

**ОТЗЫВ официального оппонента на диссертацию
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
Корнева Константина Николаевича на тему: «Комбинированный разряд
в воздушных и углеводород-воздушных потоках и его применение для
инициации горения» по специальности 1.3.9. Физика плазмы**

Диссертационное исследование Корнева К.Н. затрагивает важную научно-техническую проблему в области плазменной аэродинамики, связанную с применением газовых разрядов в авиационных технологиях. В частности, работа посвящена разработке газоразрядных систем для компактных камер сгорания летательных аппаратов. **Актуальность** темы объясняется потребностью в новых способах управления процессами горения в высокоскоростных топливно-воздушных смесях, что является предметом активных исследований как в России, так и за границей. Диссертация Корнева К.Н. продолжает исследования по этой теме, ведущиеся сравнительно небольшим коллективом лаборатории на кафедре физической электроники МГУ им. М.В. Ломоносова.

Объектом исследования в диссертации является комбинированный разряд в потоке газа, под которым понимается разряд, формируемый двумя различными источниками энергии. В частности, в работе исследуется комбинированный разряд, составленный из СВЧ разряда и продольно-поперечного разряда постоянного тока. Подобное сочетание разрядов может снизить общее вложение энергии в разрядную область, а также открыть новые возможности для управления параметрами разряда. Основное внимание в исследовании уделено анализу способности данного комбинированного разряда инициировать горение в высокоскоростных пропан-воздушных потоках, а также оценке его преимуществ и ограничений по сравнению с другими типами разрядов в контексте плазменного поджига.

Для определения эффективности комбинированного разряда в задачах воспламенения газовых потоков соискатель поставил и решил ряд

экспериментальных задач, направленных на измерение основных характеристик разрядов и генерируемой ими плазмы в высокоскоростных воздушных и пропан-воздушных потоках. Выбранные в работе Корнева К.Н. типы газового разряда (комбинированный разряд, СВЧ разряд на инициаторе и продольно-поперечный разряд постоянного тока) в высокоскоростных (50 - 250 м/с) воздушных и пропан-воздушных потоках образуют низкотемпературную плазму, отличающуюся высокой плотностью как заряженных, возбужденных частиц, и химически активных соединений. Это является благоприятным условием для инициации и поддержания горения топлив при высоких скоростях потоков.

Практическая и научная значимость работы заключается в том, что автор получил новые экспериментальные данные о параметрах СВЧ, постоянно-токового и комбинированного разряда в потоке воздуха и углеводород-воздушных смесей, которые будут полезны исследователям, занимающимся созданием теоретических моделей разрядов при данных условиях, так и инженерам, разрабатывающим технологические устройства.

Краткое содержание работы.

Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения и 2 приложений. Общий объем диссертации 168 страниц, включающих 73 рисунка и 25 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 143 наименования.

Во введении соискатель обосновывает актуальность темы, определяет объект и предмет исследования, формулирует цели и задачи, а также описывает методологию работы. Раскрыты научная новизна и практическая значимость полученных результатов, обоснована их достоверность, указан личный вклад соискателя и приведены данные об апробации работы в научных публикациях. В завершение раздела дано краткое содержание диссертации.

В первой главе представлен аналитический обзор исследований, посвященных экспериментальному изучению различных типов разрядов, рассматриваемых в работе: надпорогового и подпорогового СВЧ-разрядов, продольного и продольно-поперечного разрядов постоянного тока. В том числе рассматриваются исследования комбинированных разрядов. Особое внимание уделено применению этих разрядов в задачах плазменной аэродинамики и управления процессами горения.

Вторая глава содержит описание экспериментальной установки и методов диагностики. Основным способом исследования плазмы являлась бесконтактная оптическая эмиссионная спектроскопия. Дополнительно проводились измерения электрических параметров разрядов с использованием осциллографов и высокоскоростной видеосъемки. Описаны методики определения газодинамических характеристик потока и оценки мощности, поглощаемой комбинированным и СВЧ-разрядом. Автор также анализирует границы применимости использованных методов и оценивает их погрешности.

Третья глава включает результаты вспомогательных численных расчетов, выполненных для интерпретации экспериментальных данных. Рассчитаны распределения электромагнитного поля в СВЧ-тракта, аэродинамические течения в канале установки, а также кинетика плазмы разрядов в рамках нуль-мерного приближения. Как справедливо отмечает сам соискатель, Корнев К.Н., эти расчеты носят приблизительный оценочный характер, однако их включение в работу оправдано, а их использование способствует более глубокому пониманию наблюдаемых в эксперименте явлений.

Четвертая глава посвящена экспериментальному исследованию глубоко подкритического СВЧ-разряда в высокоскоростных (150–250 м/с) воздушных потоках. Разряд генерировался на полуволновом металлическом инициаторе с помощью магнетрона частотой 2,45 ГГц (мощность до 5 кВт).

Представлена зафиксированная при высокоскоростной видеосъемке структура разряда, определены диаметр и длина плазменного канала в зависимости от скорости потока и давления. На основе анализа оптических спектров оценены плотность электронов, колебательная и вращательная температуры газа, а также степень его ионизации. Отдельно исследованы свойства разряда в воспламененных пропан-воздушных смесях.

В пятой главе представлены результаты экспериментов с продольно-поперечным и продольным разрядом в воздушных потоках (100–250 м/с, атмосферное давление), причем особое внимание уделено области малых токов (1–5 А), поскольку этот диапазон предполагается соискателем более энергоэффективным, по сравнению с изучаемым ранее коллективом лаборатории диапазонов токов. Получены зависимости напряженности электрического поля, плотности электронов, а также колебательной и вращательной температур от тока разряда и давления. Впервые проведено исследование радиальной структуры нестационарного продольно-поперечного разряда с использованием фотоэлектронных умножителей (ФЭУ), что представляет значительный интерес с точки зрения физики газового разряда. Также изучены свойства разряда в воспламененных пропан-воздушных потоках и его способность инициировать горение.

Шестая глава содержит результаты экспериментов с комбинированным разрядом в высокоскоростных воздушных и пропан-воздушных потоках. Обнаружены уникальные эффекты, возникающие только при совместном воздействии СВЧ-поля и постоянного тока, которые отличают комбинированный разряд от его частных подвидов чистых разрядов СВЧ и постоянного тока. Исследованы зависимости напряженности поля, квазичастоты разряда, концентрации электронов и температур газа от тока и давления при фиксированной СВЧ-мощности. Показано, что влияние поляризованного СВЧ-излучения на продольные и поперечные участки разряда различается и зависит от соотношения глубины его проникновения и

радиуса плазменного канала. В завершение главы проведен сравнительный анализ трех типов разрядов (СВЧ, постоянного тока и комбинированного) с точки зрения их эффективности для плазменного поджига.

В заключении приведены основные научные результаты, полученные в диссертационной работе.

Приложение I содержит таблицы скоростей плазмохимических реакций, использованных при моделировании кинетики плазмы. **Приложение II** содержит детали расчетов аэродинамических течений в экспериментальном канале.

Степень обоснованности выносимых на защиту положений, научных выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, их достоверность и новизна подтверждены использованием различных апробированных взаимодополняющих методов диагностики для измерения параметров плазмы разрядов.

Результаты полученные автором изложены подробно в диссертации. Результаты **новые** и оригинальные. Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации.

По материалам диссертации соискатель Корнев К.Н. опубликовал 5 статей в высокорейтинговых рецензируемых научных журналах, индексируемых в RSCI, Scopus, Web of Science. Опубликованные статьи отражают все основные полученные в ней результаты.

Результаты диссертации были представлены соискателем в 12 докладах на российских и международных конференциях.

Среди **достоинств** и наиболее ценных научных результатов, представленных в диссертации Корнева К.Н., можно выделить следующие.

1. Экспериментально полученные свойства комбинированного разряда в потоке воздуха и его смеси с пропаном при атмосферном давлении при

скоростях потока от 50 до 250 м/с. По полученным зависимостям свойств плазмы комбинированного разряда можно сделать вывод, что он отличается от разрядов постоянного тока и СВЧ и обладает определенными преимуществами для задач плазменно-стимулированного горения.

2. Новый и принципиально важный результат, касающийся пространственной неоднородности плазмы и определения радиальных распределений состава плазмы. Эксперимент показал, что поперечные размеры сечения разряда, где локализованы O , OH , N_2^+ , NH , N , различны и изменяются в пределах 0.8-2.1 мм, что говорит о наличии радиальных градиентов параметров плазмы разряда.

3. Интерес представляет также обзор различных режимов комбинированного разряда и феноменологических проявлений в них: развитие СВЧ стримеров из плазменного канала и электродов.

4. Сделаны полезные выводы об использовании разрядов, изученных в диссертации, определяющие направление дальнейших работ коллектива. Например, что нет необходимости повышать ток в разряде, т.к. при меньшей вкладываемой мощности температура газа на оси разряда остается достаточно высокой для воспламенения потока; что следует стремиться к большей частоте разряда для увеличения доли объема газа, обрабатываемой им.

К недостаткам диссертации можно отнести следующие.

1. На стенде реализуется трансзвуковое газодинамическое течение, при этом возможно возникновение скачков уплотнения в локальных сверхзвуковых зонах. Однако скорость потока оценивается только по смещению изображений плазмы разряда, что весьма ненадежно,

2. Для изучения динамики неоднородностей плотности в потоке возникающих при взаимодействии разрядов с потоком следовало применить

оптические рефракционные методы визуализации с использованием лабораторной теневой установки.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация написана на весьма высоком уровне и заслуживает положительной оценки. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации **соответствует специальности 1.3.9. Физика плазмы**, а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, а также оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Корнев Константин Николаевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9. Физика плазмы.

Официальный оппонент: 28.08.2025

Доктор физико-
математических наук,
профессор,
И.А. Знаменская
профессор кафедры
молекулярных процессов
и экстремальных
состояний вещества
физического факультета
МГУ имени
М.В.Ломоносова

Знаменская И.А.

Контактные данные:

119991, г. Москва, Ленинские Горы 1, Стр. 2. Физический факультет МГУ
имени М.В.Ломоносова

Телефон: +7 (495) 939-44-28,

e-mail: znamen@phys.msu.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена
диссертация:

01.02.05 - Механика жидкости, газа и плазмы

Подпись Знаменской И.А. удостоверяю

Ученый Секретарь
Ученого Совета
физического
факультета МГУ
имени
М.В.Ломоносова,
Д.ф.-м.-н., профессор

Стремоухов С.Ю.