

На правах рукописи

УДК 537.525

Комратов Денис Викторович

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СВЧ-РАЗРЯДА С ГАЗОВЫМ ПОТОКОМ

Специальность 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических наук

Москва, 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Научный руководитель Чирков Алексей Юрьевич,
доктор физико-математических наук, доцент,
заведующий кафедрой теплофизики МГТУ
им. Н.Э. Баумана.

Официальные оппоненты: Власов Павел Александрович
доктор физико-математических наук, главный
научный сотрудник ФГБУН Федерального
исследовательского центра химической физики
им. Н.Н. Семенова Российской академии наук

Улыбышев Константин Евгеньевич
кандидат физико-математических наук, старший
научный сотрудник ФГБУ «Национальный
исследовательский центр «Курчатовский институт»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Московский авиационный институт (национальный
исследовательский университет)»

Защита диссертации состоится « 3 » декабря 2024 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 24.2.331.17 при Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, Рубцовская наб., д2/18, Учебно-лабораторный корпус, ауд. 947.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр. 1, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.331.17, также просим отправлять электронные копии отзывов на электронную почту kharit@bmstu.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета, к.т.н.



Харитонов С.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность диссертационной работы. В различных отраслях науки все чаще проводится поиск способов воздействия или повышения эффективности технологических процессов. Такие разработки находятся на стыке нескольких направлений науки и техники, что обуславливает сложность решаемых мультифизических задач. Попытки исследования взаимодействия нескольких физических процессов друг на друга не редко приводят к результатам, способным качественно изменить уже используемые процессы.

Примерами мультифизических исследований могут быть как воздействие на газовый поток с помощью струй с нулевым расходом (т.н. синтетические струи), так влияния различных разрядов на акустические характеристики струй. Строго говоря, поиск взаимодействия различных процессов друг на друга применяется давно. Так, например, зажигание топлива в камерах сгорания или цилиндрах двигателей внутреннего сгорания с помощью искрового разряда, инициируемого свечой зажигания, применяется больше века.

Наряду с воздействием на газовые потоки, которые встречаются в большинстве тепловых машин, высокую актуальность имеет исследование процессов в топливовоздушных газовых потоках. Причем в потоках топливных смесей встречается обширный ряд проблем от способов воспламенения до экологических характеристик.

Исходя из обширного перечня проблем реализации горения углеводородов, также обширны и способы для их решения. Так для различных целей рассматривается применение широкого ряда воздействий на топливные смеси такие как, диэлектрический барьерный разряд, импульсный наносекундный разряд, искровой разряд, лазерные воспламенители, квазипостоянные разряды и СВЧ-разряды.

Большинство способов принудительного воздействия на газовый поток или топливную смесь сводится к подводу энергии в том или ином виде и интенсификации процессов энергообмена с рабочим телом. Если исключить подвод энергии в виде кинетической энергии газового потока, то остальные способы подвода сводятся к тепловому воздействию на течение. При таком рассмотрении наиболее приоритетными оказываются проблемы энергопотребления систем генерации и эффективности передачи тепловой энергии к газовому потоку.

Использование СВЧ-генераторов для инициации разрядов обусловлено рядом их преимуществ. Практически все другие типы электрических разрядов в газе, которые применяются в исследованиях, как в России, так и за рубежом, имеют низкую эффективность передачи энергии источников питания в разряд. Высокая энергетическая эффективность СВЧ-разряда является основным преимуществом при создании подобных систем воспламенения и реактивных систем управления полетом.

Это преимущество подкрепляется и высоким КПД мощных магнетронов. При этом требования к стабильности параметров генерации для приборов, которые необходимы в этой технологии, весьма низкие.

Следует отметить, что воспламенение является сложным процессом, при котором проходит ряд физико-химических превращений. Изучение в данном направлении осложняется и существенной нестационарностью протекающих процессов, и сложностью экспериментальной диагностики. Так для измерений ограниченного набора параметров применяют дорогостоящие газоанализаторы, лазеры и иные оптические методы. Применение численных подходов также затруднительно как по причине отсутствия данных для валидации математических моделей, так и по причине необходимости большого объема вычислительных ресурсов.

В данной работе рассматривается возможность использования СВЧ-разряда с целью воспламенения и стабилизации горения топливо-воздушной смеси в условиях эксплуатации авиационных двигателей.

Цель работы. Обоснование возможности воспламенения топливо-воздушных смесей с помощью глубокоподкритического стримерного СВЧ-разряда.

Задачи исследования.

1. Отработка стабилизации СВЧ-разряда при в широком диапазоне параметров с учетом влияния конструктивных особенностей и электромагнитных полей.
2. Исследование воздействия высокотемпературного СВЧ-разрядного образования на поток газа при различных скоростях.
3. Экспериментальное исследование взаимодействия топливовоздушной смеси в проточном тракте при варьировании скорости набегающего потока с СВЧ-разрядом.
4. Анализ процессов при различных скоростях и составах смеси в условиях с низкими параметрами для зажигания.

Методы исследования. Для исследования процессов воспламенения на основе СВЧ-разряда использован экспериментальный подход. В виду сложности моделирования процессов совместно с протекающими химическими реакциями в условиях газодинамического движения среды и недостаточной достоверности получаемых результатов численное моделирование может быть выполнено лишь для некоторых отдельных процессов. Исследования проведены на экспериментальных установках ЦИАМ У-389 и УВ-16 и МРТИ РАН. Для анализа физико-химических процессов применен расчетно-аналитический подход.

Достоверность результатов. Полученные в диссертационной работе результаты, согласуются с известными теориями СВЧ газовых разрядов и процессов воспламенения, экспериментальными и расчетными данными. Апробирована

методика определения параметров объемного источника энергии для численного моделирования по результатам экспериментальных исследований.

Научная новизна работы.

1. Впервые отработана инициация глубоководкритического стримерного СВЧ-разряда при давлениях выше атмосферного вплоть до 1.2 атм.
2. Показана возможность реализации импульсно-непрерывного режима генерации СВЧ-разряда при пробое среды с целью снижения потребляемой мощности.
3. Предложена и обоснована методика применения объемного источника энергии при численном моделировании влияния СВЧ-разряда на поток газа.
4. Обосновано применение глубоководкритического стримерного СВЧ-разряда для воспламенения топливовоздушной смеси.

Практическая значимость работы. Проведенные исследования могут быть применены для разработки усовершенствованных способов и устройств воспламенения топлива с целью повышения их эффективности. Работа имеет научную ценность для понимания процессов теплообмена и взаимодействия СВЧ-разрядных образований с потоком газа на различных скоростях и параметрах горения разряда. Представленное исследование является научно техническим заданием для следующих этапов работ в данном направлении.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Возможно обеспечить стабильное зажигание глубоководкритического стримерного СВЧ-разряда с длиной волны 12.4 см, в т.ч. при расположении нескольких электродов вблизи друг друга и их герметизации в полости при давлениях среды от 0.1 до 1.2 атм и напряжённостях поля до 0.2 кВ/см. Темп роста тепловой энергии при этом может составлять до 135 Дж/с.
2. На основе экспериментального исследования показано, что возможно изменение профиля полного давления на 8 – 10 % в пристеночной области при воздействии СВЧ-разряда с мощностью от 60 до 360 Вт и длиной волны 12.4 см в условиях проточного дозвукового течения со скоростью, соответствующей числу Маха от 0.1 до 0.8, при этом сохраняется устойчивое положение пробойного образования.
3. Предложенный подход к численному моделированию высокотемпературного СВЧ-разряда в потоке воздуха на основе расчета эквивалента объемного источника энергии позволяет моделировать течение для получения распределений параметров газа и интегральных характеристик.
4. Воспламенение топливовоздушной смеси возможно при применении глубоководкритического стримерного СВЧ-разряда в диапазоне коэффициента избытка воздуха от 0.7 до 1.4 при давлениях от 0.1 до 0.5 атм и полной температуре набегающего потока 290 К.

Соответствие паспорту специальности. Соответствие диссертации формуле специальности 1.1.9 «Механика жидкости, газа и плазмы» (технические науки): диссертационная работа посвящена экспериментальным исследованиям течения сжимаемых сред, в т.ч. при сверхзвуковых режимах с наличием ударных волн, а также течений с химическими реакциями в условиях применения СВЧ-разряда, который является низкотемпературной плазмой. Выявляется механизм переноса импульса и энергии при теплообмене и физико-химических превращениях. Рассматривается исследование термодинамических процессов применительно к установкам преобразования энергии и экспериментальные исследования процессов совместного переноса тепла и массы в многокомпонентных смесях веществ, включая химически реагирующие смеси. Отражённые в диссертации научные положения соответствуют области исследования специальности 1.1.9.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных семинарах Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана; на Международной звенигородской конференции по физике плазмы и УТС (г. Звенигород, 2015 г., 2018 г.); на IX Международном семинаре по микроволновым разрядам: Основы и применение (Испания, г. Кордоба, 2015 г.); на 14-м Международном семинаре по магнито-плазменной аэродинамике (г. Москва, 2015 г.); на Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых и специалистов «Новые решения и технологии в газотурбостроении» (г. Москва, 2015 г.); на 6-м Аэрокосмическом тематическом семинаре EUCASS: Управление аэродинамическими течениями и горением с помощью плазмы (г. Санкт-Петербург, 2017 г.); на Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых и специалистов (г. Москва, 2019 г.); на 2-ой Международной конференции «Проблемы термоядерной энергетики и плазменные технологии» (г. Москва, 2019 г.); на XII Всероссийском съезде по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (г. Уфа, 2019 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 23 научные работы, из них 5 в изданиях, входящих в перечень рекомендованных ВАК РФ, и 3 в изданиях, рецензируемых международными системами цитирования Web of Science и/или Scopus. Общий объём опубликованных работ – 8.78 п.л.

Личный вклад автора. Автором разработаны конструкции всех представленных в работе экспериментальных макетов, образцов и модельных каналов. Проведена работа по наладке и автоматизации испытаний на различных установках МРТИ РАН и ЦИАМ. В составе исследовательского коллектива провел эксперименты, обработку и анализ результатов, приведенных в работе. Провел численное моделирование газодинамического процесса в условиях высокотемпературного факела СВЧ-разряда.

Выполнил расчетную оценку физико-химических процессов с применением ПО Chemkin.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения, изложенных на 117 страницах машинописного текста, списка литературы из 99 наименований и содержит 53 рисунка, 8 таблиц и 2 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приводятся обоснование актуальности диссертационной работы, описание научной новизны и практической значимости результатов работы. Обосновывается достоверность полученных результатов. Кратко излагается личный вклад автора. Приводится перечень научно-технических конференций и семинаров, на которых были представлены основные результаты работы. Формулируются основные положения, выносимые на защиту диссертационной работы.

В первой главе приводится краткое описание развития теории СВЧ-полей и разработки СВЧ-устройств. Излагаются результаты по развитию газовых, в том числе СВЧ, разрядов. Приводятся описания различных типов разрядов, их открытия и применения.

Приводится обзор применения электрических разрядов для камер сгорания летательных аппаратов на различных скоростях воздушного потока и состава смеси. Рассматриваются различные природы генерации разрядов и их энергетические параметры. Рассматриваются современные способы применения различных типов СВЧ-разрядов для воспламенения топлива при варьировании скорости потока.

Применительно к процессам воспламенения приводятся разработки по применению разрядов в различных устройствах, в том числе камерах сгорания. Рассмотрены современные конструкции воспламеняющих устройств для авиационной техники. Приводятся конструкции пусковых воспламенителей и параметры их работы. Рассматриваются различные способы организации процесса воспламенения в камерах сгорания. Приведена качественная оценка влияния на воспламеняющую способность снижения параметров в камерах сгорания при остановке авиационного двигателя в полете.

Во второй главе приводится описание исследования инициации СВЧ-разряда в условиях влияния конструктивных особенностей. Отмечается широкое распространение СВЧ-техники и уровень ее разработок. Излагается возможность генерации с помощью технологий, разработанных в МРТИ, СВЧ-разрядов при уровнях критических значений поля ниже требуемых. На основе такого метода возможно осуществление усиления локальной величины поля, т.е. зажигать глубокоподкритический разряд.

Рассматриваются две принципиальные схемы экспериментов с целью отладки стабильного зажигания СВЧ-разряда (Рисунок 1). Приводятся результаты по отработке генерации СВЧ-разряда в полости с замкнутым объемом и вне полости. Также рассматривается возможность установки серии близко стоящих электродов при стабильной генерации СВЧ-разряда.

Схема экспериментальной установки (Рисунок 2) включает в себя СВЧ-магнетрон, который генерирует волну с $\lambda = 12.4$ см в одиночных импульсах длительностью $\tau_{\text{имп}} \leq 0.4$ с и мощностью $P = 1.5$ кВт. Излучаемый квазиоптический СВЧ-пучок линейно поляризован и имеет ТЕМ-структуру поля. На расстоянии $H = 90$ мм от торца рупора перпендикулярно вектору Пойнтинга $\vec{\Pi}$ ЭМ-пучка в камере расположен плоский алюминиевый лист – экран. На основе контрольных измерений получено, что в ближайшей к экрану пучности величина амплитуды электрической составляющей волны $E_0 = 140$ В/см.

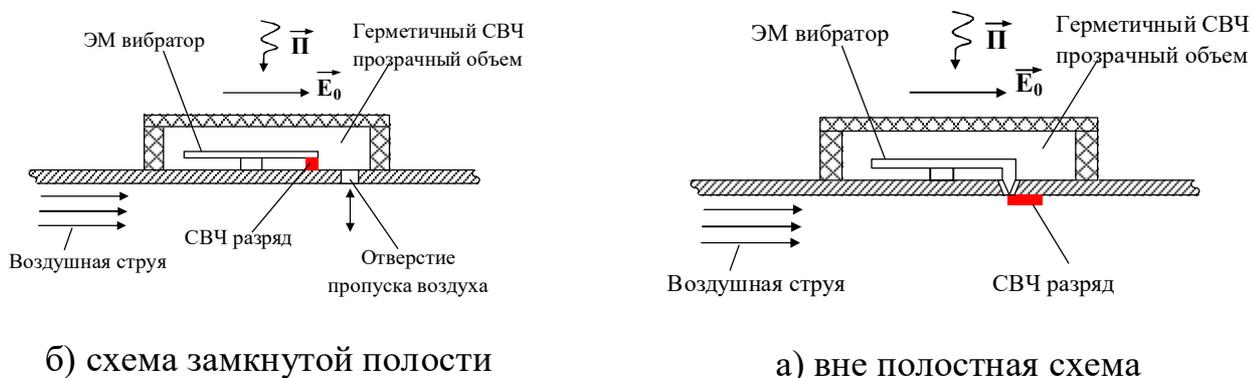


Рисунок 1. Схемы экспериментов

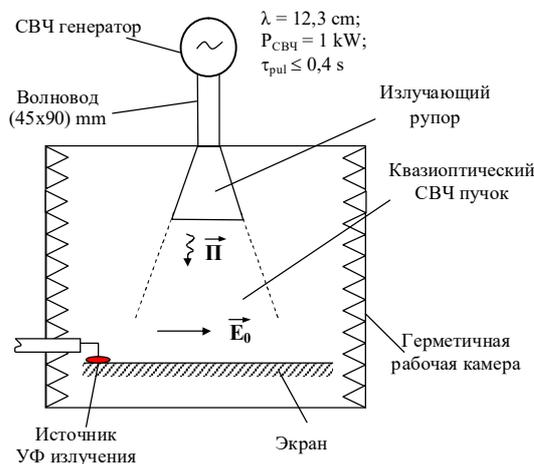
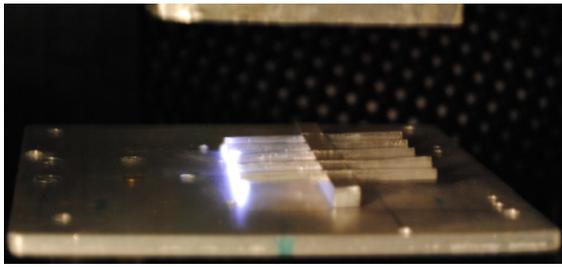
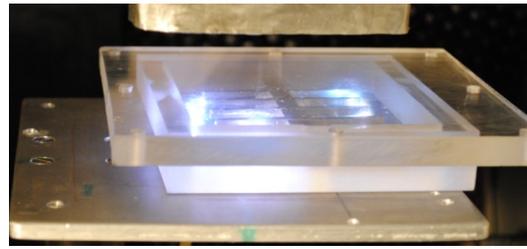


Рисунок 2. Схема экспериментальной установки

Соответствующие эксперименты показали, что при установке серии близко-стоящих электродов обеспечивается одновременное горение пяти инициированных СВЧ-разрядов (Рисунок 3, а). Для этого были подобраны резонансные длины электродов, высоты расположения над экраном и расстояния между электродами. При герметизации линейки электродов в полость также экспериментально подтверждено стабильное зажигание разряда (Рисунок 3, б).



а) без полости



б) внутри полости

Рисунок 3. Фото СВЧ-разряда в линейке электродов без полости и внутри полости

Также по представленной на Рисунке 1 схеме СВЧ-разряд должен гореть на противоположной плоскости экрана, на котором должны располагаться иницирующие разряд вибраторы.

Вибратор выполнялся из нихромовой проволоки диаметром 1 мм. Он располагался на алюминиевой пластине и фиксировался на керамических брусках высотой 2.5 мм. В опытах горизонтальный участок вибратора длиной L постепенно уменьшался, начиная с размера 60 мм. При этом загнутый конец вибратора сохранялся неизменным и имел длину 6 мм. С каждым размером L определялось максимальное давление в рабочей камере, при котором вибратор инициировал СВЧ-разряд. При размере $L = 45$ мм вибратор инициировал разряд уже и при атмосферном давлении. В следующих опытах по такой схеме устанавливалось уже три параллельных вибратора (Рисунок 4).

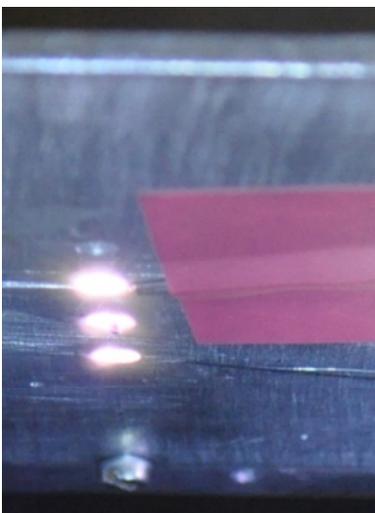


Рисунок 4. Линейка из трех вибраторов (вид снизу) при зажженном СВЧ-разряде

По схеме замкнутой полости экспериментально определено, что начальный максимальный темп выделения тепловой энергии при зажигании линейки инициированных глубоко подкритических СВЧ-разрядов равен 135 Дж/с. В этой схеме также была продемонстрирована возможность динамического истечения воздуха из герметичного СВЧ прозрачного объема в результате выделения в плазменных разрядных областях тепловой энергии.

По схеме открытой полости реализована линейка инициированных СВЧ-разрядов на боковой поверхности плоского воздушного канала. Оценена газовая температура в спутном следе разрядной области, которая составила $T \approx 200^\circ\text{C}$

В результате отмечается, что, несмотря на сложное пространственное распределение СВЧ-поля внутри диэлектрического контура, при подобранных линейных параметрах полости, длин вибраторов и расстояний между ними реализуется стабильная инициация СВЧ-разряда.

$$I_H = T_H C_p G, \quad (2)$$

$$I_K = T_K C_p G. \quad (3)$$

Для определения T_K используется газодинамическая функция приведенного импульса, зависящая от приведенной скорости:

$$T_K = T_H \frac{z(\lambda_H)^2}{z(\lambda_K)^2}. \quad (4)$$

Приведенный импульс для начального состояния потока при варьировании числа Маха от 0.1 до 0.8:

$$z(\lambda_H) = \frac{1}{2} \left(\lambda_H + \frac{1}{\lambda_H} \right). \quad (5)$$

Для конечного состояния приведенный импульс рассчитывается при стремлении числа Маха к 1:

$$z(\lambda_K) = \frac{1}{2} \left(\lambda_K + \frac{1}{\lambda_K} \right). \quad (6)$$

Численное моделирование проводилось в расчетном пакете «ESI-CFD-ACE». Расчет проводился с использованием осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (RANS) в стационарной трехмерной постановке с учетом сжимаемости газа. Применялась «k-ε» модели турбулентности стандартного вида. Построена структурированная сетка 2.5×10^6 ячеек с моделированием лемнискатного участка на входе.

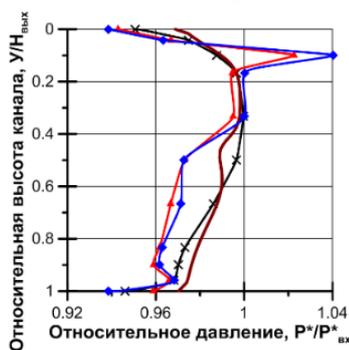
Так удалось более детально провести анализ газодинамических структур, а на основе методики расчета предсказывать параметры потока в последующих экспериментах. Абсолютное отклонение расчетных результатов от эксперимента не превышает 0.9 %.

Проведенное исследование показало возможность воздействия на поток воздуха (Рисунок 7). Прикладываемая и выделяемая в виде разряда энергия передавалась в поток тепловым механизмом, т.е. прогревом локальных областей вблизи пробойных образований. Показано, что с помощью теплового дросселирования течения достигается изменение профиля полного давления. С помощью численного моделирования получена картина течения на различных скоростях и мощностях теплового источника от СВЧ-разряда. Линии тока огибают горячие плазменные образования с разных сторон и не имеют существенного проникновения внутрь области. В экспериментах проток воздуха через объем СВЧ-разряда может быть больше в виду того, что пробойное образование представляет собой ветвистую структуру из множества стримеров, а не единый разряд, но существенных расхождений полученных результатов не наблюдалось.

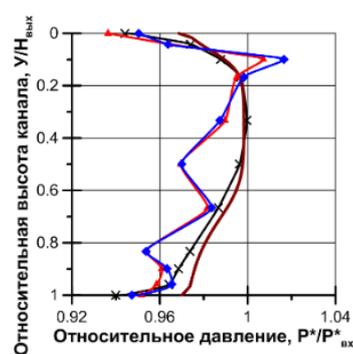
Однако, несмотря на существенный вклад энергии, составляющий от 8 до 13 % энтальпии потока на малых скоростях при числах Маха от 0.1 до 0.7, влияние на интегральные характеристики – коэффициент восстановления полного давления – составляет не более 1 %. С ростом скорости потока до чисел Маха 0.8 подвод энергии

в виде СВЧ-разряда становился меньше относительно энтальпии потока и составлял от 1 до 2.5 %.

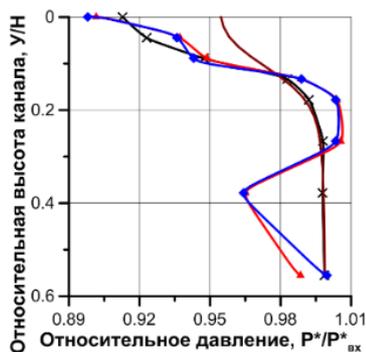
Основной задачей данного исследования была проверка влияния потока на СВЧ разряд. В экспериментах на различных скоростях потока и мощностях разрядов получено, что разряд стабильно зажигается в линейке из десяти электродов. Разряд не изменял своей формы в условиях набегающего потока. Отмечено, что разряд зажигался в потоке воздуха на некоторых электродах как на острие, так и на затупленных частях электродов.



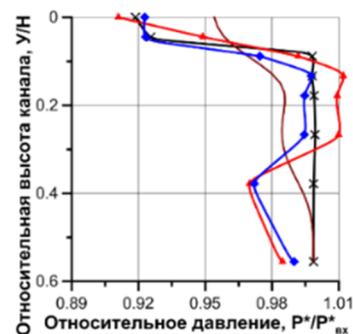
а) параллельный электродный блок в выходном сечении



б) параллельный электродный блок в промежуточном сечении



в) попарно-сходящийся электродный блок в выходном сечении



г) попарно-сходящийся электродный блок в промежуточном сечении

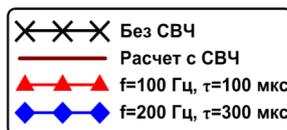


Рисунок 7. Профили полного относительного давления при $M_{\text{вх}} = 0.4$

В результате проведенного исследования показана принципиальная возможность инициации СВЧ-разряда в потоке воздуха и его стабилизация при различных набегающих условиях без существенного изменения параметров разряда. Сделан вывод о возможности применения разряда в потоке топливовоздушных смесей.

В четвертой главе рассматриваются результаты экспериментального исследования применения СВЧ-разряда для воспламенения пропано-воздушной смеси на различных скоростях.

Отмечается, что для отработки способа воспламенения на основе СВЧ-разряда необходимы модельные исследования с газообразным топливом – пропановоздушной

смесью. Исследование направлено на проверку возможности зажигания топлива без контроля параметров окружающей среды и горения.

Для проведения исследования разработано модельное воспламеняющее устройство – цилиндр диаметром 14 мм, длиной 80 мм, выполненный из капрлона. Устройство устанавливалось внутри барокамеры (Рисунок 8), присоединенной к вакуумному насосу. Подводящие магистрали открывались клапаном в атмосферу и были препарированы отборниками давления. В выходном сечении воспламеняющего устройства устанавливались приемник полного давления и термопара.

Испытания проводились по циклограмме, в которой сначала подавался воздух и пропан, через 0.1 с инициировался СВЧ разряд, а через еще 0.4 с разряд выключался.

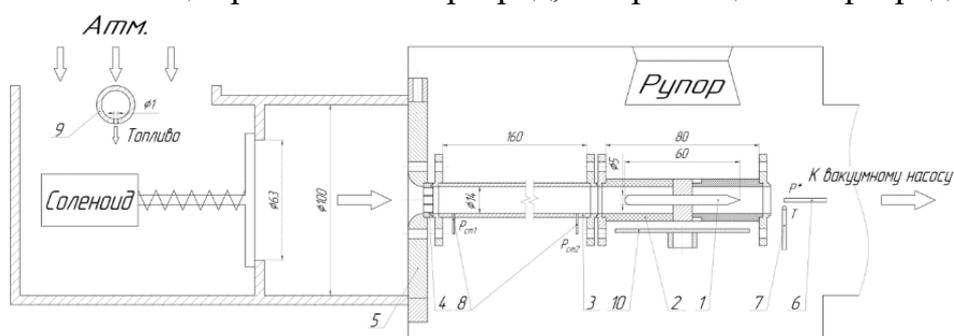


Рисунок 8. Схема экспериментальной установки

Для сверхзвукового режима течения при $M = 1.5$ приводятся результаты по измерению параметров, в том числе давления и температуры на выходе из модельного воспламеняющего устройства (Рисунок 9). Отмечено, что при $\alpha = 0.75$ температура составляла около 200°C на всех режимах по давлению в барокамере. При изменении α до 1 температура возросла до 250°C . Варьирование расхода топлива слабо сказывалось на значениях полного давления за срезом рабочей секции, и также не отмечено влияния на статическое давление в прямолинейном участке. С целью увеличения температуры изменена циклограмма пуска. Таким образом, удалось достигнуть роста температуры до 350°C (Рисунок 10).

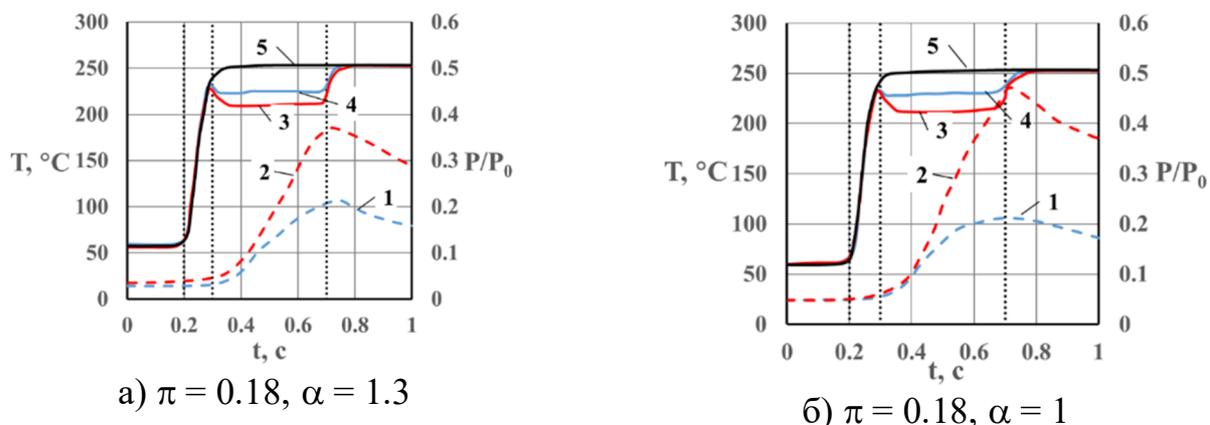
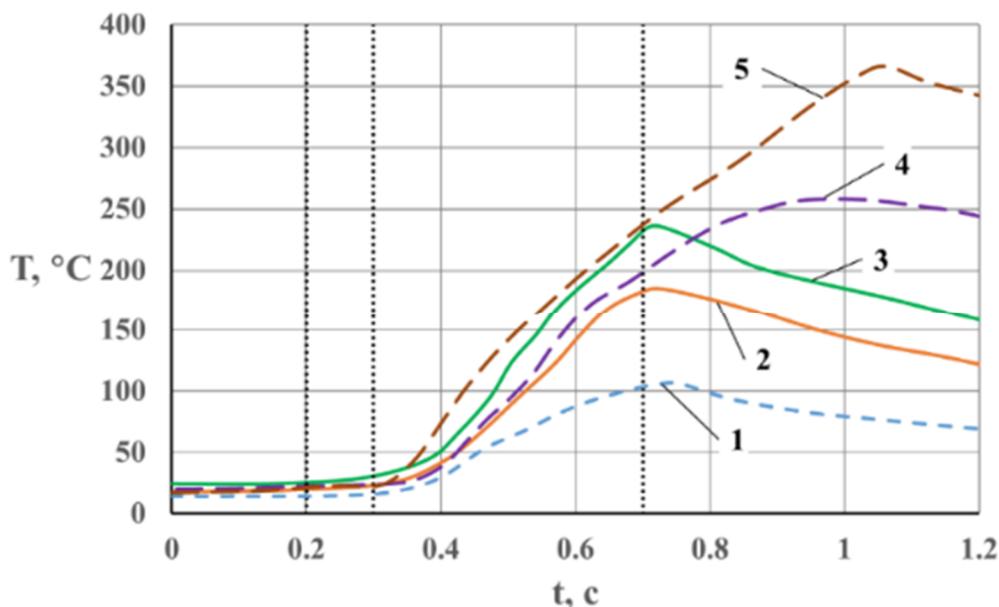


Рисунок 9. Осциллограммы давления и температуры на выходе рабочей секции



1 – при зажигании СВЧ-разряда без подачи топлива; 2 – $\pi = 0.18$, $\alpha = 1.3$, $\tau = 0.4$ с;
 3 – $\pi = 0.18$, $\alpha = 1$, $\tau = 0.4$ с; 4 – $\pi = 0.18$, $\alpha = 1$, $\tau = 0.8$ с; 5 – $\pi = 0.15$, $\alpha = 0.75$,
 $\tau = 0.8$ с, увеличено время подачи топлива

Рисунок 10. Осциллограммы температуры на выходе рабочей секции при различных π , α и длительности разряда

Полученные распределения температуры в выходном сечении затруднительно использовать для оценки характеристик состояния смеси по причине неравномерности поля температуры в струе, существенной инерционности применяемого метода измерения на основе термопары, а также отсутствия камеры торможения для термопары, с помощью которой возможно измерение температуры торможения. Выбранный метод измерения обуславливается конструктивными особенностями проводимого эксперимента, имея при этом ряд недостатков, но позволяющий визуализировать прирост температуры при прочих равных условиях.

Для анализа физико-химических процессов без учета измеренных значений температуры использовано программное обеспечение Chemkin. Расчетная блок схема приведена на Рисунке 11. Для расчета использовался кинетический механизм пропана с 294 реакциями. Постановка расчетного подхода повторяла условия испытаний в цилиндрическом канале с СВЧ разрядом, который задавался объемным источником энергии.

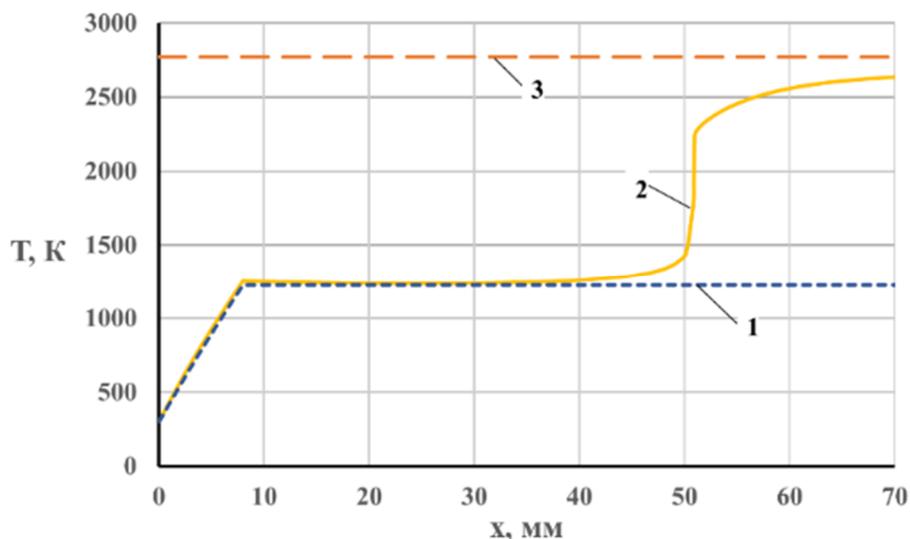


Рисунок 11. Вычислительная схема, построенная в ПО Chemkin

В результате расчета получено распределение температуры по длине цилиндрического канала (Рисунок 12) при равновесном процессе, при процессе с подводом энергии к воздуху и при процессе горения пропана с подводом энергии, эквивалентной подводимой в эксперименте.

Максимальная температура в равновесном процессе достигает значений 2790 К. При подводе энергии без топлива температура достигает 1225 К на длине канала 8 мм и остается постоянной. В случае неравновесного процесса при подводе энергии и топлива со стехиометрическим составом температура достигает 1290 К на схожей длине 8 мм, после чего на длине до 30 мм наблюдается незначительный спад до значений температуры 1240 К, связанный с диссоциацией молекул, а затем лавинообразное нарастание температуры до значений 2300 – 2600 К на длине от 50 до 70 мм.

Из Рисунка 13 видно, что на участке канала от 20 до 40 мм происходит наработка продуктов сгорания CO_2 , которая сопровождается снижением температуры. На расстоянии 50 мм происходит полное выгорание пропана.



1 – равновесный процесс, 2 – при моделировании подвода энергии от СВЧ-разряда и подаче топлива, 3 – при моделировании подвода энергии от СВЧ-разряда

Рисунок 12. Распределение температур для различных процессов, полученных с помощью ПО Chemkin

Таким образом, наблюдаемое в эксперименте воспламенение и горение происходит дальше от среза канала, а применяемые методы диагностики температуры существенно занижают значения, поэтому использование их для анализа затруднительно. Однако на основании расчета с помощью ПО Chemkin и сопоставления значений давления можно сделать вывод о протекающих процессах химической реакции воспламенения и горения при применении СВЧ разряда в пропано-воздушном потоке газа.

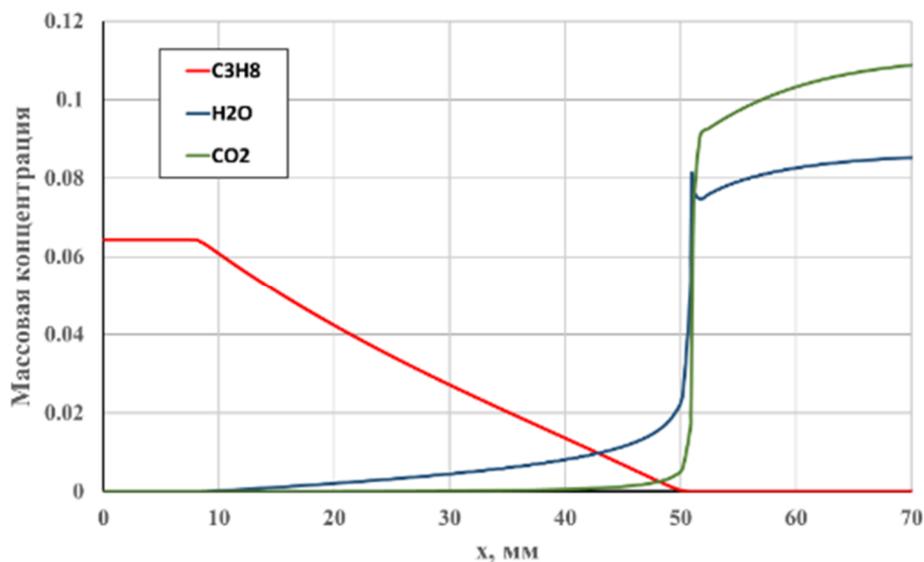


Рисунок 13. Распределение массовой концентрации компонент, полученные с помощью ПО Chemkin для процесса горения

Также проведен анализ процесса на основе одномерной оценки. На основе зависимости изменения энтальпии потока и значений, полученных в эксперименте, получено, что изменение энтальпии потока составляет 9 кВт. В случае без подвода топлива, но при зажигании разряда энтальпия потока газа составляла 3 кВт. Подводимая мощность в эксперименте от СВЧ источника составляла 2 кВт. Различие оцененной мощности в потоке газа и подводимой в эксперименте энергии связано с тем, что измерение осуществлялось в одной точке потока, т.е. без учета неравномерности поля. С учетом КПД преобразования в тепловую энергию, выделяемую в разряде, мощность окажется ниже. Без учета КПД преобразования и при сравнении энергии без подачи топлива и в случае с его подводом различие составляет 6 кВт, которые очевидно выделились в процессе химической реакции топливовоздушной смеси.

Теплотворная способность пропана 46.8 МДж/кг. При расходе топлива от 1 до 2 г выделяемая мощность составит от 50 до 100 кВт энергии, что на порядок выше выделенной энергии, оцененной по температуре на срезе. Из разницы этих энергий можно грубо оценить долю вступившего в реакцию топлива, которая составит от 5 до 10 %.

В заключении приводятся основные выводы и результаты работы. Делается заключение о возможности применения СВЧ-разряда для воспламенения топливовоздушных смесей при пониженных параметрах среды.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Отработана инициация СВЧ-разряда в условиях влияния внешних электромагнитных полей и конструктивных особенностей. При давлениях среды от 0.1 до 1.2 атм и напряжённостях поля до 0.2 кВ/см для различных схем установки электродов определены параметры, обеспечивающие стабильное зажигание глубокоподкритического стримерного СВЧ-разряда с длиной волны 12.4 см.
2. На основе расчетно-экспериментального исследования процесса взаимодействия высокотемпературного СВЧ-разряда и потока газа при скоростях по числу Маха от 0.1 до 0.8 показано, что имеется возможность изменения профиля полного давления на 8 – 10 % с помощью теплового дросселирования. Показана принципиальная возможность инициации и стабилизации СВЧ-разряда в потоке воздуха.
3. Предложена методика расчета эквивалента объемного источника энергии и показано, что при численном моделировании абсолютное отклонение коэффициента восстановления полного давления от эксперимента составляет не более 0.9 %.
4. В результате экспериментального исследования процессов воспламенения топливовоздушной смеси с помощью СВЧ-разряда в модельном воспламеняющем устройстве в условиях дозвукового и сверхзвукового течений при α от 0.75 до 1.3, давлениях от 0.1 до 0.5 атм и температурах набегающего потока 20°C показано, что воспламенение реализуется на всех режимах, а максимальная температура факела составляла 350°C.
5. На основе анализа процесса горения с помощью ПО Chemkin получено, что наблюдаемое в эксперименте воспламенение и горение происходит дальше от среза канала, а применяемые методы диагностики температуры существенно занижают значения, поэтому использование их для анализа затруднительно.
6. Реализация воспламенения в данных условиях ($P = 0.1$ атм, $T = 290$ К) другим способом затруднительно, тогда как применение СВЧ разрядного устройства позволяет инициировать горение.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Виноградов В.А., Комратов Д.В., Чирков А.Ю. Управление течением на основе сверхвысокочастотного разряда в диффузорном канале // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2020. № 3. С. 65-70. (1.21 п.л./1.34 п.л.). (Переводная версия: Vinogradov V.A., Komratov D.V., Chirkov A.Y. Flow Control in a Diffuser Channel by Microwave Discharge // Russian Aeronautics. 2020. Vol. 63. P. 439-444.).
2. Vinogradov V.A., Komratov D.V., Chirkov A.Yu. The effect of microwave discharge on subsonic gas flow with different power characteristics // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1370. 012022 (P. 5) (0.37 п.л. / 0.46 п.л.)/
3. Vinogradov V.A., Komratov D.V., Chirkov A.Y. Study of propane-air mixture combustion initiation by the formation of microwave plasma in a flow // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1094. 012027 (P.6) DOI: 10.1088/1742-6596/1094/1/012027 (0.3 п.л. / 0.37 п.л.).
4. Исследование смешения в модели жаровой трубы камеры сгорания с закруткой потока / Д.В. Комратов [и др.] // Авиационные двигатели. 2018. №1. С. 35-44 (0.87 п.л. / 1.32 п.л.).
5. Исследование процессов обтекания дозвукового входного устройства, интегрированного с планером летательного аппарата / Д.В. Комратов [и др.] // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2018. Т19. №4. С. 9 (0.27 п.л. / 1.04 п.л.).
6. Ланшин А.И., Комратов Д.В., Постников А.А. НЦМУ «Сверхзвук» в тематике разработки авиационных двигателей. Авиационные двигатели. 2022. № 1 (14). С. 69-78 (0.87 п.л. / 1.09 п.л.).
7. Комратов Д.В., Чирков А.Ю. Использование СВЧ-разряда для воспламенения топливовоздушной смеси при высоких скоростях потока. Инженерный журнал: наука и инновации. 2023. № 12 (144). № 2 (0.51 п.л. / 0.59 п.л.).