

**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**

Поперечно-продольный разряд постоянного тока в потоке газа представляет собой один из интересных способов воздействия на поток и поджига углеводородной горючей смеси, который вот уже более четверть века вызывает интерес, как у отечественных, так и у зарубежных исследователей. Диссертация Корнева К.Н. посвящена изучению нового типа электрического разряда в потоке газа – комбинированного разряда, создаваемого совместно СВЧ и постоянно-токового источника. Постановка такой задачи вызвана практической потребностью повышения: надежности инициации и поддержания, при минимальной мощности, разряда; вероятности «быстрого» воспламенения и стабилизации горючей смеси.

Работа Корнева К.Н. – естественное продолжение работ по исследованию электрических разрядов в высокоскоростных потоках газа, более двадцати лет ведущихся на кафедре физической электроники физического факультета МГУ. Диссертант использует накопленные до начала его работы знания, развивая и применяя их для систематического исследования нового способа создания электрического разряда в потоке газа. Полученные в рецензируемой работе результаты представляют интерес, как с фундаментальной, так и с практической точек зрения. Фундаментальная значимость состоит в том, что полученные результаты могут быть использованы для развития и разработки новых физико-математических моделей пространственно-неоднородных нестационарных электрических разрядов в быстро движущихся ионизованных газовых средах.

Диссертационная работа Корнева К.Н. «Комбинированный разряд в воздушных и углеводород-воздушных потоках и его применение для инициации горения» проясняет физическую картину процессов,

происходящих в комбинированном разряде, формулирует основы для разработки новых типов газоразрядных устройств, которое могут быть использованы для поджига топлива в прямоточном воздушно реактивном двигателе. В связи с этим считаю, что работа Корнева К.Н. является востребованной и **актуальной**.

На основе аналитического обзора литературы Автором поставлены и решены следующие **задачи**, связанные с применением комбинированного разряда для плазменно-стимулированного воспламенения высокоскоростных углеводород-воздушных потоков. Экспериментально исследовано взаимодействие высокоскоростного потока с СВЧ разрядом, электрическим разрядом постоянного тока и комбинированным разрядом в зависимости от исходных параметров набегающего потока (скорости течения и компонентного состава газа, статических давления и температуры):

- 1) определены вольтамперные характеристики разряда постоянного тока и комбинированного разряда;
- 2) измерены поглощаемые мощности СВЧ разряда и разряда постоянного тока, а также отношения мощностей СВЧ и постоянного тока комбинированного разряда;
- 3) получены сведения о пространственно-временной эволюции структуры и внутренних параметров разрядов таких как: напряженность электрического поля, температура и плотность электронов, кинетическая температура газа, степени ионизации и т.д.

Новизна полученных Автором результатов заключается в следующем:

1. Получены новые экспериментальные данные о взаимодействии комбинированного разряда с высокоскоростными воздушным и пропан-воздушным потоками:

- а) измерены зависимости вольтамперных характеристик, квазичастоты, напряженности поля, температуры и плотности электронов, кинетической температуры газа, степень ионизации и т.д. от таких параметров, как скорость набегающего потока, величина разрядного тока и продольная (вниз по

потоку) координата, отношение вкладываемых мощностей СВЧ и постоянного тока;

б) установлена пространственно-временная эволюция структуры комбинированного разряда.

2. Впервые экспериментально подтверждена пространственная неоднородность плазмы продольно-поперечного разряда, связанная с радиальным распределением температур и состава плазменного канала разряда. Этот факт ранее не учитывался при исследованиях продольно-поперечного разряда и построении его моделей.

3. Впервые экспериментально Автором установлены 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 так же ранее не демонстрировалось.

4. Впервые для нестационарного комбинированного разряда в высокоскоростном воздушном потоке Автором обнаружено влияние поляризации внешнего СВЧ поля на плотность электронов в плазменном канале.

5. Впервые экспериментально Автором показана возможность использования комбинированного разряда для воспламенения топливно-воздушных смесей в камерах сгорания прямоточных двигателей.

Большинство результатов, представленных в диссертации, получены Автором впервые.

Степень обоснованности выносимых на защиту положений, научных выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, их достоверность.

Выводы и результаты, полученные Диссертантом, обоснованы и достоверны, так как опираются на сравнение полученных различными

методами экспериментальных и расчетных данных, а также на сравнение, там, где это возможно, с результатами других авторов.

Значимость для науки и практики полученных автором результатов.

Фундаментальная значимость состоит в том, что полученные результаты могут быть использованы для развития и разработки новых физико-математических моделей пространственно-неоднородных нестационарных электрических 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 камер сгорания воздушно-реактивных двигателей.

Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации.

Результаты диссертации могут быть использованы для расширения фундаментальных представлений о физических процессах, протекающих в электрическом разряде в высокоскоростных газовых потоках, а также - для оптимизации и разработки технологических устройств на основе продольно-поперечного разряда постоянного тока, СВЧ и комбинированного разряда.

Содержание диссертации.

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.

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

Во второй главе диссертации описываются экспериментальная установка, использованная в данной работе, и методики измерений.

Третья глава посвящена математическому моделированию свойств разряда.

Четвертая глава посвящена экспериментальному исследованию подпорогового СВЧ разряда, возбуждаемого с помощью полуволнового резонатора в потоке газа. В работе исследована пространственная структура СВЧ разряда и его размеры в зависимости от давления газа, измерена плотность электронов. Сформулированы преимущества и недостатки разряда в сравнении с разряда постоянного тока.

В пятой главе исследованы свойства разряда постоянного тока. Рассмотрен продольный и продольно-поперечный разряда постоянного тока. Получены данные о пространственной структуре разряда, зависимости спектров от точки в пространстве, плотности электронов и температуре газа в разряде.

В шестой главе приведены результаты исследования комбинированного разряда. При видеосъемке комбинированного разряда обнаружены необычные для разряда в поперечном потоке эффекты, такие как прорастание СВЧ стримеров, неоднородность свечения плазменного канала, поддержание свечения незамкнутых на электроды плазменных каналов. Визуальное влияние СВЧ поля на структуру комбинированного разряда происходит при сопоставимых подводимых мощностях СВЧ источника и источника постоянного тока. Методом синхронизации осциллограмм и

видеосъемки сделаны оценки поля в комбинированном разряде. Показано, что в комбинированном разряде достигаются высокая газовая температура $\sim 6000-9000\text{K}$ и концентрация электронов $\sim 10^{15}\text{см}^{-3}$, что благоприятно для задач плазменно-стимулированного горения. Проводится сравнение свойств изученных трех типов разряда с точки зрения эффективности их использования для воспламенения потоков.

В заключении сформулированы основные результаты работы. Выводы и экспериментальные результаты, полученные диссертантом, сравниваются там, где это возможно, с результатами, полученными другими авторами.

В Приложении I представлены таблицы скоростей плазмохимических реакций, использованных в расчетах кинетики плазмы продольно-поперечного и СВЧ разрядов.

В Приложении II приведены детали расчетов аэродинамических течений в канале экспериментальной установки.

Достоинства и недостатки работы.

Диссертация Корнева К.Н. является законченной работой, в которой исследованы пространственно-временные характеристики инициированного СВЧ разряда, продольно-поперечного разряда постоянного тока и комбинированного разряда. Особо следует отметить разнообразие средств измерений, используемых Автором в исследованиях. Корневым К.Н. разработана комплексная невозмущающая диагностика разряда с применением: методов спектроскопии испускания и визуального метода; создано оригинальное программное обеспечение для обработки первичных экспериментальных данных (на базе языка программирования Python). Наиболее интересным представляется найденный автором эффект различных радиальных пространственных распределений химических компонент разряда, который необходимо учитывать при кинетических расчетах химических процессов.

В совокупности, полученные Корневым К.Н. результаты проясняют физическую картину процессов, происходящих в разряде постоянного тока и

СВЧ разряде в высокоскоростных потоках газа, и в понимании влияния внешних регулируемых параметров установки на характеристики разрядов.

Можно ожидать, что полученные результаты будут использованы в организациях, занимающихся разработкой и исследованием прямоточного воздушного реактивного двигателя: МГТУ имени Баумана, АО ГНЦ «центр Келдыша», МАИ и т.д.

Вместе с тем работа **не свободна от недостатков:**

1. В тексте диссертации Автором не оговорено, каким общим требованиям должна удовлетворять установка для экспериментального моделирования взаимодействия электрического разряда с высокоскоростным потоком газа и плазменно-стимулированного воспламенения высокоскоростных углеводород-воздушных потоков.

2. Электрические разряды в высокоскоростных потоках газа, исследуемые Автором, являются нестационарными. Источники электромагнитного излучения в тестовой секции меняют пространственное положение относительно оптической оси системы (в данном случае относительно световолокна). Это приводит к искажению спектрального распределения интенсивностей в спектрах испускания: происходит смещение и дополнительное уширение молекулярных атомных линий и полос. Из содержания диссертации следует, что данные искажения не учитываются: при обработке спектров испускания; при определении концентрации электронов, кинетической, электронной и колебательной температур компонент ионизированной среды.

3. В диссертационной работе Автором не рассматривается: процедура определения кинетической, электронной и колебательной температур компонент ионизированной среды из обработки спектров испускания, которые не свободны от спектрального переналожения соседних молекулярных полос и атомных линий. Из содержания диссертации не ясно к каким компонентам ионизованного газа и электронным состояниям компонент относятся значения колебательной температуры.

4. Хорошо известно, что функция распределения электронов по энергиям является неравновесной в электрическом разряде. Автором не обсуждается к какой части энергетического распределения относится электронная температура.

5. При обработке спектров, Автором в диссертации опущено обоснование, что функция распределения по колебательным квантовым уровням энергии молекул подчиняется распределению Больцмана и, таким образом, ставит под сомнение введение в работе понятия колебательной температуры.

6. При обсуждении и интерпретации результатов, Автор оперирует понятием о равновесном состоянии ионизованной среды. С этим трудно согласиться, поскольку хорошо известно, что состояние ионизованной среды любого типа электрического разряда является (слабым или сильно) неравновесным.

7. В работе проведены сложные и интересные эксперименты. Но не определено место результатов работы в ряду других исследований. Следовало бы расширить обзор литературы и сравнение с параметрами электрических разрядов в других геометриях. Результаты исследований взаимодействия СВЧ разряда и разряда постоянного тока с сверхскоростными потоками газа следует более подробно сравнить с соответствующими результатами, полученными в экспериментах Грачева Л.П., Ходатаева К.В. и др. (МРТИ), Косого И.А., Грицинина С.И. и др. (ИОФ РАН), Скворцова В.В. и др. (ЦАГИ).

8. При моделировании изменения кинетической температуры газа от времени в поперечно-продольном разряде постоянного тока и СВЧ разряде с помощью программы ZDPlasKin Автором не рассматривается вопрос об определении молярных энтальпий химических реакций с участием компонент газа в возбужденных состояниях.

9. При определении структуры течения в тестовой камере посредством программы ANSYS FLUENT, Автором не уделяется внимание образованию

аэродинамических следов (донной области – ближней вязкой и дальней вязкой областей), которые в основном определяют инициацию и развитие электрических разрядов.

10. Следовало бы по спектрам плазмы сравнить состав плазмы СВЧ разряда, разряда постоянного тока и комбинированного разряда.

11. В исследованиях Автор основное внимание уделяет сопоставлению параметров разрядов в области малых значений тока разряда постоянного тока и мощностей СВЧ разрядов. Это понятно, но в целом хотелось бы иметь сравнение параметров разрядов в более широком диапазоне мощностей и скоростей потока.

Диссертация Корнева К.Н. является законченной научно-квалификационной работой, посвященной исследованию физических особенностей комбинированного СВЧ и разряда постоянного тока. Диссертация написана логичным, ясным языком. Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации. По материалам диссертации было опубликовано 5 статей в рецензируемых научных журналах, индексируемых в RSCI, Scopus, Web of Science, а основные результаты диссертации были представлены соискателем в 12 докладах на российских и международных конференциях.

В целом, отмеченные недостатки не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы, являются, по сути, во многом пожеланиями для дальнейшего развития сделанной работы и не умаляют значимости диссертационного исследования. 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:

Доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник Лаборатории № 14
Плазмохимии и физикохимии импульсных
процессов,
«Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Ордена Трудового Красного
Знамени Института нефтехимического синтеза
им. А.В. Топчиева Российской академии наук»
(ИНХС РАН),
Шахатов Вячеслав Анатольевич

19.08.2025

Контактные данные:

Телефон: +7 (495) 647-59-27 (тональный режим + доб. номер 3-24), e-mail:
vshakhatov@bk.ru; shakhatov@ips.ac.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена
диссертация:

01.04.08 - Физика плазмы

Адрес места работы:

119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинский проспект, д. 29

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена
Трудового Красного Знамени Институт нефтехимического синтеза им. А.В.
Топчиева Российской академии наук (ИНХС РАН), Лаборатория № 14
«Плазмохимии и физикохимии импульсных процессов» (website:
<http://www.ips.ac.ru>)

Телефон: +7 (495) 647-59-27, e-mail: director@ips.ac.ru

Подпись сотрудника ИНХС РАН Шахатова В.А. удостоверяю:

Ученый секретарь ИНХС РАН,

доктор химических наук, доцент

Ю.В. Костина

19.08.2025