Эффективная длина волны, нм	A, c^{-1}	$E, \text{эВ}$	g
392.07; 391.90	392.12	1.91E+08	19.49	2
426.73; 426.73; 426.70	426.84	2.38E+08	20.95	14
514.52	514.52	6.49E+07	23.12	6
657.81	657.81	3.67E+07	16.33	4
678.72, 681.23, 679.81, 677.99, 678.06, 680.07, 678.39	678.78	3.65E+07	22.53	20
723.72; 723.64; 723.13	723.68	4.18E+07	18.05	10

В завершении раздела проводится анализ возможных причин расхождений в результатах определения T_e при использовании различных спектральных компонент и способов регистрации данных для исследуемой плазменной струи.

Следующий раздел посвящён моделированию электронно-колебательно-вращательного спектра излучения молекулы AlO (переход $B^2\Sigma^+ - X^2\Sigma^+$). Созданная модель позволяет проводить оценку колебательной T_v и вращательной T_r температур [14,15] молекул периферийной зоны плазменной струи, и ее результаты сопоставлены с результатами известных моделей для наблюдаемых полос C_2 ($d^3\Pi_g - a^3\Pi_u$) и CN ($B^2\Sigma^+ - X^2\Sigma^+$).

Также модельный спектр АЮ используется для оценки T_v , T_r в период релаксации плазмы после окончания энерговклада. На Рис. 7 представлены заключительные этапы моделирования спектра этой молекулы.

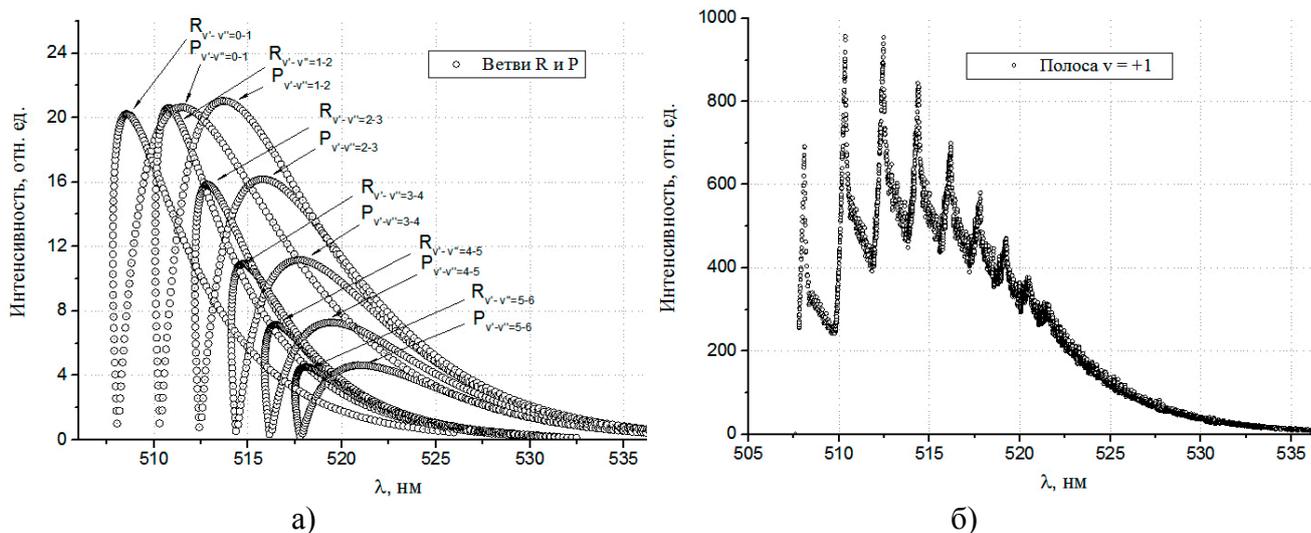


Рис. 7 Модель электронно-колебательно-вращательного спектра АЮ. Секвенция $\Delta v = +1$ электронного перехода $V^2\Sigma^+ - X^2\Sigma^+$ ($T_v = T_r = 0.3$ эВ). (а) Без учёта профиля вращательных линий. (б) С учётом гауссовского профиля с полушириной $\Delta x = 0.5$ нм

В последнем разделе третьей главы приводится пояснение к расчёту равновесного состава плазмы. В расчёте используется упрощенная модель, не учитывающая химических взаимодействий, при этом в качестве «замороженного» компонентного состава плазмы в первом приближении принимается газовая смесь Н: С: О: Си с варьируемым соотношением парциальных давлений. Пример расчёта состава при $P = 0.2$ атм представлен на Рис. 8.

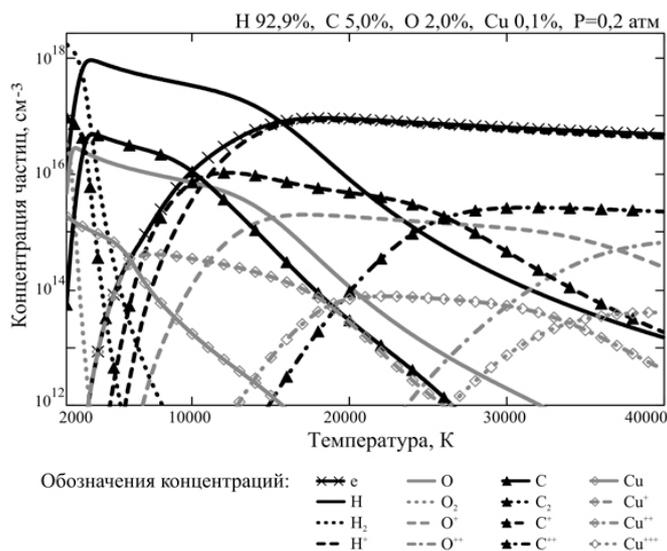


Рис. 8 Равновесный состав многокомпонентной плазмы

Важным результатом расчёта являются значения «нормальных температур» [16] (обеспечивающих максимум интенсивности излучения рассматриваемой компоненты при заданном давлении) основных спектральных излучателей, которые представлены в табл. 2.

Таблица 2. «Нормальные» температуры T_N основных излучателей эрозионного разряда

Излучатель, нм	H_{β} 486.13	H_{α} 656.3	C_{II} 513.3	C_{II} 657.8	C_{II} 672.5	O_{II} 374.9	Cu_{I} 521.8	Cu_{II} 490.9	C_2^* 516.5	n_e^{max}
P , атм	T_N , кК									
0.2	15.80	15.50	25.90	24.30	26.30	35.10	12.40	18.20	5.70	17.10
1.0	17.80	17.50	29.10	27.20	29.60	39.30	13.60	20.20	6.30	19.40
10	21.70	21.30	35.10	32.50	35.60	47.00	15.70	23.70	7.40	24.10

В четвёртой главе приводятся результаты апробации развиваемых методов.

Первый раздел посвящён результатам измерения плазменных параметров при дозвуковом режиме истечения струи. Эволюция n_e вдоль начального участка струи в течение разрядного импульса приведена на Рис. 9. Если в области, близкой к границе капилляра ($z < 1.5$ мм), профиль $n_e(t)$ на протяжении большей части импульса является плоским и почти не изменяется, то в конце начального участка струи ($z > 5$ мм), напротив, этот профиль следует за формой разрядного импульса.

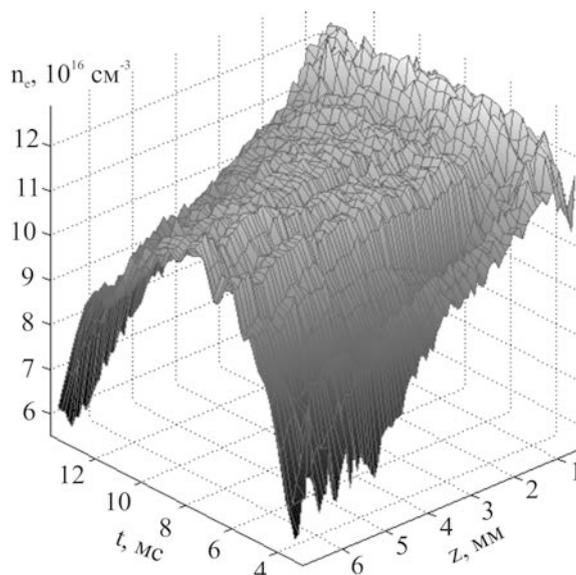


Рис. 9 Пространственно-временной профиль концентрации электронов n_e в области начального участка струи. Дозвуковой режим

Отметим, что поперечные профили электронной концентрации и интенсивности излучения линии $H\beta$ в приосевой области $2R \approx 1$ мм находятся в качественном и количественном согласии с результатами, полученными для стационарной водородной дуги при близких значениях разрядного тока и размерах канала разряда [9].

Второй раздел посвящён результатам измерения плазменных параметров при сверхзвуковом режиме истечения струи. Появление первой секции ударно-волновой структуры при переходе в режим сверхзвукового течения отражается на пространственно-временном распределении n_e , представленном на Рис. 10. Выражается это в том, что на протяжении первой половины импульса ($t = 0.2 \div 1.0$ мс) образуется область с низким уровнем концентрации электронов («воронка» в центре объёмного изображения). К моменту достижения максимума вкладываемой мощности данная область расширяется до границ $z = 1 \div 3$ мм. К началу последней четверти импульса область разрежения «разглаживается», что, очевидно, связано с исчезновением скачка уплотнения, вызванным переходом течения в дозвуковой режим.

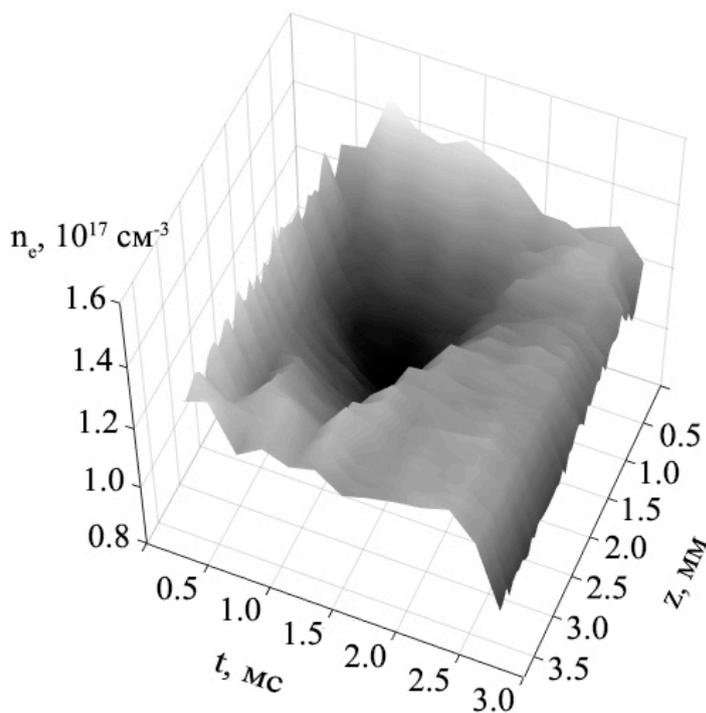


Рис. 10 Пространственно-временной профиль концентрации электронов n_e в области начального участка струи. Сверхзвуковой режим

Влияние степени нерасчётности на продольное распределение плазменных параметров в пиковый момент разрядного импульса демонстрируется на Рис. 11. При прочих равных условиях величина степени нерасчётности $n = p_0/p_\infty$ (p_0 – давление в выходном

сечения капилляра, p_∞ - давление окружающей среды) является обратной функцией диаметра капилляра d . Положение диска Маха определяется по положению максимумов n_e и T_e .

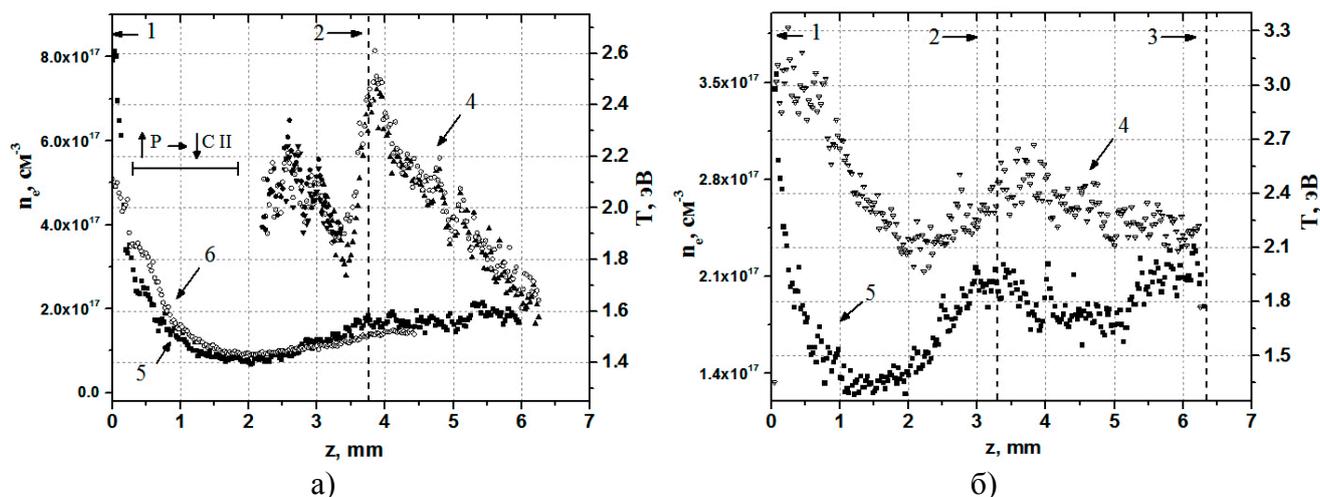


Рис. 11 Продольное распределение температуры и концентрации электронов при диаметре капилляра $d \sim 1$ мм (а) и $d \sim 1.6$ мм (б). 1 – капилляр, 2,3 – центральный скачок уплотнения (диск Маха), 4 – T_e (С II 657/С II 678), 5 – n_e (H α), 6 – n_e (H β).

Сверхзвук, середина импульса

Отметим, что распределение n_e , T_e на Рис. 11 (б) согласуется с данными о характере изменения параметров вдоль оси недорасширенной струи неравновесной плазмы при истечении в пространство, затопленное нейтральным холодным газом, представленными в работе [10].

Радиальные распределения параметров, полученные при помощи обратного преобразования Радона (Абея), в области, близкой к границе капилляра, и в области перед диском Маха, представлены на Рис. 12. Наличие максимума распределения той или иной интенсивности вне оси свидетельствует о достижении в данной зоне «нормальной» температуры для соответствующей компоненты. Координаты таких максимумов формируют набор «особых» точек, помогающих найти профили искомых параметров $p(t)$, $T_e(t)$.

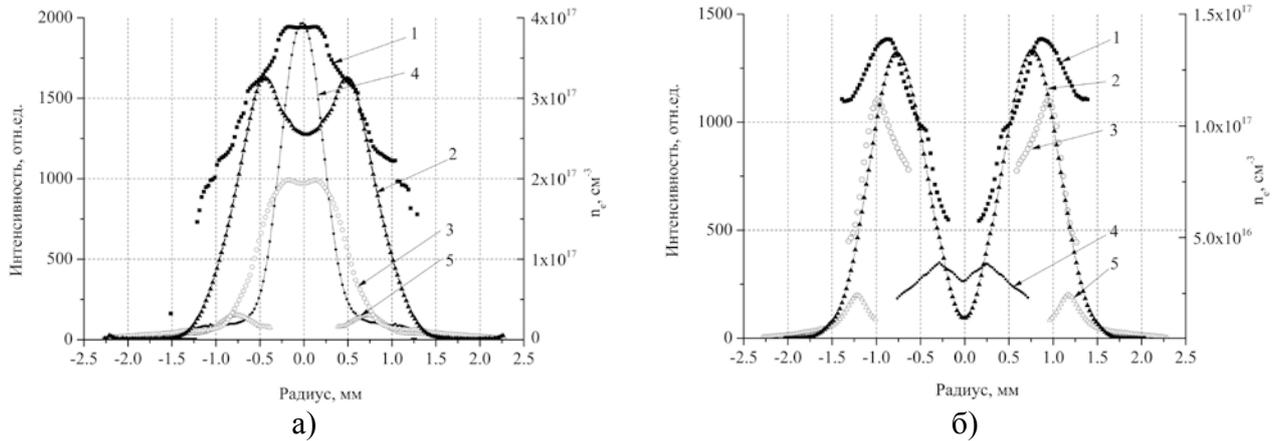


Рис. 12 Профили электронной концентрации n_e и интенсивностей излучения спектральных компонент плазмы в сечениях $z=0.5$ мм (а) и $z=2.5$ мм (б) первой сечии ударно-волновой структуры: 1 – n_e , 2 – H_α , 3 – H_β , 4 – $C II$ 513.3 нм, 5 – C_2 516.56 нм.

В наибольшей степени влияние градиента температуры и неизобаричности сверхзвукового течения проявляется в области ударно-волновых структур, характеризующейся максимальным перепадом давления между центральной и периферийной зонами с ожидаемым минимумом на оси струи. Совместное рассмотрение положения «особых» точек и радиальных зависимостей интенсивности и ширины линии H_α ($[H^*(3)](r)$ и $n_e(r)$) в сопоставлении с их расчетными изменениями по модели равновесного состава ($[H^*(3)](p,T)$, $n_e(p,T)$) позволяет получить согласованное изменение $p(r)$ и $T_e(r)$ в диапазоне изменения $r=0-1.2$ мм. Восстановленные профили температуры и давления в сечении $z=2.5$ мм (перед диском Маха) представлены на Рис. 13.

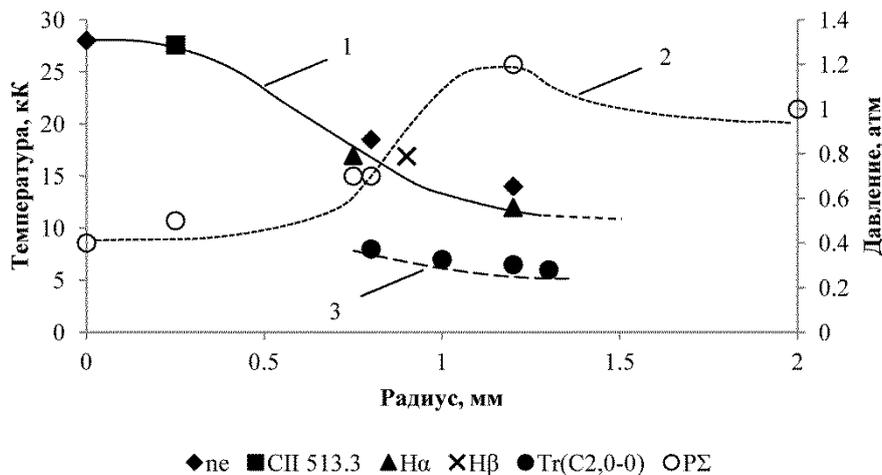


Рис. 13 Распределение параметров плазмы в сечении $z=2.5$ мм: 1 – температура электронов, 2 – давление, 3 – вращательная температура T_r (полоса (0-0) радикала C_2).

В третьем разделе четвертой главы приводятся оценки температуры в периферийной зоне начального участка плазменной струи в момент разрядного импульса и в релаксационной плазме после окончания энерговыклада.

В заключении приводятся основные выводы.

В результате проделанной работы развиты подходы, расширившие возможности спектральных методов диагностики многокомпонентных пространственно-неоднородных нестационарных плазменных объектов.

1. Опытным путем установлена совокупность средств и методов спектральной диагностики, обеспечивших получение самосогласованной картины пространственно-временных изменений n_e и T_e в до- и сверхзвуковом режимах истечения эрозионной плазменной струи.
2. Разработан и реализован программный комплекс автоматизированной обработки зарегистрированных спектров, включающий в себя все важнейшие процедуры: расшифровку спектров, калибровку интенсивностей, преобразование Радона, определение параметров плазмы, графическое представление результатов.
3. Метод «нормальных» температур Бартельса и Ларенца [16] в сочетании с модельной оценкой состава многокомпонентной плазменной среды позволил выполнить анализ пространственных распределений давления и температуры плазмы в области центрального скачка уплотнения, характеризующейся сильной неизобаричностью и пространственной неоднородностью параметров.
4. Выполнено моделирование спектра излучения молекулы AlO (переход $B^2\Sigma^+ - X^2\Sigma^+$), играющей важную роль в периферийной зоне плазменной струи и в рекомбинирующей плазме эрозионного разряда.
5. Благодаря реализации совместной и синхронизированной работы высокоскоростных камер и быстродействующего спектроскопического оборудования получена детальная картина пространственно-временных распределений n_e и T_e в до- и сверхзвуковом режимах истечения эрозионных плазменных струй, которая может быть использована при построении модели описания импульсного эрозионного разряда.

Разработанные методы и подходы комплексного видео- и спектрального анализа могут найти применение и дальнейшее развитие при исследовании разнообразных нестационарных движущихся плазменных объектов в технологических и космических приложениях.

Список литературы

- 1 Огурцова Н.Н., Подмошенский И.В., Смирнов В.Л. *Явление фазового перехода в плотной плазме капиллярного разряда* // ТВТ, 1977, Vol. 15, № 3. P. 456–464.
- 2 Keidar M., Boyd I.D., Beilis I.I. *Model of an Electrothermal Pulsed Plasma Thruster* // J. Propuls. Power. 2003. Vol. 19, № 3. P. 424–430.
- 3 Terauchi H., Bobrova N., Sasorov P., Kikuchi T., Sasaki T., Higashiguchi T., Yugami N. and Kodama R. *Observation and numerical analysis of plasma parameters in a capillary discharge-produced plasma channel waveguide. JOURNAL OF PHYSICS D: APPLIED PHYSICS, 2011.*
- 4 Ершов А.П., Колесников Е.Б., Тимофеев И.Б., Черников В.А., Чувашев С.Н., Шибков В.М. *Взаимодействие плазменной струи капиллярного разряда с поперечным сверхзвуковым потоком воздуха* // ТВТ, 2007, Vol. 45, № 5. P. 646–653.
- 5 Пащина А.С., Дегтярь В.Г., Калашников С.Т. *СВЧ-АНТЕННА НА ОСНОВЕ ИМПУЛЬСНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ* // ТВТ, 2015, том 53, № 6, с. 839–850.
- 6 Авраменко Р.Ф., Бахтин Б.И., Николаева В.И., Поскачеева Л.П., Широков Н.Н. *Экспериментальное исследование плазменных образований, инициируемых эрозионным разрядом* // ЖТФ. 1990. Т. 60. № 12. С. 57–64.
- 7 Ершов А.П., Розанов В.В., Сысоев Н.Н., Тимофеев И.Б., Чувашев С.Н., Шибков В.М. *Истекающие в атмосферу дозвуковые плазменные струи, образуемые капиллярным разрядом*// Физическая гидродинамика. Выпуск 4. Физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова. — 1994. — № 4. — С. 1–26.
- 8 Башутин О.А., Вовченко Е.Д., Димитров С.К., Жданов С.К., Кирко Д.Л., Луцько А.С., Махин А.В., Михин С.Г., Мозгрин Д.В., Палов А.П., Плетнев В.В., Савелов А.С., Самсонов Д.В., Смирнов В.М., Тельковский В.Г., Фетисов И.К., Ходаченко Г.В., Цветков И.В. *Диагностические методики, экспериментальные исследования, создание предварительной концепции явления "Факел". Тема № 88-3-021-471. НТО. М.:МИФИ, 1990.*
- 9 Асиновский Э.И., Кириллин А.В., Низовский В.Л. *Стабилизированные электрические дуги и их применение в теплофизическом эксперименте* // Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2008.
- 10 Лукьянов Г.А. *Сверхзвуковые струи плазмы. Ленинград: Машиностроение, 1985. 264 с.*
- 11 Пикалов В.В., Мельникова Т.С. *Томография плазмы. Новосибирск, 1995.*
- 12 Собельман И.И. *Введение в теорию атомных спектров. Москва: Физ.-мат. лит., 1963.*
- 13 Под редакцией В. Лохте-Хольтгревена. *Методы исследования плазмы. Москва, «Мир» 1971.*
- 14 Герцберг Г. *Спектры и строение двухатомных молекул. Москва: издательство иностранной литературы, 1949. — 413 с.*
- 15 Очкин В.Н. *Спектроскопия низкотемпературной плазмы. М. Физматлит, 2006.*
- 16 Larenz R.W., Bartels H. *Die Temperatur in der Siule des Gerdien-Bogens* // Naturwissenschaften. 1950. Vol. 37, № 7. P. 164.

Ефимов Александр Валерьевич

**РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ КОМПЛЕКСНОГО СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА
МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ ДВИЖУЩЕЙСЯ ПЛАЗМЫ ИМПУЛЬСНЫХ РАЗРЯДОВ**

Автореферат

Подписано в печать 10.04.017		Формат 60x84/16
Печать офсетная	Уч. изд.л. 1,61	Усл.-печ.л. 1,5
Тираж 100 экз.	Заказ № 70	Бесплатно

ОИВТ РАН, 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2