

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи



ЛОГУНОВ Александр Александрович

**ПУЛЬСИРУЮЩИЙ ПОПЕРЕЧНО-ПРОДОЛЬНЫЙ РАЗРЯД
В ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ПОТОКАХ ВОЗДУХА**

1.3.9. Физика плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2024

Работа выполнена на кафедре физической электроники физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

Научные руководители –

Шибков Валерий Михайлович

д.ф.-м.н., профессор

Двинин Сергей Александрович

д.ф.-м.н., доцент

Официальные оппоненты –

Акишев Юрий Семенович, д.ф.-м.н., профессор, нач. лаборатории кинетики слабоионизированной плазмы, АО ГНЦ РФ «ТРИНИТИ»

Знаменская Ирина Александровна, д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры молекулярных процессов и экстремальных состояний вещества, физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова

Титов Валерий Александрович, д.ф.-м.н., доцент, главный научный сотрудник исследовательского отдела 3, Институт химии растворов РАН

Защита диссертации состоится «05» декабря 2024 года в 16:30 на заседании диссертационного совета МГУ.013.7 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, Физический факультет МГУ, ауд. ЮФА.

E-mail: igorkartashov@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3166>

Автореферат разослан «____» _____ 2024 года

Ученый секретарь

диссертационного совета МГУ.013.7.

к.ф.-м.н.



И.Н. Карташов

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности темы. В настоящее время для повышения эффективности прямоточных воздушно-реактивных двигателей со сверхзвуковой скоростью потока в камерах сгорания активно разрабатываются новые технологии, позволяющие увеличить скорость горения и обеспечить полное сгорание топлива внутри двигателя без применения механических стабилизаторов. Одним из таких способов является применение различного типа электрических разрядов [1 – 8]. Работа [3] посвящена обзору исследований по плазменному горению. В [4] изучаются импульсно-периодические наносекундные высоковольтные разряды с целью их применения в плазменной аэродинамике. Изучению наносекундного разряда, создаваемого в импульсно-периодическом режиме, как средства для быстрого воспламенения дозвуковых воздушно-углеводородных потоков, посвящена работа [5]. Основные свойства и параметры свободно локализованных и поверхностных СВЧ разрядов и возможность их применения в сверхзвуковой плазменной аэродинамике рассмотрены в [7]. В работе [9] исследуется скользящий по диэлектрической поверхности электродный разряд типа «плазменный лист». Приведены результаты экспериментов по определению структуры плазменного слоя скользящего разряда в неподвижном воздухе и в однородном потоке за плоской ударной волной. Плазменной аэродинамике посвящены также работы [10 – 16] и многие другие исследования. Представленные в научных журналах и трудах российских и международных конференций данные показывают высокую эффективность использования газоразрядной плазмы как для воспламенения и горения высокоскоростных топливных смесей, так и для управления обтеканием тел, движущихся с дозвуковыми и сверхзвуковыми скоростями в земной атмосфере. Для практических приложений характерно большое разнообразие конструктивных решений электродных узлов таких разрядов, генерируемых в аэродинамических трубах, включая разряды в потоке, создаваемые на поверхности диэлектрика или в выемках.

Актуальность данных исследований связана с тем, что для развития современной авиационной техники требуются новые методы управления процессом горения высокоскоростных топливно-воздушных смесей без использования механических стабилизаторов: пилонов, каверн и уступов. Одно из таких решений – применение газовых разрядов для направленного воздействия на высокоскоростной поток с помощью локального выделения в нем дополнительной энергии, что будет способствовать наиболее полному сжиганию воздушно-углеводородного топлива при умеренных температурах порядка тысячи градусов Кельвина в достаточно коротких камерах сгорания длиной порядка метра. В работе ведется поиск режимов создания низкотемпературной плазмы поперечно-продольного разряда для микросекундного нагрева газа,

наработки активных частиц и быстрого воспламенения топлива в высокоскоростном потоке. Для этого необходимо максимально сократить время инициирования воспламенения. Известно, что воспламенение горючих газообразных смесей может быть реализовано путем нагрева газа до высокой температуры (самовоспламенение) или за счет нетепловой наработки радикалов и активных частиц, осуществляемой внешним источником энергии.

Различные формы разряда в сверхзвуковых потоках рассматривались в работах [17 – 23]. В [17] изучался продольный, а в [19] – поперечный разряд в потоке газа. Размеры анода и катода в этом типе разряда были малы, поэтому положение анодного и катодного пятен были жестко фиксированы. В [19] обнаружена импульсно-периодическая форма разряда, однако в силу неустойчивости вторичных пробоев в течении с возмущениями период этих пробоев и сам разряд также были в значительной степени неустойчивы. В работах [20, 21] для повышения устойчивости поджига разряда и инициации горения разряд создавался в специально созданной застойной зоне. В [22] для поджига горючей смеси использовался разряд, распространяющийся вдоль поверхности, причем как в потоке, так и в застойной зоне. Наконец, в работе [23] исследовалось воспламенение горючей смеси в потоке при комбинированном воздействии периодического импульсного разряда и импульсного СВЧ разряда в режиме программируемой работы.

Проведенные исследования поставили вопрос о более тщательном изучении свойств различных типов разряда, используемых для инициации горения. Без этого невозможна устойчивая реализация и оптимизация процесса поджига горючей смеси. В частности, необходимо провести измерение зависимости свойств разряда от скорости потока, от межэлектродного расстояния, от тока разряда и других внешних параметров.

Отличие постановки данной работы по сравнению с работами [19 – 23] заключается в том, что исследовался поперечно-продольный разряд, электроды которого были вытянуты преимущественно вдоль потока. Отсутствие жесткой фиксации положения катодного пятна привело к более стабильному процессу вторичного пробоя по сравнению с работой [19], что должно положительно сказаться на стабильности процесса инициации поджига горючей смеси.

Объектом исследования в настоящей работе выбран нестационарный поперечно-продольный пульсирующий разряд (ПППР) и создаваемая им плазма в дозвуковых (число Маха M потока < 1) и сверхзвуковых ($M > 1$) воздушных потоках. Анод и катод этого вида разряда расположены параллельно воздушному потоку с начальной областью плавного увеличения расстояния между электродами вниз по потоку.

В отличие от сверхвысокочастотного (СВЧ) разряда и разряда магнитоплазменного компрессора (МПК) ПППР требует вклада меньшей мощности

для воспламенения высокоскоростных топливно-воздушных потоков и обеспечивает большие плотности возбужденных частиц по сравнению со скользящим, продольным или поперечным разрядами. Исследуемый тип разряда может обеспечить инициацию горения топлива без использования застойных зон, где резко увеличивается тепловая нагрузка, ведущая к разрушению двигателя, а стабильность газоразрядного процесса должна обеспечить стабильность процесса горения в течение всего времени полета летательного аппарата. Применение исследуемого разряда дает возможность уменьшить продольные размеры двигателя и снизить его массу без снижения тяги.

Предмет исследования – основные параметры нестационарного поперечно-продольного пульсирующего разряда (ПППР) и создаваемой им плазмы.

Один из аспектов решаемой задачи заключается в том, что условия потока газовой смеси (давление, скорость течения, состав газа, расположение иницирующих разряд электродов, подвод энергии) могут изменяться в широком диапазоне параметров. Именно поэтому необходимо определение основных параметров нестационарного поперечно-продольного пульсирующего разряда. Исследуемый разряд, применяемый для воздействия на высокоскоростные топливно-воздушные смеси, может быть реализован в широком диапазоне скоростей и давлений газа (в том числе при атмосферном давлении).

Цель работы – определение условий реализации и последующее осуществление быстрого миллисекундного управляемого нагрева газа до температур от 4000 К до 8000 К, типичных для режимов работы прямоточных воздушно реактивных двигателей (ПВРД) [24].

В связи с этим были поставлены следующие **задачи исследования**.

1. Экспериментальное исследование основных характеристик поперечно-продольного пульсирующего разряда – его пространственно-временных форм и параметров, вольтамперных характеристик: частоты пульсаций f , длины плазменной петли L_p , напряжения на разряде U , напряженности поля и приведенного поля, как внешних параметров плазмы: напряжения источника питания, минимального расстояния между электродами d_{min} , скорости течения газа и его давления.

2. Экспериментальное исследование основных параметров плазмы разряда: температуры электронов, температуры и плотности газа, плотности электронов, степени ионизации как функции тех же внешних параметров.

3. Разработка экспериментальной установки, включающей несколько диагностических комплексов, необходимых для измерения в масштабах реального времени токовых и спектральных характеристик пульсирующего квазистационарного разряда с временным разрешением порядка миллисекунд и апробация возможности использования газоразрядной плазмы поперечно-продольного разряда для быстрого введения энергии в дозвуковые и сверхзвуковые потоки.

Методология исследования. Для решения поставленных задач применялись различные методы: плотность, температура электронов и температура газа измерялись спектральными методами, основанными на анализе интенсивности отдельных линий и непрерывных спектров. Измерения проводились в режиме реального времени с временным и пространственным разрешением с помощью созданного диагностического комплекса, состоящего из монохроматоров и спектрографов с цифровой регистрацией спектра, блока диагностики с цифровой регистрацией вольтамперных характеристик, высокоскоростной цифровой видеокамеры, цифровых осциллографов и компьютеров.

Научная новизна работы заключается в следующем.

1. Впервые в специальной конфигурации модели камеры сгорания ПВРД измерены основные параметры поперечно-продольного разряда в высокоскоростных воздушных потоках в атмосферу: частота пульсаций, температура и концентрация электронов, температура и концентрации молекулярного газа, длина разрядного канала и напряженность электрического поля в нем и пространственно-временная эволюция в воздухе при отношении скорости потока к скорости звука (числе Маха) от 0.15 до 1.5 как функции скорости высокоскоростного потока, разрядного тока, минимального расстояния между катодом и анодом и продольной (вниз по потоку) координаты.

2. Впервые экспериментально установлена асимметрия анодной и катодной ветвей изучаемого разряда, обусловленная разными скоростями ионов в приэлектродных областях плазмы.

3. Впервые экспериментально зарегистрирована неразрывность газоразрядного процесса при помощи скоростной видеосъемки.

4. Впервые определены условия реализации близкого к равновесному и неравновесного состояния исследуемого разряда в зависимости от условий в потоке газа и способов его возбуждения.

5. Впервые обнаружено уменьшение температуры электронов и увеличение температуры газа при увеличении скорости потока, что обусловлено увеличением конвективных и рекомбинационных потерь с одной стороны, и вкладом большей мощности, вводимой в разряд, с другой стороны.

Достоверность и обоснованность результатов. Автор исследовал плазму с помощью независимых диагностик. Результаты экспериментов при одинаковых условиях дают совпадающие с точностью до ошибок эксперимента результаты. Сравнение с результатами теоретических и экспериментальных работ других исследователей также показывают их удовлетворительное согласие. При выборе спектральных линий и областей непрерывного спектра для оптической диагностики автор проводил тщательную проверку применимости исходных предположений методов. Основные результаты диссертации многократно докладывались и обсуждались на ряде российских и международных конференций и опубликованы в высокорейтинговых научных

журналах. Это позволяет заключить, что полученные результаты являются вполне обоснованными и достоверными.

Положения, выносимые на защиту.

1. Устойчивое поддержание поперечно-продольного разряда может быть реализовано в потоке воздуха при атмосферном давлении при скоростях потока от 0.15 до 1.5 скоростей звука (от 0.15 М до 1.5 М) с расстоянием между электродами от 0.1 мм до 1 мм при напряжениях источника питания до 4.5 кВ. Разряд представляет собой последовательность пробоев с частотой, лежащей от 50 до 2000 Гц. Геометрия электродов обеспечивает отсутствие погасания разряда в результате флуктуаций.

2. Разряд может существовать в двух формах: с вторичными пробоями между электродами и с пробоями между анодной и катодной частями плазменного канала, выносимыми из межэлектродного пространства потоком газа. Переход разряда из одной формы в другую происходит случайным образом во время горения разряда и обусловлен флуктуациями течения газа.

3. Параметры анодной и катодной частей плазменного канала различны. Несимметрия разрядной петли обусловлена различием направлений тока в приэлектродных областях плазмы и различными условиями генерации плазмы в этих областях.

4. При увеличении скорости течения происходит увеличение температуры газа и снижение температуры электронов в среднем по времени. Поэтому при увеличении скорости течения происходит постепенный переход от неравновесной формы разряда к равновесной.

5. Увеличение тока разряда от 4.5 до 16 А при постоянной скорости потока 240 м/с приводит к росту температуры электронов от 10000 К до 15000 К и температуры газа от 6500 К до 7500 К. Увеличение температур связано с тем, что увеличение тока разряда приводит к увеличению плотности электронов, при этом увеличиваются рекомбинационные потери. Увеличение потерь в квазистационарном режиме влечет за собой увеличение температуры электронов и электрического поля разряде.

Научная и практическая ценность работы.

С академической точки зрения полученные результаты могут быть использованы для разработки физических и математических моделей описания пространственно-неоднородных неравновесных квазистационарных разрядов в дозвуковых и сверхзвуковых воздушных потоках камер сгорания воздушно-реактивных двигателей без использования механических стабилизаторов. Они могут быть научной базой для выработки рекомендаций по использованию газоразрядной плазмы при практическом создании летательных аппаратов нового поколения, в частности, для быстрого воспламенения и стабилизации горения в сверхзвуковых воздушно-углеводородных потоках. Результаты, полученные автором и вошедшие в диссертацию, являлись базовыми для отчетов

по грантам РФФИ (№ 08-02-01251-а, № 11-02-01091-а, №18-02-00336-а), по Программе фундаментальных исследований Президиума РАН (Р-09) «Исследование вещества в экстремальных условиях» и гранту CRDF (№ RUP-1514-MO-06).

Личный вклад автора.

Вклад соискателя в работы, написанные в соавторстве и вошедшие в диссертацию, является существенным. Автором проведены эксперименты по исследованию газоразрядной плазмы нестационарного пульсирующего поперечно-продольного по отношению к потоку электродного разряда. Автор лично проводил обработку экспериментальных данных и выполнял анализ полученных результатов.

Апробация работы.

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на ряде российских и международных конференций, в том числе на:

- Международных конференциях по физике плазмы и УТС (Звенигород, 2016 – 2020);
- Международных совещаниях по магнитной и плазменной аэродинамике в аэрокосмических приложениях (Magneto-plasma-aerodynamics in aerospace applications, ОИВТ РАН, Москва, 2016 – 2021);
- научных конференциях МГУ "Ломоносовские чтения" секция физики (Москва, 2018-2022);
- научных семинарах кафедры физической электроники физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Публикации.

Основные результаты, включенные в диссертацию, представлены в 28 научных публикациях [A1 – A28], в том числе: в 10 статьях в реферируемых научных журналах входящих базы данных WoS, Scopus, RCSI и рекомендованных для защиты в ученых Советах МГУ. в 7 статьях в сборниках, материалах международных и российских конференций и в 11 тезисах докладов на конференциях.

Объем и структура работы.

Основное содержание диссертации изложено на 157 страницах текста, включая 65 рисунков и 7 таблиц. Работа состоит из введения, 5 глав, Заключение, в котором сформулированы основные результаты работы, и двух Приложений. Список цитируемой литературы содержит 256 наименования.

II. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, описаны объект и предмет исследования, сформулированы цели, задачи и методология исследования, отмечены научная новизна и практическая значимость работы, достоверность полученных результатов и личный вклад автора, а также приведены сведения об апробации работы в публикациях. Приведено краткое содержание работы.

В первой главе (обзор литературы) диссертации анализируются работы, посвященные экспериментальному изучению низкотемпературной газоразрядной плазмы, полученной при помощи разных источников, и ее влиянию на воспламенение воздушно-углеводородных неподвижных смесей или их высокоскоростных потоков.

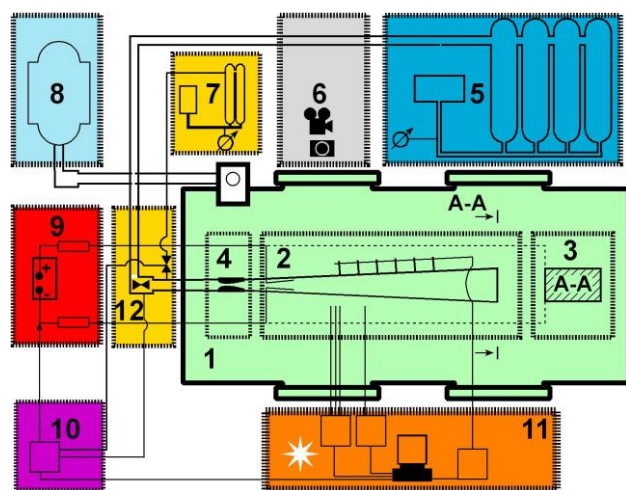


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки: 1 – вакуумная камера, 2 – аэродинамический канал прямоугольного сечения с электродным узлом, 3 – профиль сечения аэродинамического канала, 4 – сопло Лавали, 5 – ресивер высокого давления воздуха, 6 – видео и фото камеры, 7 – ресивер высокого давления газа, 8 – вакуумный насос, 9 – источник питания для создания межэлектродного разряда, 10 – система синхронизации, 11 – аналогово-цифровые преобразователи, фотоэлектронные умножители, спектрометры, датчики давления и температуры, компьютеры, 12 – электромеханические клапаны.

Во второй главе диссертации описываются экспериментальная установка, использованная в данной работе, и методики измерений. Глава написана на основе работ автора [А1–А4, А6–А10]. Блок-схема установки приведена на рис. 1.

Установка включает в себя вакуумную камеру (1), ресивер высокого давления воздуха (5), сопло Лавали для создания сверхзвукового потока в аэродинамическом канале (2) с поперечным сечением в широкой части (3), высоковольтный источник питания (9), систему синхронизации (10) и диагностическую аппаратуру (6, 11).

Функциональные блоки были объединены в несколько экспериментальных комплексов (рис. 2).

Комплекс 1 обеспечивает создание модели прямоточного воздушно-реактивного двигателя (ПВРД) и включает в себя узел создания потока, узел организации разряда. Он обеспечивает течение газа с заданными параметрами (состав газа C , давление p , скорость течения v) и зажигание поперечно-продольного разряда (ППР) в газе. Начальные параметры разряда: разрядный ток i , напряжение на разрядном промежутке U , минимальное межэлектродное

расстояние $d_{\min}$, длина электродов L .

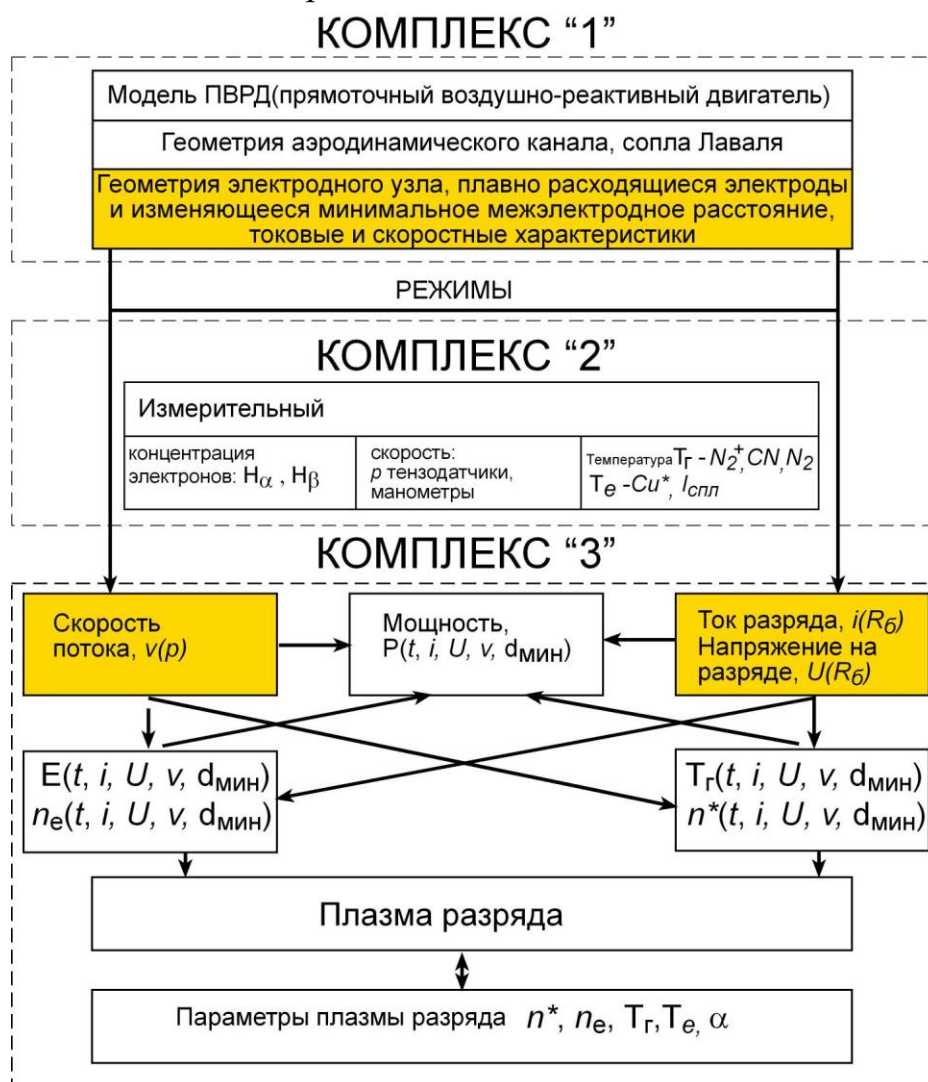


Рис. 2. T_g - температура газа, T_e - температура электронов, n^* - концентрация газа, n_e - концентрация электронов, α –степень ионизации плазмы, i - ток разряда, E - напряженность электрического поля, v - скорость воздушного потока, $d_{\min}$ - минимальное расстояние между электродами. Кроме того, комплекс 2 обеспечивал включение высокоскоростной видеокамеры (которая контролировала пространственно-временную эволюцию разряда) и регистрацию напряжения в разряде U и тока разряда i , т.е. вложенной в разряд мощности. Для контроля плавающего потенциала плазмы использовались зонды постоянного тока.

Названные параметры (C , p , v , i , U , $d_{\min}$, L) представляют собой начальные условия (НУ) организации разряда.

Комплекс 2 объединяет блоки диагностики разряда, позволяющие осуществить измерение концентрации электронов (по уширению спектральных линий водорода H_{α} , H_{β}), контроль потока (тензодатчики, манометры), измерение температуры электронов (по линейчатому и сплошному спектру), измерение температуры газа (по спектрам молекулярного азота и циана) и контроль спектра разряда в целом.

Комплекс 3 обеспечивает включение высокоскоростной видеокамеры (которая контролировала пространственно-временную эволюцию разряда) и

регистрацию падение напряжения на разряде U и тока разряда i , т.е. вложенной в разряд мощности. Для контроля плавающего потенциала плазмы использовались зонды постоянного тока.

Блок синхронизации обеспечивает необходимая последовательность работы комплексов 1, 2 и 3 и регистрацию, и запись полученных параметров. Экспериментальная установка оснащена измерительной аппаратурой, позволяющей проводить исследования параметров воздушного потока, газоразрядной плазмы и основных свойств квазистационарного продольно-поперечного разряда. Диагностический комплекс содержит цифровые спектрографы, фотоэлектронные умножители, электрические зонды, термопары и др. Наблюдаемые процессы фиксировались с использованием цифровых фотоаппарата и высокоскоростной видеокамеры "ВидеоСпринт" с электронно-оптическим затвором. Спектр излучения плазмы фиксировался с помощью цифрового двухканального спектрографа AvaSpec фирмы Avantes и шестиканального спектрометра OceanOptics. Температура газа T_g определялась из сравнения экспериментально измеренных и синтезированных молекулярных полос циана (0; 0) и (1; 1) с длинами волн кантов $\lambda = 388.3$ нм и $\lambda = 387.1$ нм, а также полос молекулярного иона азота (0; 0) с длиной волны канта $\lambda = 391.4$ нм. Для моделирования спектра использовалась программа Spesair, позволяющая рассчитывать параметры спектра при заданных плотностях и температурах частиц, а также решать обратную задачу поиска температур по спектру. Распределение по вращательным и колебательным уровням предполагалось больцмановским. Для измерения напряженности электрического поля в канале использовались равноотстоящие зонды с диаметром 0.5 мм, длиной рабочей части 5 мм и расстоянием между центрами зондов 10 мм. Температура электронов рассчитывалась по зарегистрированному сплошному спектру и по линиям меди, поступающей в поток вследствие эрозии электродов.

При измерении плотности электронов использовалась в основном линия H_β , уширение которой почти на порядок величины превышает уширение линии H_α . При малых разрядных токах (низких значениях концентрации электронов $n_e < 10^{16}$ см⁻³) измерения проводились только с помощью линии H_β , поскольку уширение линии H_α незначительно превышает аппаратную функцию спектрографа, и точность определения n_e составляет порядка 30 %.

В третьей главе, написанной по результатам статей [[A3–A5, A7, A10], по экспериментально измеренным значениям статического p_1 и полного p_0 давлений в аэродинамическом канале и ресивере рассчитывались газодинамические параметры высокоскоростного потока в канале и измерялись электрические параметры разряда. Давление p_0 неподвижного воздуха в ресивере и статическое давление p_1 в потоке измерялись с помощью датчиков давления, расположенных в воздушном ресивере и на стенке аэродинамической канала.

В этой же главе представлены характеристики разряда: изменение во времени длины плазменного канала, скорости его распространения, диаметра разрядного канала, частоты и, соответственно, периода пульсаций разряда, частоты пульсаций напряжения на разряде и разрядного тока, напряженности электрического поля. Пространственно-временная эволюция структуры разряда определялась с помощью высокоскоростной видео- и фотосъемки и фотоэлектронных умножителей. В качестве примера на рис. 3 представлены фотохронограмма развития разряда, создаваемого в дозвуковом потоке воздуха с помощью стационарного источника питания, и промежуточный кадр, демонстрирующий разность хода катодной и анодной части петли.

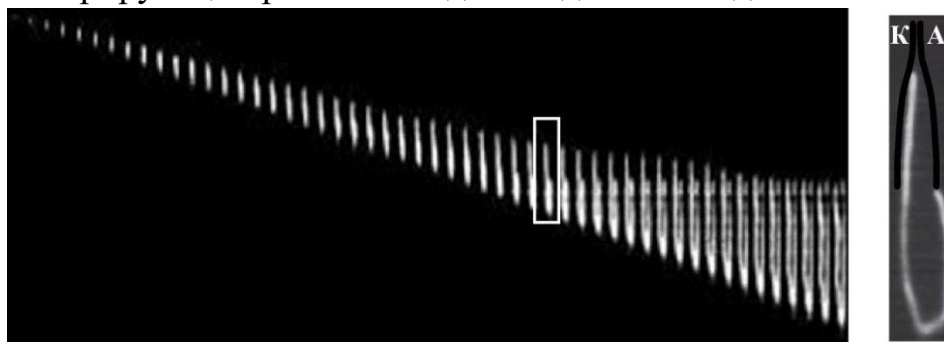


Рис. 3. Хронограмма развития пульсирующего разряда, создаваемого в дозвуковом потоке воздуха $v = 275$ м/с. Частота кадров 32 кГц, время экспозиции одного кадра 2 мкс. Воздушный поток направлен сверху вниз, время увеличивается слева направо. Отдельно изображен увеличенный кадр с обозначенными электродами - слева катод (К), справа - анод (А).

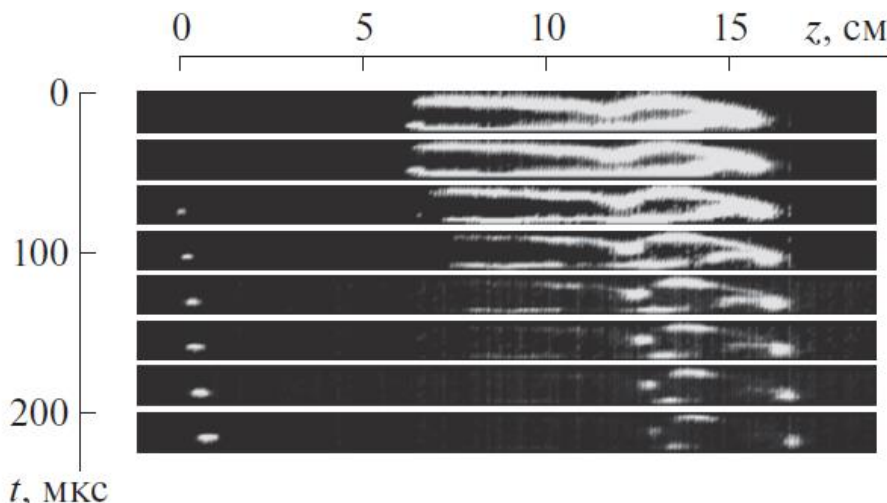


Рис. 4. Фотографии разряда в момент повторного пробоя и образования новой плазменной перемычки при существующем плазменном канале.

На рис. 4 представлены кадры скоростной видеосъемки повторного пробоя и образование новой плазменной перемычки при существующем плазменном канале, а на рис. 5 – временной ход напряжения и тока при реализации разряда. Условия эксперимента: давление в воздушном ресивере $p_0 = 1.5$ атм, давление воздуха в барокамере 760 Торр, секундный массовый расход воздуха $dm/dt = 48$ г/с, скорость дозвукового потока $v = 275$ м/с,

максимальное значение разрядного тока 10 А. Воздушный поток направлен сверху вниз, время увеличивается слева направо. При включении источника питания происходит пробой воздуха по кратчайшему расстоянию между катодом и анодом. Образующаяся при этом плазменная перемычка начинает сноситься высокоскоростным воздушным потоком.

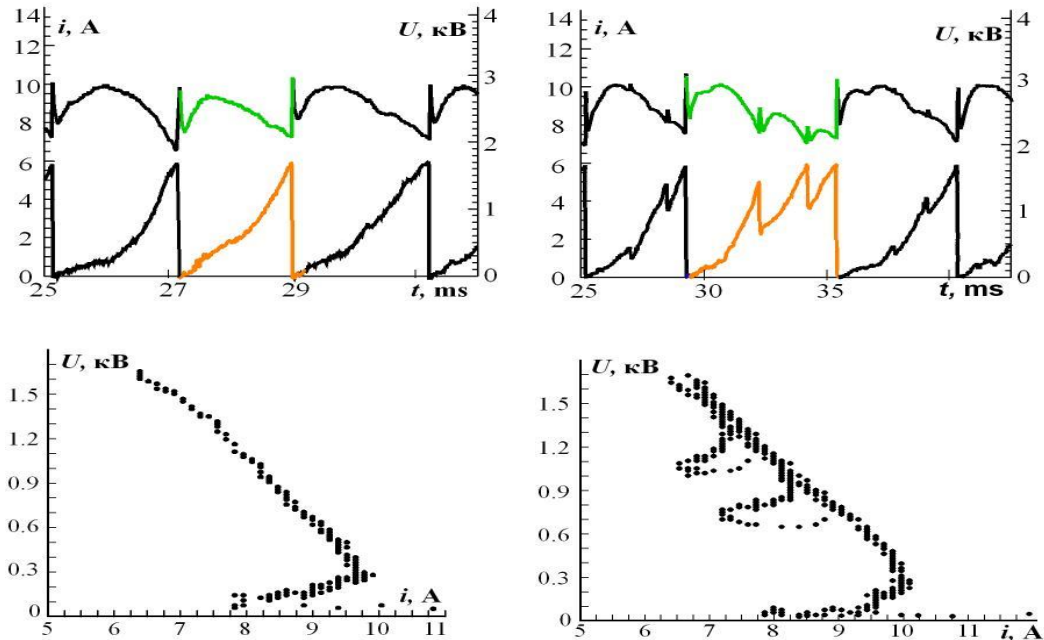


Рис. 5. Осциллограммы тока и напряжения разряда и соответствующие им вольтамперные характеристики при реализации двух форм разряда – слева без перепробоев, справа с перепробоями. Давление в барокамере 760 Торр, давление в ресивере воздуха 1.5 атм, секундный массовый расход воздуха $dm/dt = 48$ г/с, скорость дозвукового потока $v = 275$ м/с.

Так как скорость воздуха в пограничном слое вблизи поверхности электродов меньше скорости невозмущенного потока, то скорости перемещения анодного и катодного пятен вдоль электродов меньше, чем скорость центральной части плазменной петли. Анодное пятно раньше достигает конца электрода и фиксируется на нем, затем на конце второго электрода фиксируется катодное пятно. В качестве гипотезы можно предположить, что движение анодного пятна не связано с необходимостью нагрева электрода для обеспечения эмиссии электронов и поэтому происходит быстрее, что и приводит к более медленному движению катодного пятна. С другой стороны, особенности перемещения катодных пятен недостаточно изучены, а теория их движения пока не разработана.

В экспериментах реализуются две формы поддержания разряда: без повторных перепробоев и с перепробоями (рис. 5 слева). Поскольку время установления баланса частиц в каждом из сечений плазменной петли гораздо больше времени ее сноса потоком, напряжение и ток разряда в каждый момент времени могут быть рассмотрены как вольтамперные характеристики разряда для данной длины петли (рис. 5 внизу).

Четвертая глава [A1, A2, A4, A6, A9, A10] посвящена измерениям

пространственного распределения электронной и газовой температуры, концентрации электронов и степени ионизации в плазме поперечно-продольного разряда. В ней также проводятся экспериментальные зависимости этих параметров от тока разряда. Цель исследований, проводимых в этой главе – проследить временную эволюцию параметров плазмы в каждом из сечений петли. Такой подход требует получения и обработки большого количества информации, осуществить которое на данной степени развития эксперимента очень проблематично. Поэтому в дальнейших исследованиях, как правило, исходят из следующих гипотез.

1. Временные зависимости параметров плазмы в разряде в различных пульсациях (после различных перепробов) близки друг к другу.

2. Параметры плазмы на протяжении развития каждой отдельной плазменной петли в заданном сечении плазменной петли слабо зависят от времени за время ее эволюции.

3. Параметры плазмы в катодной и анодной ветвях близки друг к другу.

Использование гипотез (1) – (3) позволяет измерять не параметры разряда в отдельной точке, а их усредненные по времени значения по всему разряду. В значительной степени их выполнение предполагалось при проведении ранних работ [19 – 23], что давало возможность резко уменьшить объем измерений, но тем не менее получить исходные данные для перспективности или не перспективности данного типа разряда для тех или иных приложений, например, для влияния на течение газа или осуществления поджига горючей смеси. В данной работе эти предположения использовались в главе 5.

Пульсирующий разряд создавался в течение времени $t = 2$ с. Время экспозиции используемого спектрографа порядка 10 мс. В течение импульса разрядного тока длительностью $t = 2$ с регистрировались порядка 100 спектров. Эксперименты показали, что параметры пульсирующего разряда остаются стабильными за время измерения.

Было получено, что концентрация электронов при фиксированной скорости потока увеличивается с ростом разрядного тока, причем в течение пуска нестабильность во времени концентрации не превышает 5–10 %.

Результаты измерения пространственного распределения напряженности электрического поля, температуры и концентрации электронов, температуры газа в разряде приведены на рис. 6 – 9. Из рисунков следует, что по мере удаления от электродов электронная температура, плотность и температура газа уменьшаются. Это уменьшение может быть связано с увеличением сечения плазменного канала с течением времени вследствие процессов переноса. Качественно поведение этих параметров согласуется друг с другом. Рост напряженности поля в катодной части петли может быть связан с особенностями усреднения поля по времени при учете нелинейности зондовой характеристики. Были также измерены зависимости

параметров плазмы от разрядного тока локально в отдельных точках разряда (рис. 10 – 13).

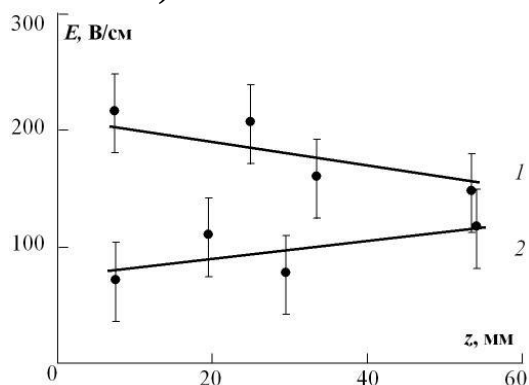


Рис. 6. Зависимость от расстояния усредненной по времени напряженности поля в анодной (1) и катодной (2) ветвях плазменной петли. Разрядный ток 12.5 А. Скорость воздушного потока 210 м/с.

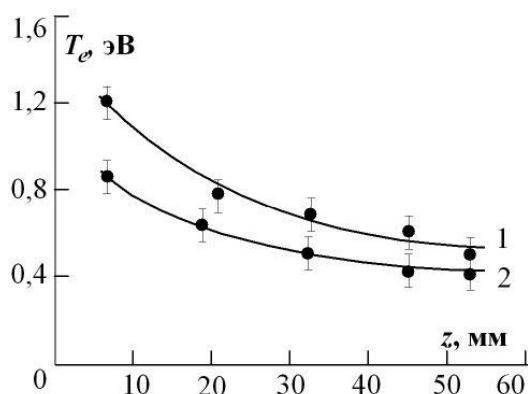


Рис. 7. Зависимость от расстояния температуры электронов в анодной (1) и катодной (2) частях плазменной петли. Разрядный ток 12.5 А. Скорость воздушного потока 210 м/с.

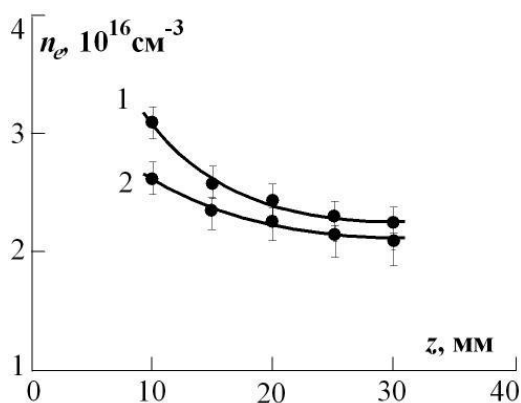


Рис. 8. Зависимость от расстояния концентрации электронов в анодной (1) и катодной (2) частях плазменной петли. Разрядный ток 12.5 А. Скорость воздушного потока 210 м/с.

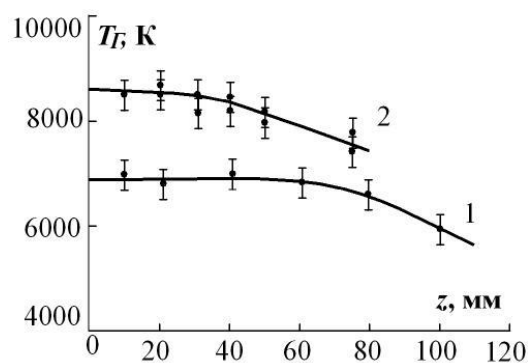


Рис. 9. Зависимость температуры газа T_g в плазменном канале от продольной координаты z при $v = 275$ м/с и $i = 12.5$ А (кривая 1) и $v = 475$ м/с и $i = 15.5$ А (кривая 2).

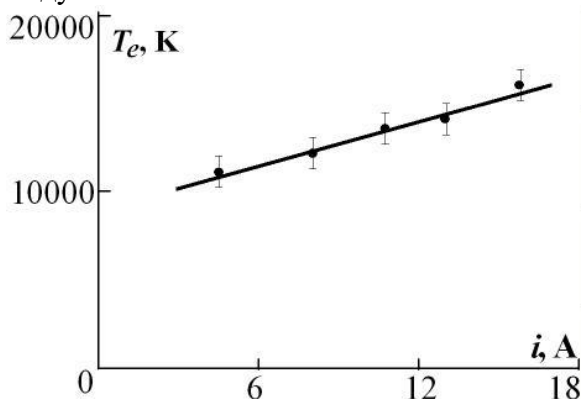


Рис. 10. Зависимость температуры электронов от разрядного тока на расстоянии $z = 1$ см от электродов. Скорость потока 240 м/с.

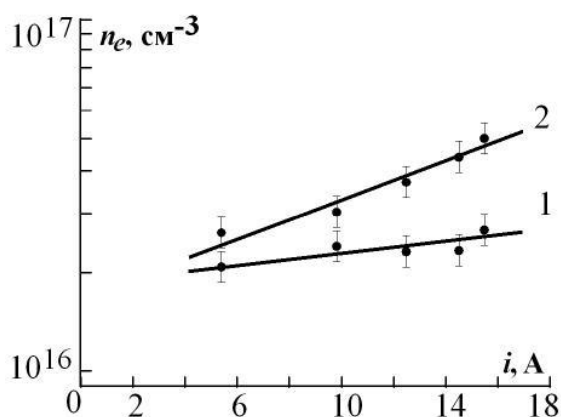


Рис. 11. Зависимость от разрядного тока концентрации электронов в канальной плазме пульсирующего разряда, при v : 240 м/с (1) и 420 м/с (2).

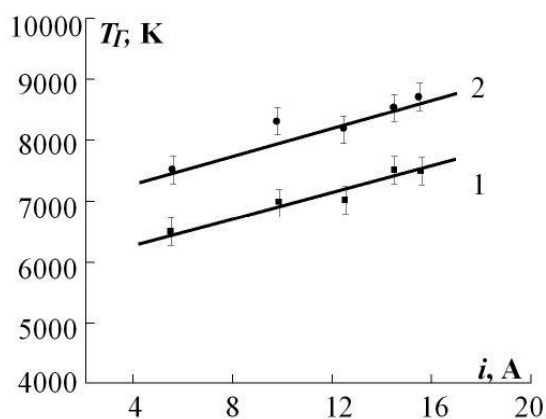


Рис. 12. Зависимость температуры газа от разрядного тока при скорости воздушного потока 240 м/с (прямая 1) и 420 м/с (прямая 2) на расстоянии $z = 25$ мм от анода при минимальном расстоянии между электродами $d = 0.7$ мм.

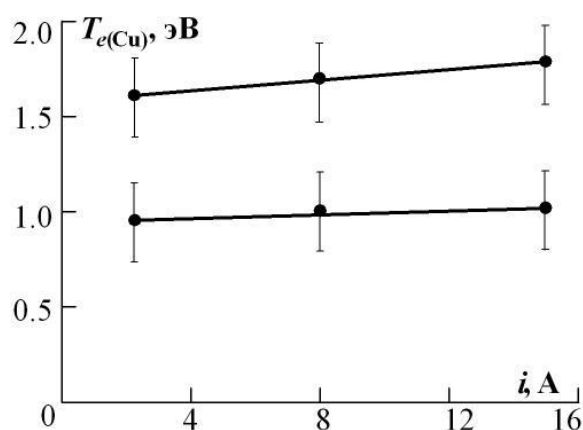


Рис. 13. Температура распределения заселенностей возбужденных атомов меди при различных разрядных токах на расстоянии $z = 1$ см от концов электродов вдоль потока.

Пятая глава [A2 – A9] посвящена исследованию зависимости параметров разряда от скорости потока и от минимального межэлектродного расстояния и анализу полученных результатов. Важность этих экспериментов обусловлена необходимостью проверить устойчивость поджига и повторного возбуждения разряда в результате вторичных пробоев при изменении этих параметров. Кроме того, кроме устойчивого перепробоя необходимо обеспечить возможно более эффективный нагрев газа разрядом.

Рис. 14 и 15 показывают, что температура электронов падает с увеличением скорости потока, а плотность электронов растет. На рис. 16 и 17 представлены зависимости измеренной температуры и концентрации молекул воздуха с учетом нагрева газа в канале ППР (точки 2), и рассчитанной зависимостью концентрации молекул воздуха в холодном потоке (кривая 1).

Напротив, температура электронов с ростом скорости падает, что противоречит стандартным представлениям о процессах в разряде. С одной стороны, такое поведение может быть обусловлено приближением разряда к равновесному. С другой стороны, этот результат может быть обусловлен неоднородностью нагрева разряда (излучение образуется в различных пространственных областях разряда). Наконец, такое поведение может быть обусловлено большей ролью нагретых до высоких температур атомов и молекул в установлении баланса возбужденных уровней, используемых для измерения температуры электронов. Окончательный ответ на этот вопрос требует построения кинетической модели разряда, учитывающей пространственную неоднородность.

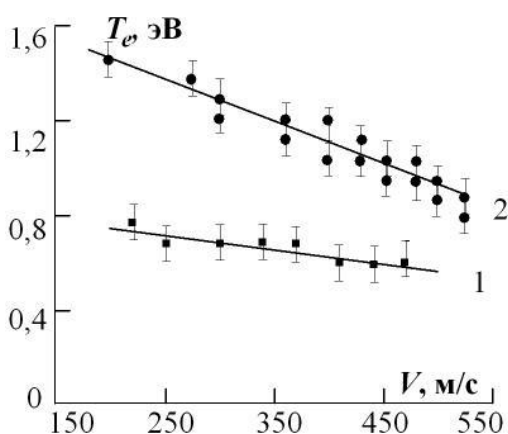


Рис. 14. Зависимость температуры электронов от скорости воздушного потока при различных значениях разрядного тока $i = 5.5$ А (1) и $i = 15.5$ А (2), измеренной на расстоянии $z = 10$ мм от электродов.

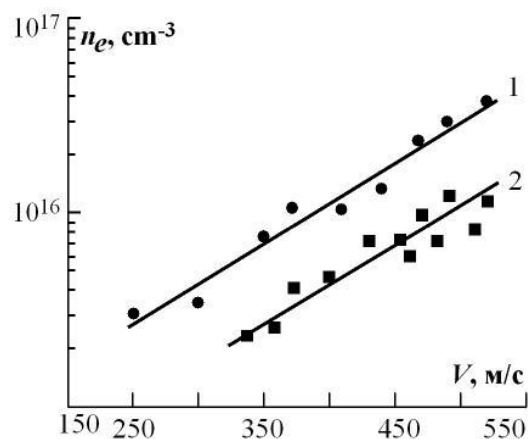


Рис. 15. Зависимость концентрации электронов от скорости потока воздуха в плазме пульсирующего канального разряда на различных расстояниях от электродов $z = 10$ мм (1) и $z = 30$ мм (2), $i = 15.5$ А.

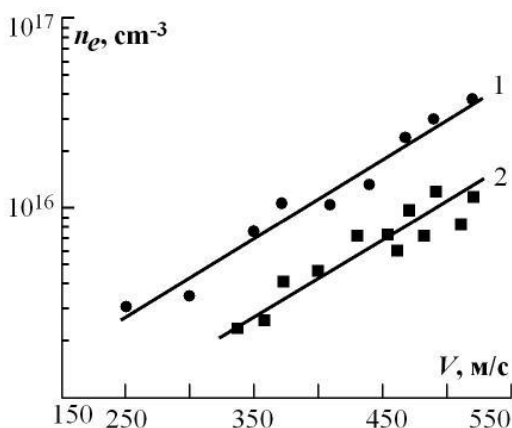


Рис. 16. Зависимость концентрации газа от скорости потока в холодном потоке (прямая 1) и в плазменном канале (прямая 2), $z = 25$ мм, $i = 14.5$ А (2), $d = 0.7$ мм.

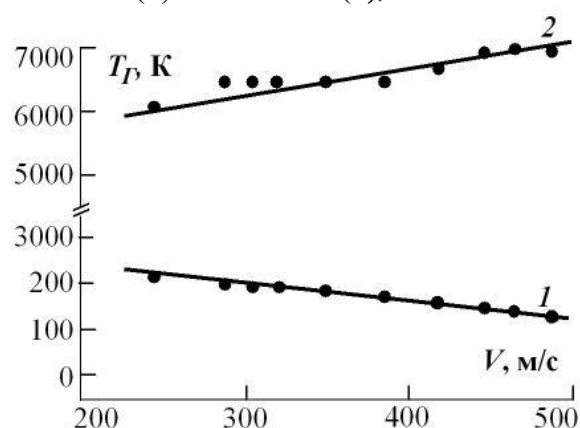


Рис. 17. Зависимость температуры газа от скорости потока в холодном потоке (прямая 1) и в плазменном канале (прямая 2), $z = 25$ мм, $i = 14.5$ А (2), $d = 0.7$ мм.

Во второй части главы анализировались зависимости параметров разряда от минимального межэлектродного расстояния. При длине электрода 70 мм и скорости 500 м/с время пролета электрода начальным возмущением составляет 100 мкс, что гораздо больше времени пробоя. Несмотря на большой запас по времени, представляет интерес исследовать зависимость свойств разряда от минимального межэлектродного расстояния, так как увеличение расстояния приводит как к увеличению пробойного напряжения, так и к увеличению времени пробоя.

Исследование частоты пульсаций разряда показало связь с ионизационными процессами в плазме разряда. Глубина модуляции свечения плазмы и напряжения на разряде достигает около 100 %, тогда как глубина пульсации разрядного тока изменяется от 5 % при сверхзвуковой скорости 430 м/с потока до 70 % при $v = 150$ м/с. Увеличение скорости потока не влияет на значение величины максимального напряжения на разрядном промежутке,

но ведет к уменьшению полной длины пульсирующего плазменного канала, росту частоты его пульсаций и к росту продольной напряженности электрического поля (рис. 18 – 20).

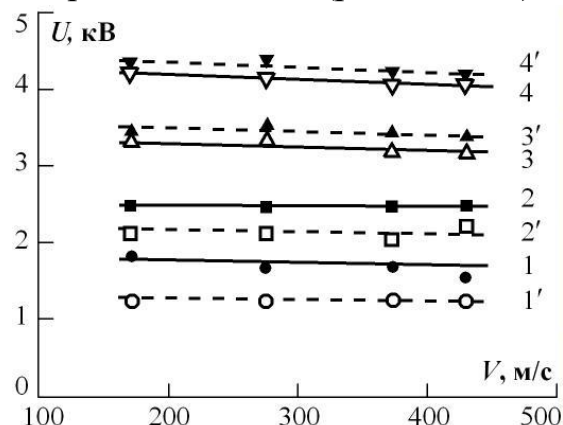


Рис. 18. Зависимость максимально достижимого напряжения на разрядном промежутке от скорости воздушного потока для разрядного тока 5.5 А (сплошные прямые) и 14.5 А (пунктирные прямые) и различных минимальных расстояниях между анодом и катодом d , мм: 1 – 0.2; 2 – 0.4; 3 – 0.6; 4 – 0.8.

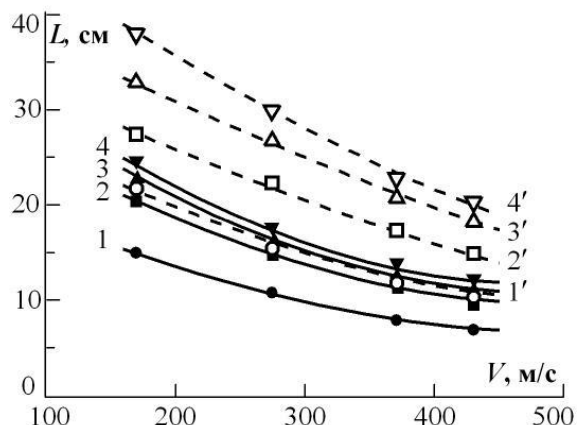


Рис. 19. Зависимость длины плазменного канала от скорости потока воздуха при разрядном токе 5.5 А (сплошные кривые) и 15.5 А (пунктирные кривые) и различных значениях минимального расстояния между анодом и катодом d , мм: 1 – 0.2; 2 – 0.4; 3 – 0.6; 4 – 0.8.

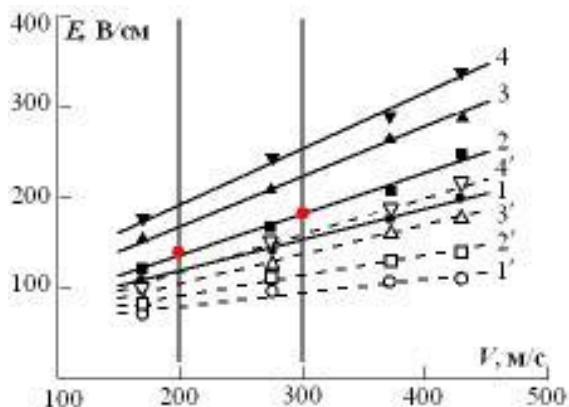


Рис. 20. Зависимость средней по длине канала напряженности продольного электрического поля в плазменной петле от скорости потока воздуха при разрядном токе 5.5 А (сплошные кривые) и $i = 15.5$ А (пунктирные кривые) и различных значениях минимального расстояния между анодом и катодом d , мм: 1 – 0.2; 2 – 0.4; 3 – 0.6; 4 – 0.8.

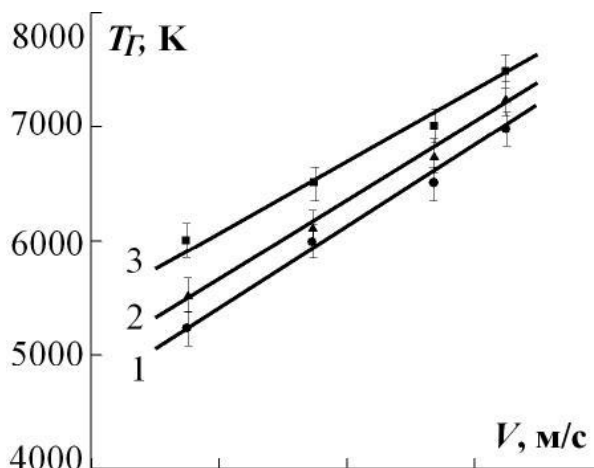


Рис. 21. Зависимость температуры газа от скорости потока на расстоянии $z = 3$ мм от анода при $i = 9.8$ А, d , мм: 1 – 0.35; 2 – 0.5; 3 – 0.7.

Зависимость температуры газа от скорости воздушного потока при разрядном токе $i = 9.8$ А и различных минимальных расстояниях $d_{\min}$ между анодом и катодом представлена на рис. 21. Важность измерения этой характеристики связана с тем, что высокая температура газа в разряде обеспечивает стабильность поджига топливной смеси [А24]. Эксперименты показывают, что

эффективный вторичный пробой между электродами происходит при минимальном расстоянии между катодом и анодом от 0.1 до 1 мм. Несмотря на то, что условия пробоя воздушного потока при расстоянии 0.1 мм выполняются лучше, температура воздуха при более высоких напряжениях оказывается выше, что может обеспечить более быструю инициацию горения воздушно-топливной смеси. Напряженность поля в разряде при этом также растет (рис. 20), что находится в полном согласии с изменением температуры газа.

В **Приложении I** изложена методика расчета колебательно-вращательных спектров в плазме. В **Приложении II** приведены таблицы химического состава равновесной плазмы воздуха, рассчитанные в работах [26–28].

Основные результаты диссертационной работы.

1. Проведено усовершенствование экспериментального стенда, которое позволило исследовать параметры поперечно-продольного разряда в высокоскоростных потоках воздуха в режиме реального времени в условиях характерных для потоков газа в ПВРД. На усовершенствованном стенде исследованы основные параметры разряда в канале при атмосферном давлении и скорости потока от 50 м/с до 500 м/с.

2. Реализован разряд со следующими параметрами: частота пульсаций плазменного канала 50 – 2000 Гц, напряжение на разрядном промежутке от 1000 до 4500 В, длина плазменного канала от 10 до 40 см, диапазон разрядных токов от 4.5 до 16 А, минимальное межэлектродное расстояние от 0.1 до 1.0 мм. Показано, что скорость распространения плазменного канала равна скорости потока.

3. Получены пространственные зависимости концентрации и температуры электронов и нейтрального газа в плазме разряда в потоках воздуха при указанных выше значениях внешних параметров. При постоянной скорости потока рост разрядного тока приводит к увеличению температуры электронов, в частности, с ростом тока от 4.5 А до 16 А при скорости потока 240 м/с, от 10000 К до 15000 К. Температура газа также увеличивается от 6000 до 7000 К. Плотность плазмы также растет от 10^{16} см^{-3} до $2 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

4. Рост скорости потока от 250 м/с до 500 м/с приводит к увеличению температуры газа от 6500 К до 7500 К, а плотности электронов от $2 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ до $4 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Увеличение межэлектродного расстояния также приводит к увеличению нагрева газа.

5. При увеличении скорости потока газа и с ростом расстояния от электродов полученные в эксперименте значения температуры электронов уменьшаются на 1000 -1500 К, при этом разряд существует в любой момент времени без перерывов. Снижение температуры может быть вызвано как постепенным переходом к равновесному состоянию, так и изменением механизмов

заселения уровней и рассогласованием температуры заселения и температуры электронов.

6. Рост скорости потока приводит к увеличению как напряженности электрического поля, так и приведенного электрического поля. Температура газа при этом растет от 5000 до 7500 К, а степень ионизации плазмы от 0.01 при дозвуковой (50 м/с, $M = 0.15$) до 0.3 при сверхзвуковой (500 м/с $M = 1.5$) скорости течения газа. Рост межэлектродного расстояния от 0.35 до 0.7 мм приводит к росту газовой температуры на 10 %.

7. Напряженность электрического поля в разряде и длина плазменного канала определяются скоростью потока, током разряда и минимальным расстоянием между электродами.

8. Экспериментально установлены условия, при которых данный тип разряда позволяет реализовать управляемый миллисекундный нагрев газа до температур воздуха в диапазоне от 4000 К до 8000 К.

Список цитируемой литературы:

1. Van Wie D.. Oral Presentation 7th WIG Summary, 8th WIG Assessment, and Welcome (Review). // Proceedings of 44th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, Nevada, USA, 2006, American Institute of Aeronautics and Astronautics, AIAA-2006-0830. Session 29-WIG-1.
2. Fomin V.M., Tretyakov P.K., Taran J.-P. Flow Control Using Various Plasma and Aerodynamic Approaches (Review). // Aerospace Science and Technology. 2004. V. 8. P. 411.
3. Starikovskaya S. M. Plasma assisted ignition and combustion. (Review)// J. Phys. D: Appl. Phys. 2006. V. 39. No. 16. P. R265-R299.
4. Starikovskii A. Y., Anikin N. B., Kosarev I. N., Mintoussov E. I., Nudnova M. M., Rakitin A. E., Roupasov D. V., Starikovskaia S. M., Zhukov V. P. Nanosecond-pulsed discharges for plasma-assisted combustion and aerodynamics. // Journal of Propulsion and Power. 2008. V. 24. N. 6. P. 1182.
5. Adamovich I. V., Lempert W. R., Rich J. W., Utkin Y. G. Repetitively pulsed nonequilibrium plasmas for magnetohydrodynamic flow control and plasma-assisted combustion. // Journal of Propulsion and Power. 2008. V. 24. No. 6. P. 1198.
6. Jacobsen L. S., Carter C. D., Baurle R. A., Jackson T., Williams S., Barnett J., Tam C.-J., Bivolaru D. Plasma-assisted ignition in scramjets. // Journal of Propulsion and Power. 2008. V. 24, No. 4. P. 641.
7. Shibkov V. M., Aleksandrov A. F., Chernikov V. A., Ershov A. P., Shibkova L. V. Microwave and DC Discharges in High-Speed Flow: Fundamentals and Application to Ignition. // Journal of Propulsion and Power. 2009. V. 25. No. 1. P. 123.
8. Esakov I., Grachev L., Khodataev K., Van.Wie D. Experiments on propane ignition in high-speed airflow using a deeply undercritical microwave discharge. // AIAA Pap. 2004. V. 2004. P.840.

9. Знаменская И.А., Латфуллин Д.Ф., Луцкий А.Е., Мурсенкова И.В., Сысоев Н.Н. Развитие газодинамических возмущений из зоны распределенного поверхностного скользящего разряда. // ЖТФ. 2007. Т. 77. № 5. С.10-18.
10. Копыл П. В., Сурконт О. С., Шибков В. М., Шибкова Л. В. Стабилизация горения жидкого углеводородного топлива с помощью программированного СВЧ-разряда в дозвуковом воздушном потоке. // Физика плазмы. 2012. Т. 38. № 6. С. 551.
11. Казанцев С.Ю., Кононов И.Г., Косый И.А., Тарасова Н.М., Фирсов К.Н. Воспламенение горючей газовой смеси в замкнутом объеме, инициированное свободно локализованной лазерной искрой // Физика плазмы. 2009. Т. 35. № 3. С. 281-288.
12. Александров Н.Л., Киндышева С.В., Кукаев Е.Н., Стариковская С.М., Стариковский А.Ю. Моделирование динамики воспламенения метано-воздушной смеси высоковольтным наносекундным разрядом. // Физика плазмы. 2009. Т. 35. № 10. С. 941-956.
13. Bityurin V., Leonov S., Yarantsev D. and Van Wie D. Hydrocarbon fuel ignition by electric discharge in high-speed flow. // The 4th Workshop on Magnetoplasma Aerodynamics for Aerospace Applications. Moscow, 9 – 11 April 2002. P. 200-210.
14. Sinkevich O.A. Influence of the Electrical Discharges on Ignition of a Combustible Mixture and the Flame Speed. // Proceedings of the 5th International Workshop on Magneto-Plasma Aerodynamics for Aerospace Applications. Moscow, 7 – 10 April 2003, p.300 –302.
15. Константиновский Р.С., Шибков В.М., Шибкова Л.В. Влияние газового разряда на воспламенение водородно-кислородной смеси. // Кинетика и катализ, 2005, №6, с.821-834.
16. Bocharov A., Bityurin V., Klement'eva I., Klimov A. Experimental and numerical study of MHD assisted mixing and combustion. // Proceedings of 44th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2006, Reno, NV, USA, AIAA-2006-1009.
17. Пашенко Н.Т., Райзер Ю.П. Тлеющий разряд в продольном потоке газа // Физика плазмы. 1982. Т. 8. № 5. С. 1086.
18. Финкельнбург В., Меккер Г. Электрические дуги и термическая плазма /Под ред. В.А. Фабриканта. М.: Изд-во иностранной литературы, 1961. 369 с.
19. Ершов А.П. Взаимодействие электрических разрядов со сверхзвуковыми газодинамическими возмущениями. Дисс. д-ра физ.-мат. наук. . М., МГУ имени М.В. Ломоносова, физический факультет, 2006. Гл.3, с. 103.
20. Колесников Е.Б. Взаимодействие плазмы импульсных разрядов со сверхзвуковыми потоками воздуха. Дисс. канд. физ.-мат. наук. . М., МГУ имени М.В. Ломоносова, физический факультет, 2010. Гл.5, с. 113.
21. Каменщиков С.А. Взаимодействие плазмы продольно - поперечного и плазмодинамического разрядов со сверхзвуковым воздушно - пропановым потоком. Дисс. канд. физ.-мат. наук. МГУ имени М.В. Ломоносова, физический факультет, 2011. Гл.5, с. 124 с..

22. Константиновский Р.А. Плазменно-стимулированное воспламенение высокоскоростных воздушно-углеводородных потоков в условиях поверхностного сверхвысокочастотного разряда. Дисс. канд. физ.-мат. наук. МГУ имени М.В. Ломоносова, физический факультет, 2012. 156 с.

23. Копыл П.В. Воспламенение и стабилизация горения углеводородного топлива в высокоскоростных воздушных потоках в условиях низкотемпературной газоразрядной плазмы. Дисс. канд. физ.-мат. наук. МГУ имени М.В. Ломоносова, физический факультет, 2014. 184 с.

24. Артемов О.А. «Прямоточные воздушно-реактивные двигатели», Компания спутник, М.: 2006 г.

25. Смирнов Б.М. Ионы и возбужденные атомы в плазме. М.: Атомиздат 1974.

26. Предводителев А.С., Ступоченко Е.В., Плешанов А.С., Самуйлов Е.В., Рождественский И.Б. Таблицы термодинамических функций воздуха. (для температур от 200 до 6000 К, и давлений 0.00001 до 100 атмосфер). Вычислительный центр АН СССР. М.: 1962 г., 269 с.

27. Предводителев А.С., Ступоченко Е.В., Плешанов А.С., Самуйлов Е.В., Рождественский И.Б. Таблицы термодинамических функций воздуха. (для температур от 6000 до 12000 К, и давлений 0.001 до 1000 атмосфер). Вычислительный центр АН СССР. М.: 1957 г., 302 с.

28. Физика и техника низкотемпературной плазмы. / Под. ред. Дресвина С. В. М.: Атомиздат, 1972 г.

Основные результаты диссертации опубликованы в статьях в реферируемых научных журналах, входящих базы данных WoS, Scopus, RCSI и рекомендованных для защиты в ученых Советах МГУ:

A1. Шибков В.М., Корнев К.Н., Логунов А.А., Нестеренко Ю.К. Нагрев газа в условиях пульсирующего поперечно-продольного разряда в дозвуковых и сверхзвуковых воздушных потоках. Физика плазмы, 2022 г. том 48, № 7, с. 648-656. (ИФ РИНЦ 1,381). DOI: 10.31857/S0367292122100183

Shibkov V.M., Kornev K.N., Logunov A.A., Nesterenko Yu K. Gas heating under conditions of a pulsating transverse-longitudinal discharge in subsonic and supersonic air flows, Plasma Physics Reports, том 48, № 7, с. 798-805. (JIF 0.9). DOI: 10.1134/S1063780X22700246 Авт. вклад 0.5 из 0.8 п.л.

A2. Шибков В.М., Корнев К.Н., Логунов А.А., Нестеренко Ю.К. Концентрация и температура электронов в плазме поперечно-продольного разряда в высокоскоростных потоках воздуха. Физика плазмы, 2022. том 48, № 7, с. 657-663. (ИФ РИНЦ 1,381). DOI: 10.31857/S0367292122100201.

Shibkov V.M., Kornev K.N., Logunov A.A., Nesterenko Yu K. Electron density and temperature in plasma of a transverse-longitudinal discharge in high-speed air flows. Plasma Physics Reports, том 48, № 7, с. 806-811. (JIF 0.9). DOI: 10.1134/S1063780X22700258. Авт. вклад 0.5 из 0.6 п.л.

A3. Логунов А.А., Корнев К.Н., Шибкова Л.В., Шибков В.М. Влияние межэлектродного расстояния на основные характеристики пульсирующего поперечно-продольного разряда в высокоскоростных многокомпонентных

газовых потоках. // Теплофизика высоких температур. 2021. Т. 59. № 1. СС. 22-30. (ИФ РИНЦ 1.064). DOI: 10.31857/S0040364421010117

Logunov A.A., Kornev K.N., Shibkova L.V., and Shibkov V.M. Influence of the Interelectrode Gap on the Main Characteristics of a Pulsating Transverse-Longitudinal Discharge in High-Velocity Multicomponent Gas Flows High Temperature, 2021, Vol. 59, No. 1, pp. 19–26. (JIF 1.0). DOI: 10.1134/S0018151X21010119. Авт. вклад 0.5 из 0.9 п.л.

А4. Нестеренко Ю.К., Корнев К.Н., Логунов А.А., Шибков В.М. Характеристики квазистационарного пульсирующего поперечно-продольного разряда в высокоскоростных пропан-воздушных потоках. // Ученые записки физического факультета Московского Университета. 2021. Т. 2. № 2120601, с. 2120601-1-2120601-5 (ИФ РИНЦ 0,125) Авт. вклад 0.3 из 0.4 п.л.

А5. Shibkova L.V., Shibkov V.M., Logunov A.A., Andrienko A.A., Kornev K.N., Dolbnya D.S. Parameters of electron component in a pulsating discharge in a supersonic airflow. // Journal of Physics: Conference Series. 2019, V. 1394, 012002. (SJР 0.180). DOI:10.1088/1742-6596/1394/1/012002. Авт. вклад 0.3 из 0.5 п.л.

А6. Шибкова Л.В., Шибков В.М., Логунов А.А., Долбня Д.С., Корнев К.Н. Параметры плазмы пульсирующего разряда, создаваемого в высокоскоростных потоках газа. // Теплофизика высоких температур. 2020. Т. 58. № 6. СС. 836-843. (ИФ РИНЦ 1.064)

Shibkova L.V., Shibkov V.M., Logunov A. A., Dolbnya D.S., and Kornev K.N.. Parameters of Pulsed Discharge Plasma in High-Speed Gas Flows. High Temperature, 2020, Vol. 58, No. 6, pp. 754–760. (JIF 1.0). DOI: 10.1134/S0018151X2006019X Авт. вклад 0.4 из 0.8 п.л.

А7. Шибков В. М., Шибкова Л. В., Логунов А.А. Влияние скорости воздушного потока на основные характеристики нестационарного пульсирующего разряда, создаваемого с помощью стационарного источника питания. // Физика плазмы. 2018. Т. 44. № 8. СС. 661-674. (ИФ РИНЦ – 1,381).

Shibkov V.M., Shibkova L.V., and Logunov A.A.. Effect of the Air Flow Velocity on the Characteristics of a Pulsating Discharge Produced by a DC Power Source. Plasma Physics Reports, 2018, Vol. 44, No. 8, pp. 754–765. (JIF 0.9). DOI: 10.1134/S1063780X18080056 Авт. вклад 0.7 из 1.3 п.л.

А8. Шибков В.М., Шибкова Л.В., Логунов А.А. Степень ионизации воздуха в плазме нестационарного пульсирующего разряда в дозвуковых и сверхзвуковых потоках. // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика. Астрономия. 2018. № 5. СС. 43-48. (ИФ РИНЦ 0,514).

Shibkov V.M., Shibkova L.V., and Logunov A. A. The Degree of Air Ionization in a Plasma of a Non-Stationary Pulsating Discharge in Subsonic and Supersonic Flows. Moscow University Physics Bulletin, 2018, Vol. 73, No. 5, pp. 501–506. (JIF 0.4). DOI: 10.3103/S0027134918050168. Авт. вклад 0.4 из 0.7 п.л.

А9. Шибков В.М., Шибкова Л.В., Логунов А.А. Температура электронов в плазме разряда постоянного тока, создаваемого в сверхзвуковом воздушном потоке. // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика. Астрономия. 2017. № 3. СС.75-81. (ИФ РИНЦ 0,514).

Shibkov V.M., Shibkova L.V., and Logunov A.A. The Electron Temperature in the Plasma of a DC Discharge Created in a Supersonic Airflow. Moscow University Physics Bulletin, 2017, Vol. 72, No. 3, pp. 294–300. (JIF 0.4). DOI: 10.3103/S0027134917030109. Авт. вклад 0.4 из 0.7 п.л.

A10. Шибков В.М., Шибкова Л.В., Логунов А.А. Параметры плазмы пульсирующего в сверхзвуковом потоке воздуха разряда постоянного тока. // Физика плазмы. 2017. Т. 43. № 3. Сс. 314-322. (ИФ РИНЦ 1,381).

Shibkov V.M., Shibkova L.V., and Logunov A.A. Parameters of the Plasma of a DC Pulsating Discharge in a Supersonic Air Flow. Plasma Physics Reports, 2017, Vol. 43, No. 3, pp. 373–380. (JIF 0.9). DOI: 10.1134/S1063780X17030114. Авт. вклад 0.4 из 0.9 п.л.

В статьях, сборниках и трудах конференций:

A11. Shibkova L.V., Shibkov V.M., Logunov A.A., Kornev K.N. 2.1 Generation of fast electrons in pulsed discharge plasma in inert and molecular gases. // Proceedings of the 18th Workshop on the Magneto-Plasma Aerodynamics. 2019. Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences. Moscow. V. 18. Pp. 11-14. Авт. вклад 0.1 из 0.3 п.л.

A12. Shibkova L.V., Shibkov V.M., Logunov A.A., Andrienko A.A., Kornev K.N. 2.2 Kinetics of electrons in a pulsating discharge in a supersonic airflow. // Proceedings of the 18th Workshop on the Magneto-Plasma Aerodynamics. 2019. Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences. Moscow. V. 18. Pp. 14-18. Авт. вклад 0.2 из 0.4 п.л.

A13. Shibkov V.M., Shibkova L.V., Logunov A.A., Kokoulin N.M. Air ionization degree of the plasma in a nonstationary pulsed discharge in subsonic and supersonic flows. // Proceedings of the Workshop on Magneto-Plasma Aerodynamics. 2018. Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences. Moscow. V. 17. Pp. 19–22. Авт. вклад 0.1 из 0.3 п.л.

A14. Shibkov V.M., Shibkova L.V., Logunov A.A. Influence of Air Flow Speed on Main Characteristics of Nonstationary Pulsed Discharge, Created with Help of Stationary Power Source. // Proceedings of the 17th Workshop on Magneto-Plasma Aerodynamics. 2018. Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences. Moscow. V. 17. Pp. 15-19. Авт. вклад 0.2 из 0.4 п.л.

A15. Логунов А.А., Шибков В.М., Шибкова Л.В., Андриенко А.А., Кокоулин Н.М. Основные характеристики пульсирующего разряда в дозвуковых и сверхзвуковых воздушных потоках. // В сборнике Ломоносовские чтения – 2017. Секция физики. Подсекция «Газодинамика, термодинамика и ударные волны». 2017. Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова. Физический факультет. Москва. Сс. 256-258. Авт. вклад 0.07 из 0.13 п.л.

A16. Логунов А.А., Шибков В.М., Шибкова Л.В., Андриенко А.А., Кокоулин Н.М. Электродный разряд постоянного тока, создаваемый в потоке воздуха. // В сборнике Научная конференция Ломоносовские чтения – 2017. Секция физики. Подсекция «Газодинамика, термодинамика и ударные волны». 2017. Московский государственный университет имени М.В.

Ломоносова. Физический факультет. Москва. Сс. 253–256. Авт. вклад 0.07 из 0.16 п.л.

A17. Шибков В.М., Шибкова Л.В., Копыл П.В., Логунов А.А., Морозов Р.А., Сурконт О.С. Концентрация и температура электронов в плазме скользящего по электродам разряда, создаваемого в сверхзвуковом потоке газа. // В сборнике Научная конференция Ломоносовские чтения – 2016, Секция физики. Подсекция Газодинамика, термодинамика, ударные волны. 2016. Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова. Физический факультет. Москва. Сс. 206–208. Авт. вклад 0.04 из 0.09 п.л.

В тезисах докладов на конференциях:

A18. Kornev K.N., Nesterenko I.K., Shibkov V.M., Logunov A.A. 7.4 Study of the effect of a magnetic field on the parameters of an arc discharge plasma and its application for the ignition of supersonic propane-air flows. // 20th International Workshop on Magneto-Plasma Aerodynamics. 2021. Abstracts. PP. 8-13. Авт. вклад 0.07 из 0.12 п.л.

A19. Корнев К.Н., Нестеренко Ю.К., Логунов А.А., Шибков В.М. Изучение влияния магнитного поля на параметры плазмы дугового разряда и ее применение для воспламенения сверхзвуковых пропан-воздушных потоков. // В сборнике Материалы Международного молодежного научного форума «Ломоносов-2021», издательство ООО "МАКС Пресс". 2021. Москва, тезисы. Авт. вклад 0.05 из 0.1 п.л.

A20. Шибкова Л.В., Шибков В.М., Константиновский Р.С., Логунов А.А. Кинетическая модель воспламенения и горения углеродсодержащего топлива в условиях неравновесной плазмы комбинированного микроволнового разряда. // В сборнике Научная конференция «Ломоносовские чтения – 2019». Секция физики. 2019. Сборник тезисов докладов, серия Подсекция «Газодинамика, термодинамика и ударные волны». М., Физический факультет МГУ Москва, тезисы. СС. 257-260. Авт. вклад 0.08 из 0.17 п.л.

A21. Логунов А.А., Шибков В.М., Шибкова Л.В., Кокоулин Н.М., Корнев К.Н. Влияние скорости воздушного потока на степень ионизации воздуха в плазме нестационарного пульсирующего разряда. // Научная конференция «Ломоносовские чтения – 2018». Секция физики. 2018. Сборник тезисов докладов, серия Подсекция «Газодинамика, термодинамика и ударные волны». М., Физический факультет МГУ Москва, тезисы. СС. 253-256. Авт. вклад 0.07 из 0.17 п.л.

A22. Shibkov V.M., Shibkova L.V., Logunov A.A., Andrienko A.A., Kokoulin N.M. Direct current discharge, pulsating in the air stream. // 16th International Workshop on Magneto-Plasma Aerodynamics. 2017. Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences. Moscow, abstracts. PP. 36-38. Авт. вклад 0.07 из 0.12 п.л.

A23. Shibkov V.M., Shibkova L.V., Logunov A.A., Andrienko A.A., Kokoulin N.M. Influence of airflow on the basic pulsating discharge characteristics. // 16th International Workshop on Magneto-Plasma Aerodynamics. 2017. Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences. Moscow, abstracts. PP. 40-41. Авт. вклад 0.02 из 0.08 п.л.

A24. Шибков В.М., Шибкова Л.В., Логунов А.А., Андриенко А.А., Кокоулин Н.М. Влияние скорости воздушного потока на основные характеристики пульсирующего разряда. // 16th International Workshop on Magneto-Plasma Aerodynamics. 2017. Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences. Moscow, abstracts. СС. 41-43. Авт. вклад 0.05 из 0.1 п.л.

A25. Логунов А.А., Шибков В.М., Шибкова Л.В., Андриенко А.А., Кокоулин Н.М., Морозов Р.А. Динамика пульсирующего разряда, создаваемого с помощью источника постоянного тока в условиях высокоскоростных воздушных потоков. // В сборнике XLIV Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу. 13 - 17 февраля 2017 г, Плазма ИОФАН. Москва, тезисы. С. 294. Авт. вклад 0.02 из 0.05 п.л.

A26. Шибков В.М., Шибкова Л.В., Логунов А.А., Андриенко А.А., Кокоулин Н.М. Пульсирующий в воздушном потоке разряд постоянного тока. // 16th International Workshop on Magneto-Plasma Aerodynamics. 2017. Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences. Moscow, тезисы. СС. 38-40. Авт. вклад 0.04 из 0.1 п.л.

A27. Shibkov V.M., Shibkova L.V., Kopyl P.V., Logunov A.A., Morozov R.A., Surkont O.S., Kokoulin N.M. Plasma parameters of sliding along the electrodes discharge in a supersonic gas flow. // 15th International Workshop on Magneto-Plasma Aerodynamics. 2016. Moscow, abstracts. Авт. вклад 0.03 из 0.1 п.л.

A28. Шибков В.М., Шибкова Л.В., Копыл П.В., Логунов А.А., Морозов Р.А., Кокоулин Н.М. Параметры плазмы скользящего вдоль электродов пульсирующего разряда, создаваемого в сверхзвуковом воздушном потоке. // В сборнике XLIII Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу. 13 - 17 февраля 2016. Плазма ИОФАН. Москва, тезисы. С. 303. Авт. вклад 0.03 из 0.1 п.л.