

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Корнев Константин Николаевич

**Комбинированный разряд
в воздушных и углеводород-воздушных потоках
и его применение для инициации горения**

Специальность 1.3.9. Физика плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2025

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

**Научные
руководители –**

Шибков Валерий Михайлович,

*доктор физико-математических наук, профессор
Двинин Сергей Александрович,*

доктор физико-математических наук, доцент

**Официальные
оппоненты –**

Шахатов Вячеслав Анатольевич,

доктор физико-математических наук,

*Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева Российской академии наук, лаборатория
№ 14 "Плазмохимии и физикохимии импульсных
процессов", ведущий научный сотрудник,*

Знаменская Ирина Александровна,

*доктор физико-математических наук, профессор,
МГУ имени М.В.Ломоносова, физический факуль-
тет, кафедра молекулярных процессов и экстре-
мальных состояний вещества, профессор,*

Фирсов Александр Александрович,

кандидат физико-математических наук,

*Объединенный институт высоких температур
Российской академии наук, лаборатория 21.3
«Плазменной аэродинамики и стимулированного
горения», старший научный сотрудник*

Защита диссертации состоится «18» сентября 2025 года в 17-00 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.

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/3489>

Автореферат разослан «___» _____ 2025 года

Ученый секретарь

диссертационного совета МГУ.013.7.

кандидат физико-математических наук

И.Н. Карташов

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Введение

Актуальность и степень разработанности темы. Низкотемпературная плазма газовых разрядов находит широкое применение в научных исследованиях и различных технологических приложениях [1]. Разряды в газовых потоках исследуются на протяжении последних лет в рамках задач плазменной аэродинамики и плазменно-стимулированного горения [2].

Современные разработки в области прямоточных воздушно-реактивных двигателей (ПВРД) со сверхзвуковыми скоростями потока направлены на поиск технологий, способных повысить скорость горения и обеспечить полное сжигание топлива без использования механических стабилизаторов, создающих повышенную тепловую нагрузку. Одним из перспективных методов является применение электрических разрядов, что впервые было предложено в [3] и подтверждается многочисленными исследованиями [4–8], демонстрирующими эффективность газоразрядной плазмы как для воспламенения высокоскоростных топливных смесей, так и для управления обтеканием тел в дозвуковых и сверхзвуковых потоках. Особенностью этого направления исследований является разнообразие конструктивных решений разрядных систем: большое количество типов разряда (частотный диапазон, мощность) и их расположений в потоке (на поверхности стенок, на специальной формы пилонах или в кавернах).

Актуальность данной работы обусловлена необходимостью разработки новых методов управления горением в высокоскоростных топливно-воздушных смесях. Показано [9,10], что применение таких газовых разрядов как СВЧ разряд и разряд постоянного тока (РПТ), эффективно для решения задач плазменно-стимулированного горения и плазменной аэродинамики, хотя и не лишено определенных недостатков. В рамках исследования рассматривается комбинированный разряд (КР), который состоит из двух и более различных разрядов и сочетает в себе свойства составляющих его разрядов. Такое объединение разрядов, образующих плазму с различными свойствами, например, термическую и холодную неравновесную, может позволить совместно использовать их преимущества или быть использовано с целью управления комбинированным разрядом. Одна из важнейших задач плазменно-стимулированного горения – минимизация времени инициирования горения, которое может достигаться либо за счет автовоспламенения, либо посредством нетепловой генерации радикалов с помощью внешнего энергетического воздействия. В работе [7] показано, что разряд позволяет существенно уменьшить время инициации горения. Для наносекундных разрядов при атмосферном давлении при этом необходимо достичь плотностей электронов $\sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$ и активных частиц $\sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Температура газа при этом не превышает 800 К, что ниже температуры автовоспламенения. Низкотемпера-

турная плазма комбинированного разряда позволяет добиваться ускорения процессов воспламенения за счет обоих механизмов. В работе исследуются возможности воспламенения высокоскоростных газовых потоков комбинированным разрядом и его потенциальные преимущества и недостатки в решении описанных выше задач по сравнению с разрядами других типов.

Объект исследования – комбинированный (СВЧ и постоянно-токовый) разряд, а также иницируемый СВЧ разряд и продольно-поперечный разряд постоянного тока, как его составные части, и создаваемая ими плазма в высокоскоростных (50-250 м/с) воздушных и пропан-воздушных потоках.

Низкотемпературная плазма исследуемых типов разрядов отличается высокой плотностью как заряженных, так и возбужденных частиц, и свободных радикалов, что является благоприятным условием для инициации и поддержания горения топлив при высоких скоростях потоков.

Предмет исследования – основные параметры указанных выше типов разрядов и создаваемой ими плазмы.

Цель работы – выявление преимуществ и недостатков использования комбинированного разряда для плазменно-стимулированного воспламенения высокоскоростных углеводород-воздушных потоков.

Для достижения указанной цели в рамках настоящей работы были поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Экспериментальное исследование основных характеристик разряда постоянного тока: его пространственно-временной эволюции, электрических характеристик (вольтамперных характеристик, квазичастоты, напряженности поля) и свойств плазмы (температуры и плотности электронов, температуры газа, степени ионизации) как функций внешних параметров потока: скорости течения газа, его давления и состава.

2. Экспериментальное исследование основных характеристик иницируемого СВЧ разряда: его структуры, поглощаемой СВЧ мощности и свойств плазмы (температуры и плотности электронов, температуры газа, степени ионизации) как функции тех же внешних параметров потока.

3. Экспериментальное исследование основных характеристик комбинированного разряда: его пространственно-временной эволюции, электрических характеристик (вольтамперных характеристик, квазичастоты, напряженности поля) и свойств плазмы (температуры и плотности электронов, температуры газа, степени ионизации) как функций тех же внешних параметров потока, а также отношения вкладываемых в разряд мощностей СВЧ и постоянного тока.

4. Сравнение полученных для трех разрядов результатов и получение вывода об использовании комбинированного разряда для плазменно-

стимулированного воспламенения высокоскоростных углеводород-воздушных потоков.

Методология исследования. Для решения поставленных задач был подготовлен экспериментальный стенд, позволяющий создавать исследуемые в работе разряды в контролируемых воздушных и пропан-воздушных потоках. Для определения электрических характеристик разрядов использовались методы осциллографии и высокоскоростной видеосъемки. Параметры плазмы – плотность, температура электронов и температура газа – измерялись бесконтактным методом оптической эмиссионной спектроскопии. Использовались цифровые приборы: спектрометр, осциллограф, компьютер. Обработка спектров и других данных велась в том числе с помощью языка программирования Python.

Научная новизна работы заключается в следующем.

1. Впервые измерены основные параметры нестационарного комбинированного разряда в высокоскоростном (50-250 м/с) воздушном и пропан-воздушном потоках при атмосферном давлении окружающего газа: вольтамперные характеристики, квазичастота, напряженность поля, свойства плазмы (температура и плотность электронов, температура газа, степень ионизации) и его пространственно-временная эволюция как функции скорости потока, разрядного тока и продольной (вниз по потоку) координаты, отношения вкладываемых мощностей СВЧ и постоянного тока в диапазоне рабочих токов постоянно-токового разряда 1–5 А и мощности СВЧ волны до 6.5 кВт.

2. Впервые экспериментально подтверждена пространственная неоднородность плазмы продольно-поперечного разряда, связанная с радиальным распределением температур и состава плазменного канала разряда, и определены области пространственной локализации различных химических компонент (атомарного азота N, NH, ионов N_2^+ , гидроксидов OH и атомарного кислорода O) и обнаружено их несовпадение. Этот факт ранее не учитывался при исследованиях продольно-поперечного разряда и построении его моделей.

3. Впервые экспериментально обнаружены феноменологические отличия комбинированного разряда от продольно-поперечного и СВЧ разрядов как частных его случаев. Одно из отличий (одновременное развитие СВЧ стримеров и дуги типа скользящего разряда) дает возможность квазинепрерывной обработки газового потока комбинированным разрядом при помощи скоростной видеосъемки, что также ранее не демонстрировалось.

4. Впервые для нестационарного комбинированного разряда в высокоскоростном (50-250 м/с) воздушном потоке показано влияние поляризации внешнего СВЧ поля на плотность электронов в плазменном канале. Эф-

фективное воздействие поле оказывает на участки разряда, ориентированные вдоль него.

5. Впервые экспериментально продемонстрирована возможность использования комбинированного разряда для воспламенения высокоскоростных (50-250 м/с) топливно-воздушных смесей в макете камеры сгорания прямоточных двигателей.

Достоверность и обоснованность результатов. Плазма разрядов исследовалась несколькими независимыми методами. Преимущественно отдавалось предпочтение бесконтактным оптическим методам диагностики плазмы. Результаты экспериментов при одинаковых условиях дают совпадающие с точностью до ошибок эксперимента и теоретической точности методов диагностики результаты. Проводилась оценка погрешностей получаемых в эксперименте величин. Сравнение их с результатами работ других исследователей также показывает их хорошее согласие. При выборе методов оптической диагностики автор проводил тщательную проверку применимости их исходных предположений. Основные результаты диссертации обсуждались на ряде российских и международных конференций и опубликованы в высокорейтинговых научных журналах. Это позволяет считать полученные результаты обоснованными и достоверными.

Положения, выносимые на защиту.

1. Комбинированный разряд может быть реализован в потоке воздуха и его смеси с пропаном при атмосферном давлении при скоростях потока от 50 до 250 м/с в диапазоне постоянного тока от 1 до 15 А и подводимых СВЧ (2.45 ГГц) мощностей от 1 до 5 кВт. Комбинированный разряд отличаются меньшая напряженность поля и квазичастота и большая эффективная длина по сравнению с разрядом постоянного тока. В указанных условиях различие может быть до 2 раз.

2. Характерные радиусы сечения продольно-поперечного разряда, из которого исходит оптическое излучение линий частиц O, OH, N₂⁺, NH, N различны и изменяются в пределах 0.8-2.1 мм, что говорит о радиальной неоднородности состава плазмы разряда.

3. Комбинированный разряд отличается от разряда постоянного тока в поперечном потоке возможностью следующих процессов: прораствание СВЧ стримеров, неоднородность свечения плазменного канала, поддержание существования незамкнутых на электроды плазменных каналов.

4. Плазма разряда постоянного тока при расположении концов электродов на оси волновода служит инициатором развития СВЧ стримеров, что облегчает инициацию СВЧ разряда при давлениях порядка атмосферного.

5. В комбинированном разряде достигаются высокая газовая температура 6000-9000 К и концентрация электронов $\sim 10^{15}$ см⁻³, что позволяет воспламенять и поддерживать горение потока бедной (с отношением доли про-

пана к стехиометрической Φ равной 0.7) пропан-воздушной смеси со скоростями 50-250 м/с. При наличии СВЧ стримеров на концах электродов в комбинированном разряде осуществляется непрерывный режим обработки потока плазмой разряда.

Научная и практическая ценность работы.

Научная значимость состоит в том, что полученные результаты могут быть использованы для развития и разработки новых физико-математических моделей пространственно-неоднородных неравновесных разрядов в быстро движущихся газовых средах.

Практическая значимость заключается в том, что результаты могут быть полезны для создания технологий использования газоразрядной плазмы в летательных аппаратах нового поколения. В частности, показано, что разряды могут применяться для быстрого воспламенения и стабилизации горения в высокоскоростных воздушно-углеводородных потоках в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей. Результаты, полученные автором и вошедшие в диссертацию, вошли в отчеты по грантам РФФИ (№23-22-00233), РФФИ (№18-02-00336\18), а также госбюджетной теме «Актуальные проблемы физики неравновесной плазмы» (№АААА-А16-116021560426-0).

Личный вклад автора.

Вклад автора в работы, вошедшие в диссертацию, а также написанные в соавторстве, является ключевым. Автором лично были подготовлены и проведены эксперименты по исследованию плазмы комбинированного, а также СВЧ и постоянно-токового разрядов в потоках газа. Автор лично проводил обработку экспериментальных данных и выполнял анализ полученных результатов. Автор лично проводил численное моделирование некоторых аспектов экспериментов.

Апробация работы.

Основные результаты диссертации были представлены соискателем на научных семинарах кафедры физической электроники физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, ИНХС РАН, ОИВТ РАН, а также в 12 докладах на российских и международных конференциях:

- Международном Совещании по Магнитоплазменной Аэродинамике (ОИВТ РАН, Москва, 2023-2025),
- Международной Звенигородской конференцией по физике плазмы и УТС (Звенигород, 2024-2025),
- Международном симпозиуме по теоретической и прикладной плазмохимии (Иваново, 2024),
- научных конференциях МГУ «Ломоносовские чтения», секция Физики (Москва, 2022-2025),
- Международных научных конференциях студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов» (Москва, 2021, 2025).

Публикации.

По материалам диссертации было опубликовано 5 [A1-A5] статей в рецензируемых научных журналах, индексируемых в RSCI, Scopus, Web of Science.

Объем и структура работы.

Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения и 2 приложений. Общий объем диссертации 168 страниц печатного текста, включающих 73 рисунка и 25 таблиц. Библиография содержит 143 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 приведен обзор работ, посвященных экспериментальному изучению разрядов, представляющих интерес для диссертации: надпороговый и подпороговый СВЧ разряды, продольный и продольно-поперечный разряды постоянного тока, комбинированные разряды. Рассматриваются работы, в которых эти разряды применяются для решения задач плазменной аэродинамики и плазменно-стимулированного горения.

Во второй главе [A1-A5] описываются используемая экспериментальная установка и методики измерений. Схема установки приведена на рис. 1.

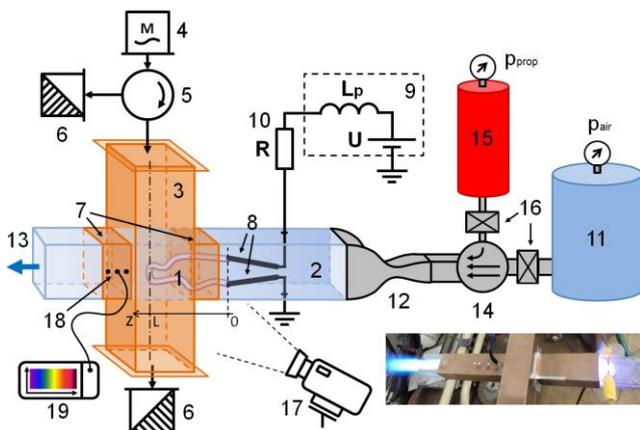


Рисунок 1. Схема экспериментальной установки в модификации для изучения комбинированного разряда. 1 – комбинированный разряд, 2 – аэродинамический канал, 3 – тестовая секция волновода, 4 – СВЧ магнетрон, 5 – циркулятор, 6 – нагрузка, 7 – запредельные волноводы, 8 – электроды, 9 – источник постоянного тока, 10 – балластное сопротивление, 11 – баллон сжатого воздуха, 12 – сопло Лавалья, 13 – выходное сечение канала, 14 – смеситель, 15 – баллон пропана, 16 – клапаны, 17 – высокоскоростная видеокамера, 18 – диагностические отверстия, 19 – спектрометр.

Диагностика плазмы производилась преимущественно бесконтактным методом оптической эмиссионной спектроскопии. Также производились измерения электрических характеристик разрядов при помощи цифровых осциллографов и их высокоскоростная видеосъемка. Оптические спектры излу-

чения разряда измерялись с помощью шестиканального спектрометра Ocean Optics S2000TR. Высокоскоростная съемка (частота кадров 10000-20000 к/с) велась при помощи камеры «Видеоспринт». Регистрация спектров происходила с помощью кварцевого оптоволоконна через несколько сквозных отверстий в стенке аэродинамического канала. Газовая температура определялась по сопоставлению экспериментально получаемых и рассчитываемых спектров молекулярных полос N_2 , N_2^+ , NH, CN, OH. Использовались как специализированные программы, так и собственный код на языке Python. Определение концентрации электронов в плазме разрядов в высокоскоростном воздушном потоке производилось по измерению уширения линий водорода H_α и H_β серии Бальмера ($\lambda_{H\alpha}=656.3$ нм, $\lambda_{H\beta}=486.1$ нм). Температура электронов оценивалась методом относительных интенсивностей атомных линий меди, а также сравнивалась с расчетами в BOLSIG. В главе также указаны методы определения газодинамических параметров потока и измерения поглощаемой СВЧ разрядом мощности. Анализируются условия применимости используемых методов, оценивается их погрешность.

В третьей главе [A4, A5] представлены результаты вспомогательных численных расчетов: распределений поля в элементах СВЧ тракта, аэродинамических течений в канале экспериментальной установки и кинетики плазмы постоянно-токового и СВЧ разрядов в 0-мерном приближении. Эти расчеты (и полученные оценки свойств плазмы и газовых потоков) хоть и являются приближенными, но полезны с точки зрения интерпретации экспериментальных результатов.

Целью численных расчетов элементов СВЧ тракта установки было изучение особенностей согласования тестовой волноводной секции с генератором. Из-за наличия металлического стержневого инициатора в тракте наблюдается сильное отражение падающей СВЧ волны при определенных длинах инициатора. Расчет позволил определить оптимальный размер инициатора (в силу наличия плазмы он может отличаться от половины длины волны) и обеспечить оптимальные условия вложения энергии в плазму.

При моделировании газовых течений были получены трехмерные распределения скорости, температуры и давления в сверхзвуковом воздушном потоке. При этом были применены 2 простейшие модели разряда: разряд как стационарная зона тепловыделения и модель разряда как канала с выделением мощности за счет джоулева нагрева. В первой модели разряд представлял собой неподвижную выделенную группу ячеек расчетной сетки объемом $2 \times 1 \times 9$ мм³, в которых задавался дополнительный источник тепла с фиксированной плотностью мощности. Во второй модели задавался полный ток через разряд, а его проводимость рассчитывалась в предположении о равновесности плазмы, что представляет собой очень приближенную модель,

тем не менее, полезную при проведении качественных оценок. Инициация разряда в этом случае производилась ручной установкой между электродами токопроводящего нагретого канала диаметром 1 мм. С помощью экспериментальных данных – давлений на стенку и создаваемой каналом тяги – была проведена проверка аэродинамической модели в случае отсутствия зоны объемного тепловыделения. Даже в отсутствие разряда в потоке происходят такие явления как отрыв течения от стенок с последующим образованием системы ударных волн, зон рециркуляции и торможением потока до дозвуковых скоростей. Наблюдаются значительные потери полного давления p_{total} в потоке в основном в трех местах: на стенках канала, на ударной волне от электрода и на области тепловыделения (снижение на 70%). Потери полного давления нежелательны с точки зрения работы ПВРД.

Из расчетов следует, что при плотности тепловой мощности источника $w=1.4-2.8 \times 10^{11}$ Вт/м³ (эквивалентной средней общей мощности разряда $W=10-20$ кВт) разряд нагревает газ до 4000-6700 К. При высоких плотностях мощности может происходить тепловое запыряние потока. Была также исследована модель разряда с силой тока 10 А. Рассмотрена его эволюция в диапазоне времени t до 20 мкс (рис. 2).

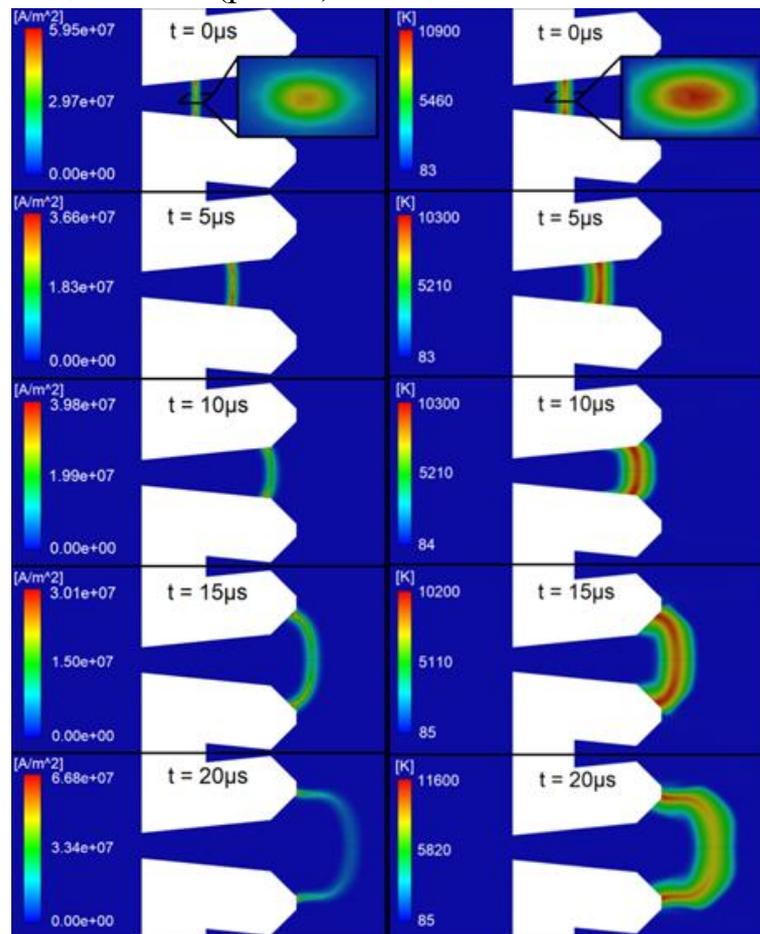


Рисунок 2. Контуры плотности тока (слева) и статической температуры (справа) в моменты времени $t = 0; 5; 10; 15; 20$ мкс в плоскости центрального сечения канала. Укороченные электроды.

Разряд в виде тонкого ~ 1 мм горячего канала движется практически со скоростью основного сверхзвукового воздушного потока около 670 м/с. Температура воздуха T в центре разряда 8000-10000 К, характерная плотность тока $j=1-5 \times 10^3$ А/см². Были сделаны оценки концентрации электронов $n_e \sim 10^{16}$ см⁻³, напряженности поля $E \sim 125$ В/см, приведенного поля $E/N \sim 30$ Тд. При постоянном разрядном токе 10 А выделяемая в разряде тепловая мощность составляет около 1250 Вт/см. В конфигурации аэродинамической модели с укороченными электродами показаны переход к фазе, когда разряд закреплен на их концах, и искривление изначально прямого проводящего канала, схожее с наблюдаемым в эксперименте.

Четвертая глава [А3] посвящена анализу экспериментов с глубоко подкритическим СВЧ разрядом в высокоскоростных 150–250 м/с воздушных потоках, создаваемом на полуволновом вибраторе с помощью магнетронного СВЧ генератора частотой 2.45 ГГц непрерывного действия мощностью до 5 кВт. С помощью высокоскоростной видеосъемки разряда изучена структура, определены диаметр и длина плазменного канала стационарного разряда в зависимости от скорости и давления в потоке. На рис. 3 представлены фотографии разряда, показывающие его структуру.

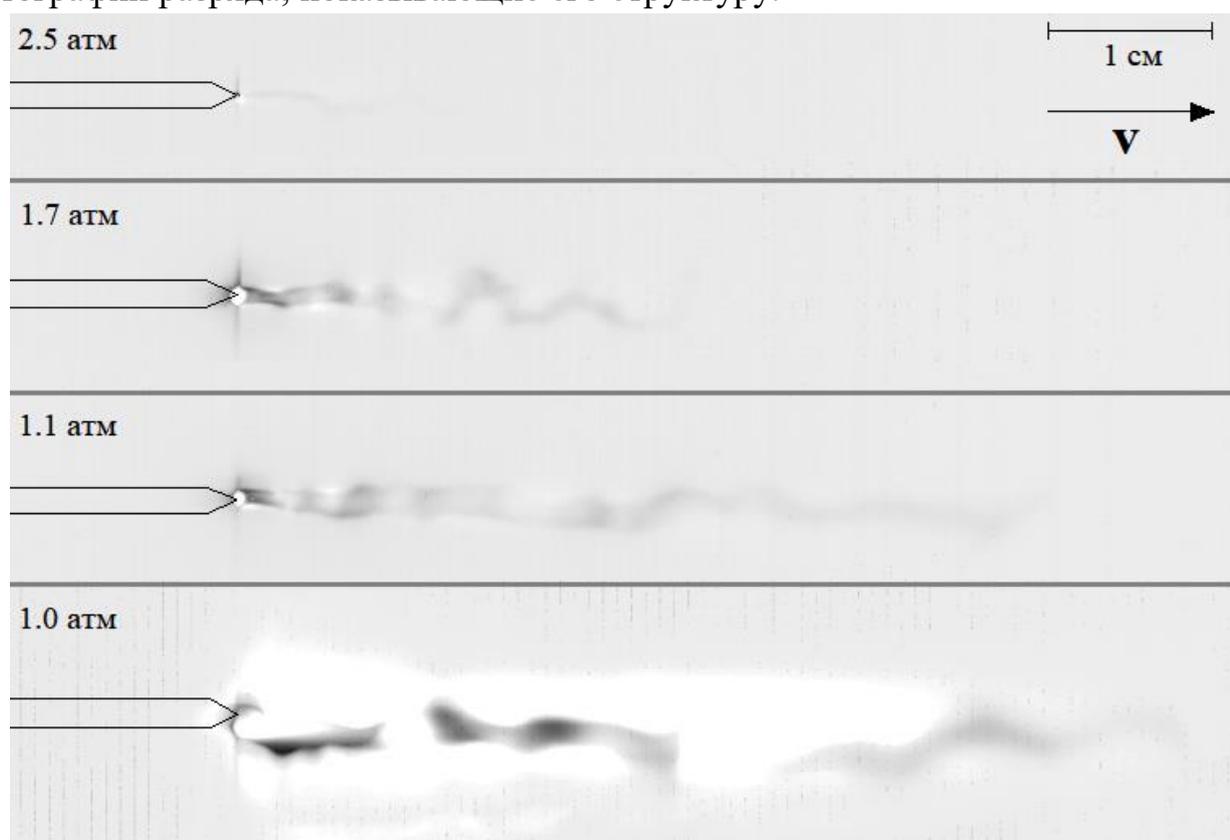


Рисунок 3. Сборка кадров видеосъемки СВЧ разряда при различных давлениях в потоке p_{low} . Экспозиция 2 мкс.

Зависимости диаметра и длины разряда от давления объясняются различными значениями E/N . При этом зафиксировано изменение порога пробоя, но точное его определение затруднено из-за разброса радиуса острия

инициатора. Начальные стадии развития СВЧ стримеров с имеющимся оборудованием при видеосъемке зафиксированы не были. По полученным оптическим спектрам определена концентрация электронов $n_e \sim (1 \div 2) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, колебательная и вращательная температуры газа $T_v \approx 8500 \text{ К}$, $T_e \approx T_r \approx 5500 \text{ К}$. Степень ионизации α при этом достаточно высока и составляет 10^{-3} . Экспериментально показана возможность использования СВЧ разряда для воспламенения топливно-воздушных смесей в камерах сгорания прямоточных двигателей. На оптических спектрах при инъекции пропана наблюдаются интенсивные молекулярные полосы $\text{OH}(\text{A-X})$ и $\text{CH}(\text{A-X})$, а также «фиолетовая» система $\text{CN}(\text{B-X})$. При этом не наблюдаются полосы Свана C_2 и образование сажи. Также сильно снижается интенсивность линий атомарного кислорода O (777.4 нм), что объясняется участием его в реакциях окисления пропана.

В пятой главе [A2] представлены результаты экспериментальных исследований продольно-поперечного разряда в области относительно малых токов (1-5 А) в воздушных потоках со скоростью 100-250 м/с и давлением 1-1.6 атм. При покадровой обработке высокоскоростных видео и последующей временной синхронизации их с осциллограммами получены зависимости средних напряженности поля E и производных величин: погонной мощности P , приведенной напряженности поля E/p от тока разряда i и давления p_0 . Величина поля меняется от 100 В/см до 600 В/см и достигает максимального значения при $p_0 = 4$ атм и токе 1 А. Концентрация электронов n_e при этом снижается с 10^{15} см^{-3} до 10^{14} см^{-3} . Аппроксимацией наблюдающихся на оптических спектрах разряда в воздухе интенсивных молекулярных полос $\text{OH}(\text{A-X})$, $\text{N}_2(\text{B-A})$, $\text{N}_2(\text{C-B})$, $\text{N}_2^+(\text{B-X})$, $\text{NH}(\text{A-X})$, $\text{CN}(\text{B-X})$ оценена температура газа, которая составляет 5000-7500 К и растет с увеличением силы тока, а также колебательная температура T_v , составляющая 7000-8500 К.

Были проведены время-разрешенные спектральные измерения с помощью ФЭУ, при этом были определены характерные радиусы сечения продольно-поперечного разряда, из которого исходит излучение на определенных длинах волн, соответствующих наблюдаемым на оптических спектрах частицам O , OH , N_2^+ , NH , N , важных с точки зрения кинетики плазмы разряда. Схема измерений представлена на рис. 4, а результаты на рис. 5. Наименьший радиус у атомарного азота 0.8 ± 0.4 мм, наибольший – у атомарного кислорода 2.1 ± 0.8 мм, что объясняется наличием радиального градиента температуры в разряде и подтверждается результатами моделирования в других научных группах.

Эксперимент показал, что при инъекции в воздушный поток пропана он воспламеняется продольно-поперечным разрядом, а на спектрах наблюдаются интенсивные молекулярные полосы продуктов окисления углеводородов: $\text{OH}(\text{A-X})$, $\text{CN}(\text{B-X})$, $\text{CH}(\text{A-X})$. Измерения при помощи ФЭУ показали, что горение носит импульсный характер и локализовано вблизи плазмен-

ного канала, где и наблюдается наибольшая концентрация химически активных частиц, таких как атомарный кислород O. Из-за этого достаточно большая доля потока может не воспламеняться.

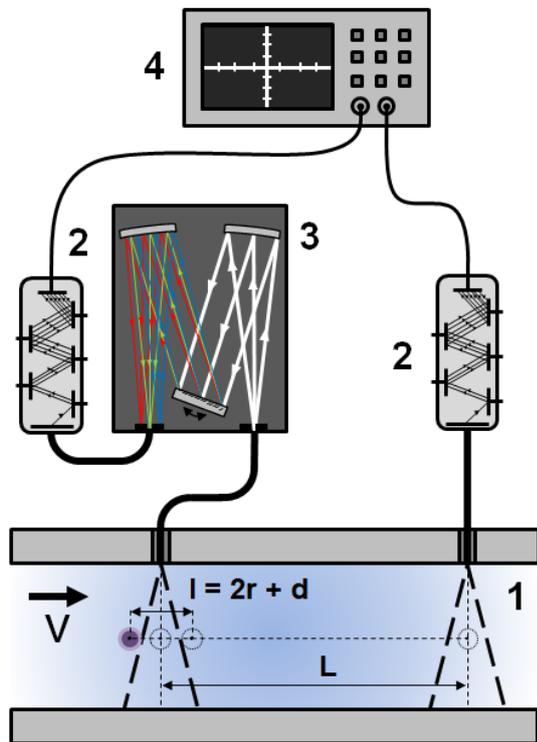


Рисунок 4. Схема разрешенных по времени спектральных измерений с помощью ФЭУ и монохроматора. 1 – аэродинамический канал, 2 – ФЭУ, 3 – монохроматор, 4 – осциллограф.

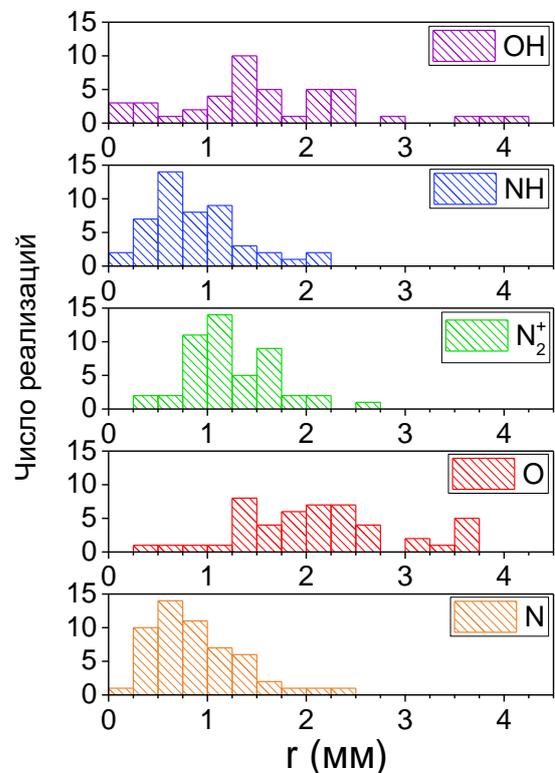


Рисунок 5. Гистограмма характерных радиусов сечения, из которого излучают N, NH, N₂⁺, OH и O, измеренных независимо. Ток разряда 5 А, p₀ = 2 атм. Скорость потока 90 м/с

Из изложенного следует, что для использования продольно-поперечного разряда в задачах плазменно-стимулированного горения нет необходимости повышать разрядный ток, так как при меньшей в разы вкладываемой мощности температура газа на оси разряда также превышает 5000 К, что достаточно для воспламенения потока. При этом повышается поле E , что ускоряет реакции диссоциации и возбуждения молекул электронами. Поскольку радиус сечения разряда, где протекает ток и велика концентрация химически активных частиц, мал и составляет ~ 1 мм, необходимо стремиться к большей частоте разряда: увеличивается доля объема газа, обрабатываемая им.

В шестой главе [A1] приведены результаты экспериментального изучения комбинированного разряда, формируемого при одновременном воздействии переменного СВЧ и постоянного токов, в высокоскоростных воздушных потоках. При видеосъемке комбинированного разряда обнаружены необычные для РПТ в поперечном потоке эффекты,

продемонстрированные на рис. 6:

1. На кадре 3 рис. 6(a) наблюдается неравномерная по длине столба яркость разряда.

2. СВЧ волна поддерживает более длительное свечение рекомбинирующей плазмы во время её движения через зону СВЧ поля (кадры 3,4 на рис. 6(b), а также кадр 4 на рис. 6(a)).

3. Появление незамкнутых СВЧ стримеров на концах электродов, в то время как новый плазменный канал уже сформировался (кадры 3,4,8 на рис. 6(e)). Это происходит при малых расстояниях $L < 2.25$ см, когда концы электродов находятся в области наиболее интенсивного СВЧ поля.

4. Развитие СВЧ стримеров из середины разрядной петли (кадры 4–9 на рис. 6(c)), образование тройных соединений. При определённых длинах проводящего плазменного канала и электродов они становятся эффективной антенной. В этом случае может происходить активное разрастание сети плазменных каналов. Такое обычно наблюдается в случае подкритических СВЧ разрядов.

5. Пробой происходит не только по минимальному межэлектродному промежутку, но и между анодной и катодной частями положительного столба (кадр 7 на рис. 6(d)). Это одна из причин, по которой разряд характеризуется квазичастотой, которая в основном зависит от скорости потока и расстояния между электродами.

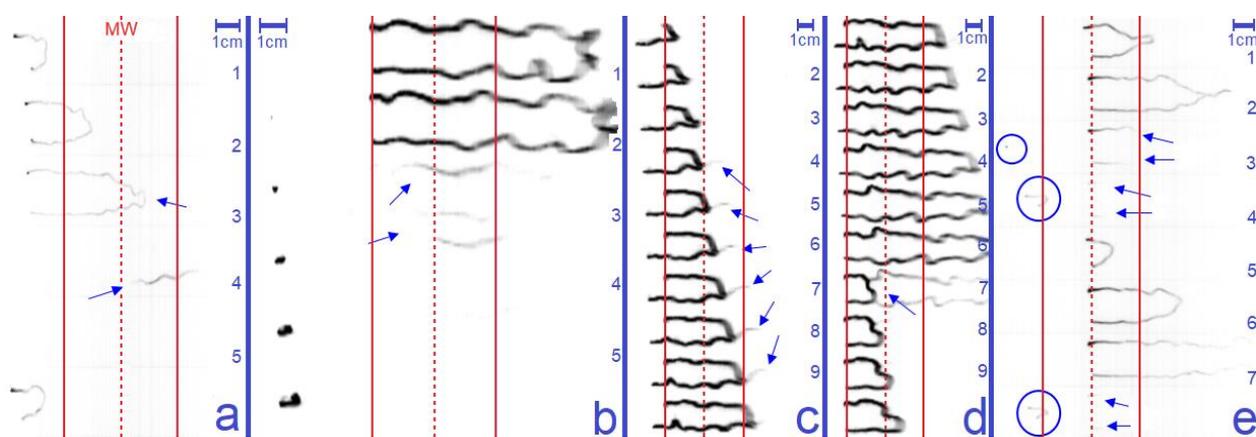


Рисунок 6. Сборки последовательных кадров видеосъемки комбинированного разряда при мощности СВЧ 5 кВт и $i = 1$ А, $p_{air} = 1.3$ атм, $L = 3.5$ см, частоте кадров 2500 к/с, экспозиции 12 мкс (a), $i = 5$ А, $p_{air} = 1.5$ атм, $L = 2.25$ см, частоте кадров 20000 к/с, экспозиции 44 мкс (b), $i = 5$ А, $p_{air} = 1.5$ атм, $L = 2.25$ см, частоте кадров 20000 к/с, экспозиции 44 мкс (c, d), $i = 1$ А, $p_{air} = 1.3$ атм, $L = 0$ см, частоте кадров 2500 к/с, экспозиции 12 мкс (e). Поток направлен слева направо. СВЧ поле поляризовано в том же направлении. Красные линии показывают положение СВЧ волновода (сплошные линии – стенки, пунктирные – центр).

Визуальное влияние СВЧ поля на РПТ происходит при сопоставимых мощностях СВЧ и РПТ. Методом синхронизации осциллограмм и видеосъемки сделаны оценки поля в РПТ и комбинированном разряде. Комбинированный разряд отличают меньшее поле и квазичастота и большая

эффективная длина по сравнению с РПТ. Воздействие поляризованного СВЧ излучения на продольно-поперечный разряд различно на продольные и поперечные его участки, а также зависит от соотношения глубины его проникновения и радиуса плазменного канала. Показано, что в комбинированном разряде достигаются высокая газовая температура $\sim 6000-9000$ К и концентрация электронов $\sim 10^{15}$ см^{-3} , что благоприятно для задач плазменно-стимулированного горения. Зависимости плотности электронов в комбинированном разряде от разрядного тока, электрические характеристики (напряженность поля, квазичастота разряда) и вращательная и колебательная температуры газа в нем как функции разрядного тока и давления воздуха в ресивере показаны на рис. 7, 8 и 9 соответственно.

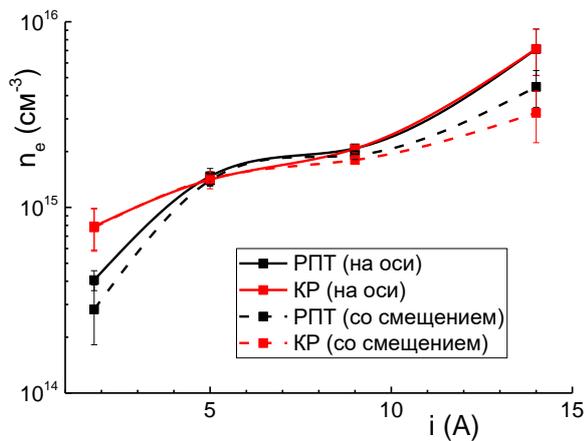


Рисунок 7. Зависимость концентрации электронов n_e в КР (красные) и РПТ (черные) от тока i при мощности СВЧ 5 кВт, давлении $p_0=1.5$ атм и отступе $L=2.25$ см. Сплошные линии – измерения на оси канала, пунктирные – через смещенные от центра стенки отверстия.

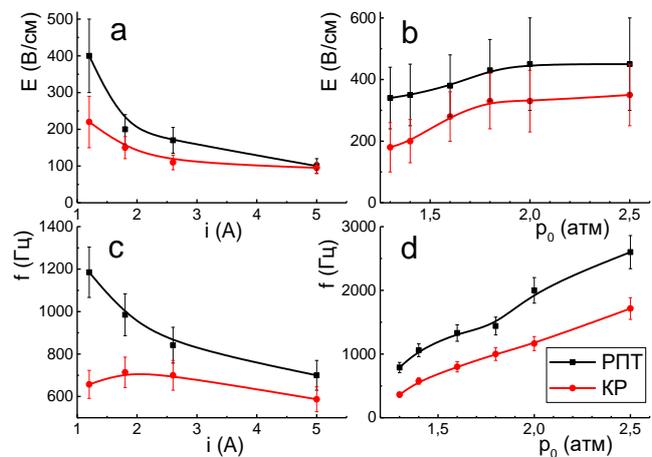


Рисунок 8. ВАХ разряда при $p_0=1.5$ атм (а), зависимость поля E от p_0 при $i=1$ А (б), зависимость квазичастоты f от i при $p_0=1.5$ атм (с), зависимость квазичастоты f от p_0 при $i=1$ А (д). Измерения в КР (красные) и РПТ (черные). Все измерения выполнены при мощности СВЧ 5 кВт и отступе $L=2.25$ см.

Воздействие внешнего СВЧ поля на сильноточный РПТ в потоках может быть использовано для контроля параметров плазмы разряда при относительно малых дополнительных вложениях мощности. Плазма РПТ может быть использована для инициации СВЧ разряда на концах электродов. В этом случае нет необходимости сильно заострять их концы для достижения пробойного поля при высоких давлениях. После выключения источника постоянного тока СВЧ разряд может быть поддержан внешним СВЧ полем. Наличие СВЧ стримеров на концах электродов в КР позволяет осуществлять непрерывный поджиг потока, в отличие от чистого РПТ: в скользящем разряде из-за квазипериодичности остаются участки потока, необработываемые им. Экспериментально показано, что как РПТ, так и КР, позволяют воспламенять и поддерживать горение потока бедной

(эквивалентное отношение $\Phi=0.7$) пропан-воздушной смеси со скоростями 50-250 м/с. Фото воспламененного пропан-воздушного потока представлено на рис. 10.

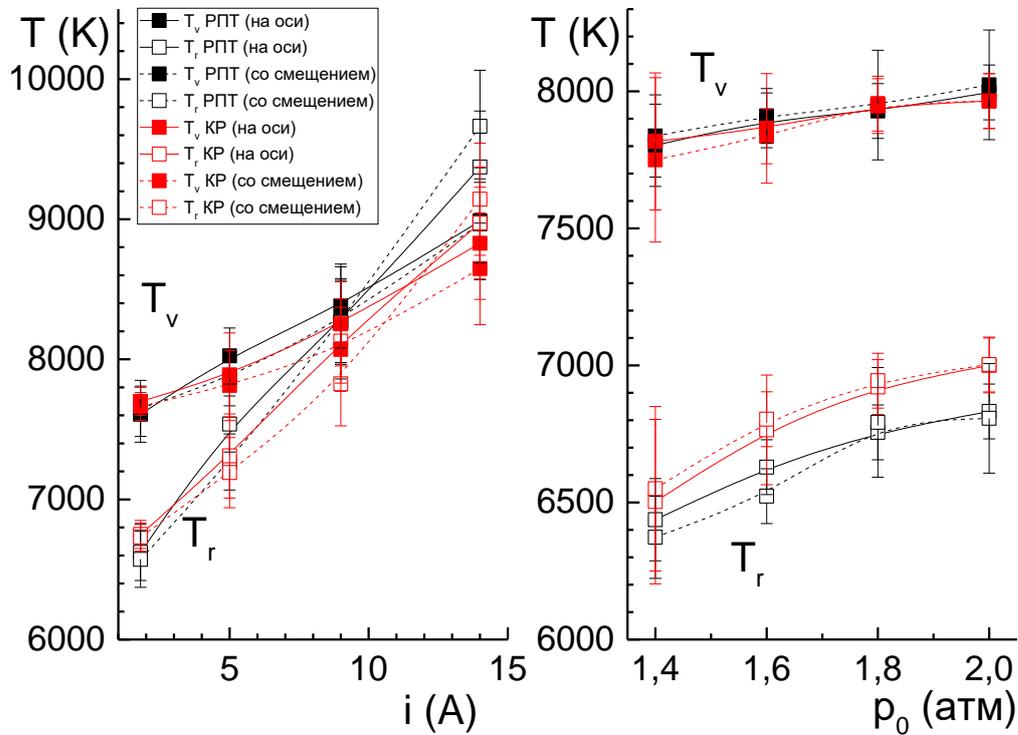


Рисунок 9. Зависимости T_r и T_v в КР (красные) и РПТ (черные) от тока i при $p_0=1.5$ атм (слева) и от p_0 при $i=1.8$ А (справа). Сплошные линии – измерения на оси канала, пунктирные – через смещенные от центра стенки отверстия. Заполненные точки – колебательная температура, пустые – вращательная. Аппроксимация по спектральному диапазону 330-430 нм. Все измерения выполнены при мощности СВЧ 5 кВт и отступе $L=2.25$ см.



Рисунок 10. Фото воспламененного с помощью КР пропан-воздушного потока. Черная стрелка вниз – направление падающей СВЧ волны, синяя стрелка вправо – направление потока. Красным прямоугольником выделена вставка с электродами. Красным эллипсом выделено диагностическое оптоволокно. Условия эксперимента: $i=1.2$ А, $p_0=2$ атм, $p_{prop}=4$ атм, мощность СВЧ 5 кВт.

На оптических спектрах при воспламенении потока можно выделить условные зоны разряда и формирования пламени, в которых доминируют разные молекулярные полосы. На оптических спектрах пламени наблюдаются преимущественно молекулярные полосы радикалов СН, ОН, CN, C₂. По наиболее интенсивным полосам СН, ОН, CN сделаны оценки вращательной и колебательной температур газа, указывающие на пространственную неоднородность потока. Вращательные температуры CN и ОН вдоль потока снижаются от значений ~6000 К, характерных для плазменного канала, до значений ~3500-4000 К. Температуры СН при этом слабо изменяются и составляют ~2000 К.

В **Заключении** собраны основные результаты диссертационной работы. В **Приложении I** представлены таблицы скоростей плазмохимических реакций, использованных в Главе 3 при расчетах кинетики продольно-поперечного и СВЧ разрядов. В **Приложении II** приведены детали расчетов аэродинамических течений в канале экспериментальной установки, описанных в Главе 3.

Заключение.

1. Реализован комбинированный разряд в потоке воздуха и его смеси с пропаном при атмосферном давлении при скоростях потока от 50 до 250 м/с в диапазоне постоянного тока от 1 до 15 А и подводимых СВЧ 2.45 ГГц мощностей от 1 до 5 кВт. Комбинированный разряд отличают меньшая напряженность поля и квазичастота и большая эффективная длина по сравнению с РПТ. В указанных условиях различие может быть до 2 раз. В комбинированном разряде достигаются высокая газовая температура 6000-9000 К и концентрация электронов $\sim 10^{15}$ см⁻³.

2. Определены характерные радиусы сечения продольно-поперечного разряда, из которого исходит оптическое излучение линий частиц: О, ОН, N₂⁺, NH, N. Радиусы различны и изменяются в пределах 0.8-2.1 мм, что говорит о наличии радиальных градиентов свойств плазмы разряда.

3. Комбинированный разряд отличается от РПТ в поперечном потоке возможностью следующих проявлений: прорастания СВЧ стримеров, неоднородностью свечения плазменного канала, поддержанием свечения незамкнутых на электроды плазменных каналов. Наличие СВЧ стримеров на концах электродов в комбинированном разряде при определенной степени погружения электродов в волновод позволяет осуществлять непрерывный поджиг бедной (эквивалентное отношение $\Phi=0.7$) пропан-воздушной смеси со скоростями от 50 до 250 м/с.

4. Плазма РПТ может быть использована для инициации СВЧ разряда на концах электродов, что облегчает его пробой при высоких давлениях порядка атмосферного.

5. Исследован создаваемый на полуволновом инициаторе глубоко подкритический СВЧ (2.45 ГГц) разряд в высокоскоростных 150–250 м/с воздушных потоках. Стационарный разряд представляет собой плазменный канал, начинающийся на острие инициатора. Определены его диаметр и длина в зависимости от скорости и давления в потоке. С ростом давления длина l и толщина d разрядного канала падают с 5.5 см до 2 см и с 2 мм до 0.3 мм соответственно. Эти зависимости объясняются различными значениями E/N . Определена концентрация электронов $n_e \sim (1 \div 2) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, колебательная и вращательная температуры газа $T_v \approx 8500 \text{ К}$, $T_r \approx 5500 \text{ К}$. Степень ионизации α составляет 10^{-3} . Экспериментально показана возможность воспламенения пропан-воздушных потоков в указанном диапазоне скоростей с помощью СВЧ разряда.

6. Изучен продольный и продольно-поперечный разряды в диапазоне токов 1-5 А в воздушных потоках со скоростью 100-250 м/с и давлением 1-1.6 атм. Получены зависимости средних напряженности поля E и производных величин: погонной мощности P , приведенной напряженности поля E/p от тока разряда i и давления p_0 . Величина поля меняется от 100 В/см до 600 В/см и достигает максимального значения при $p_0 = 4$ атм и токе 1 А. Концентрация электронов n_e при этом снижается с 10^{15} см^{-3} до 10^{14} см^{-3} . Температура газа составляет 5000-7500 К и растет с увеличением силы тока, а колебательная температура T_v составляет 7000-8500 К.

7. Показано, что пропан-воздушный поток воспламеняется продольным и продольно-поперечным разрядом. Измерения при помощи ФЭУ показали, что горение носит импульсный характер и локализовано вблизи плазменного канала, где наблюдается наибольшая концентрация нарабатываемых в разряде химически активных частиц. Из-за этого достаточно большая доля потока может не воспламеняться.

8. Сделан вывод, что для использования продольно-поперечного разряда в задачах плазменно-стимулированного горения нет необходимости повышать разрядный ток, т.к. при меньшей в разы вкладываемой мощности температура газа на оси разряда также превышает 5000 К, чего достаточно для воспламенения потока. При этом повышается поле E , что ускоряет реакции диссоциации и возбуждения молекул электронами. Поскольку радиус сечения разряда, где протекает ток и велика концентрация химически активных частиц, мал и составляет ~ 1 мм, необходимо стремиться скорее к большей частоте разряда: увеличивается доля объема газа, обрабатываемая им.

9. Численные расчеты элементов СВЧ тракта установки показали особенности согласования тестовой волноводной секции. Из-за наличия металлического полуволнового инициатора в нем наблюдается сильное отражение падающей СВЧ волны при определенных длинах инициатора. Условия согласования достаточно сильно меняются при изменении длины инициатора.

Таким образом, если эффективная длина его меняется при появлении токопроводящего плазменного канала СВЧ разряда, необходимо устройство согласования для повышения КПД установки.

10. При моделировании газовых течений были получены трехмерные распределения скорости, температуры и давления в сверхзвуковом воздушном потоке. С помощью экспериментальных данных (давлений на стенку и создаваемой каналом тяги) была проведена валидация аэродинамической модели в случае отсутствия зоны объемного тепловыделения. Получена верхняя граница давления ($p_{out}=100-200$ Торр) на выходном сечении канала, обеспечивающего правильный режим течения воздуха в модели. Показано, что при плотности тепловой мощности источника $w=1.4 \times 10^{11}$ Вт/м³ (эквивалентной средней общей мощности разряда $W=10$ кВт) разряд нагревает газ до температуры от 1700-2500 К в середине потока до $T=3500-4200$ К вблизи конца электрода, что приводит к ускорению потока без его теплового заклинивания. При плотности тепловой мощности источника $w=2.8 \times 10^{11}$ Вт/м³ (эквивалентной средней общей мощности разряда $W=20$ кВт) газ нагревается сильнее до 6700 К, но начинается локальное тепловое заклинивание потока.

11. В гидродинамическом приближении в рамках канальной модели был исследован РПТ с силой тока 10 А. Показано, что разряд движется практически со скоростью основного сверхзвукового воздушного потока около 670 м/с, достаточно слабо его возмущая. Сделаны оценки концентрации электронов $n_e=(0.9-5.1) \times 10^{16}$ см⁻³, что согласуется со значениями, полученными экспериментально. С увеличением длины разряда также растет и напряжение на нем. Оценена напряженность поля $E \sim 125$ В/см и приведенная напряженность поля в канале разряда E/N около 30 Тд, а тепловая мощность, выделяемая разрядом, составила 1250 Вт/см. В конфигурации аэродинамической модели с укороченными электродами показан переход к фазе, когда разряд закреплен на их концах.

Публикации, в которых отражены основные результаты диссертации в изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационных советах МГУ по специальности 1.3.9. Физика плазмы:

- A1 Kornev K.N., Logunov A.A., Surkont O.S., Abushaev T.R., Volynets A.L., Dvinin S.A. Hybrid microwave-direct current discharge in high speed flows // *Physics of Plasmas*. 2025. Vol. 32, №.6. P.063501. Импакт-фактор 2,0 (JIF) DOI: 10.1063/5.0249220 Авт. вклад 0,6 из 0,75 п.л.
- A2 Kornev K.N., Logunov A.A., Dvinin S.A. Low-current gliding DC discharge in high-speed flows // *Journal of Physics D - Applied Physics*. 2024. Vol. 57, №. 47. P. 475208. Импакт-фактор 3,1 (JIF) DOI: 10.1088/1361-6463/ad726e Авт. вклад 0,6 из 0,75 п.л.
- A3 Корнев К.Н., Логунов А.А., Сурконт О.С., Абушаев Т.Р., Волынец А.Л., Двинин С.А. Иницируемый полуволновой антенной СВЧ-разряд в высокоскоростных потоках // *Физика плазмы*. 2024. Т. 50, № 3. С. 349–358. Импакт-фактор 1,4 (РИНЦ) DOI: 10.31857/S0367292124030093 Авт. вклад 0,5 из 0,56 п.л.
Kornev K.N., Logunov A.A., Surkont O.S., Abushaev T.R., Volynets A.L., Dvinin S.A. A microwave discharge in high-velocity flows initiated by a half-wave antenna // *Plasma Physics Reports*. 2024. Vol. 50, № 3. P. 388–396. Импакт-фактор 0,9 (JIF) DOI: 10.1134/S1063780X24600129 Авт. вклад 0,5 из 0,56 п.л.
- A4 Корнев К.Н., Логунов А.А., Шибков В.М. Численное моделирование сверхзвукового потока с областью тепловыделения продольно-поперечным разрядом // *Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа*. 2023. № 4. С. 137–145. Импакт-фактор 1,15 (РИНЦ) DOI: 10.31857/S1024708422601020 Авт. вклад 0,5 из 0,56 п.л.
Kornev K.N., Logunov A.A., Shibkov V.M. Numerical modeling of supersonic flow with a region of heat release by a longitudinal-transverse discharge // *Fluid Dynamics*. 2023. Vol. 58, № 4. P. 640–648. Импакт-фактор 1,0 (JIF) DOI: 10.1134/S0015462823600281 Авт. вклад 0,5 из 0,56 п.л.
- A5 Корнев К.Н., Логунов А.А., Шибков В.М. Моделирование продольно-поперечного разряда в сверхзвуковом воздушном потоке в гидродинамическом приближении // *Физика плазмы*. 2023. Т. 49, № 3. С. 288–295. Импакт-фактор 1,4 (РИНЦ) DOI: 10.31857/S0367292122601527 Авт. вклад 0,4 из 0,44 п.л.
Kornev K.N., Logunov A.A., Shibkov V.M. Simulation of a transverse-longitudinal discharge in a supersonic air flow in the hydrodynamic approximation // *Plasma Physics Reports*. 2023. Vol. 49, № 3. P. 380–386. Импакт-фактор 0,9 (JIF) DOI: 10.1134/S1063780X22602139 Авт. вклад 0,4 из 0,44 п.л.

Список цитируемой литературы:

1. Adamovich I., Agarwal S., Ahedo E., Alves L.L., Baalrud S., Babaeva N., Bogaerts A., Bourdon A., Bruggeman P.J., Canal C. The 2022 Plasma Roadmap: low temperature plasma science and technology // *J. Phys. D. Appl. Phys.* IOP Publishing, 2022. Vol. 55, № 37. P. 373001.
2. Leonov S.B. Electrically driven supersonic combustion // *Energies*. 2018. Vol. 11, № 7.
3. Чёрный Г.Г. Течения газа с большой сверхзвуковой скоростью. Физматлит, 1959.
4. Shibkov V.M., Aleksandrov A.F., Chernikov V.A., Ershov A.P., Shibkova L. V. Microwave and direct-current discharges in high-speed flow: Fundamentals and application to ignition // *J. Propuls. Power*. 2009. Vol. 25, № 1. P. 123–137.
5. Klimov A., Bitiurin V., Moralev I., Tolkunov B., Nikitin A., Velichko A., Bilera I. Non-premixed plasma-assisted combustion of hydrocarbon fuel in high-speed airflow // 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. 2006. P. 617.
6. Adamovich I. V., Lempert W.R., Rich J.W., Utkin Y.G., Nishihara M. Repetitively pulsed nonequilibrium plasmas for magnetohydrodynamic flow control and plasma-assisted combustion // *J. Propuls. Power*. 2008. Vol. 24, № 6. P. 1198–1215.
7. Starikovskiy A., Aleksandrov N. Plasma-Assisted Ignition and Combustion // *Progress in Energy and Combustion Science*. 2011. Vol. 39.
8. Ju Y., Sun W. Plasma assisted combustion: Dynamics and chemistry // *Prog. Energy Combust. Sci.* Elsevier, 2015. Vol. 48. P. 21–83.
9. Ершов А.П., Каменщиков С.А., Логунов А.А., Черников В.А. Горение высокоскоростного воздушно-пропанового потока, инициируемое продольно-поперечным разрядом постоянного тока // *Теплофизика высоких температур. Российская академия наук, Отделение энергетики, машиностроения, механики и ...*, 2009. Vol. 47, № 5. P. 643–649.
10. Alexandrov K., Esakov I., Grachev L., Alexandrov K. Experimental Study of Detonation in Propane-Air Mix Initiated by Pulse Microwave Discharge // 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. 2008. P. 1406.