

**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**

Использование газового разряда - достаточно давно известный, но до сих пор интересный с научно-технической точки зрения способ управления потоком газа у поверхности обтекаемых тел и воспламенения топливных смесей. Исследования, проводящиеся до сих пор в данной области в России и за рубежом, не теряют своей актуальности, поскольку стоят задачи сделать зажигание надежнее, а энергозатраты - меньше. В своей диссертации К.Н. Корнев исследует возможность использования для воспламенения высокоскоростных углеводород-воздушных потоков нового варианта газового разряда – комбинированного разряда, где одновременно используются СВЧ-излучение и постоянный ток. Подобная реализация разряда представляет интерес как с точки зрения физики газового разряда, так и с точки зрения ее применения в реальных технических установках. Работа Корнева К.Н. развивает многолетние исследования в области газовых разрядов, проводимые как на кафедре физической электроники МГУ, так и в других организациях в России и за рубежом. Полученные результаты полезны и для развития теоретической базы (помогут улучшить физико-химические модели разрядов в потоках газов), и для практики (например, в модельных камерах сгорания). Поэтому считаю, что работа, безусловно, **актуальна.**

В диссертационной работе Корнева К.Н. были успешно решены ключевые **задачи**, связанные с использованием комбинированного разряда для инициирования горения в высокоскоростных углеводород-воздушных потоках. В ходе экспериментальных исследований автор изучил:

1. Взаимодействие газового потока с тремя типами разрядов (СВЧ, постоянного тока и их комбинацией) при различных параметрах потока (скорость, состав газа, давление и температура);
2. Электрические свойства разрядов, включая вольт-амперные

характеристики, электрическое поле и распределение мощностей между СВЧ и постоянным током в комбинированном режиме;

3. Свойства плазмы разрядов, такие как температура электронов и газа, плотность электронов, степень ионизации и др.;

4. Динамику разрядов в пространстве и времени.

Сравнительный анализ результатов для трех типов разряда позволил выявить определенные преимущества комбинированного разряда для эффективного зажигания топливных смесей.

Большинство представленных результатов являются оригинальными и получены автором впервые. Научную **новизну** работы Корнева К.Н. кратко можно выразить следующим образом.

1. Впервые экспериментально получены комплексные данные о параметрах комбинированного разряда (вольт-амперные характеристики, температура электронов и газа, степень ионизации и др.) в зависимости от скорости потока, разрядного тока и других факторов. Изучена пространственно-временная структура разряда.

2. Экспериментально показана пространственная неоднородность плазмы продольно-поперечного разряда.

3. Выявлены принципиальные отличия комбинированного разряда от его предельных вариантов (СВЧ и продольно-поперечного), включая режим одновременного существования СВЧ стримеров и плазменного канала скользящей дуги. Данный режим обеспечивает возможность квазинепрерывной обработки газового потока.

4. Впервые показано влияние поляризации СВЧ поля на параметры плазмы комбинированном разряде в высокоскоростных воздушных потоках.

5. Экспериментально показана возможность применения комбинированного разряда для воспламенения топливных смесей в прямоточных двигателях.

Степень обоснованности выносимых на защиту положений, научных выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, их достоверность не вызывают сомнений, так как в работе проводится

сравнение полученных различными методами экспериментальных и расчетных данных. Рамки применимости использованных методов диагностики плазмы соискателем также принимались во внимание.

Полученные К.Н. Корневым результаты расширяют наши представления о разрядах в газах и могут быть использованы для разработки и проверки физических и математических моделей описания пространственно-неоднородных неравновесных квазистационарных разрядов в дозвуковых и сверхзвуковых воздушных потоках. Поэтому они имеют **научную и практическую значимость**.

Результаты диссертации имеют прямое отношение к проблеме поджига топлива и могут быть использованы в организациях, занимающихся разработкой и исследованием физических процессов в перспективных камерах сгорания ракетных и прямоточных двигателей, таких как ФГАОУ ВО «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», ЦАГИ, ЦИАМ, АО ГНЦ «центр Келдыша», ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» и аналогичных других.

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 диссертации представлен обзор работ, посвященных экспериментальному изучению низкотемпературной газоразрядной плазмы, полученной при помощи разных источников и ее влияние на воспламенение воздушно-углеводородных смесей.

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

Третья глава посвящена математическому моделированию свойств разряда и аэродинамики газовых течений в канале установки.

Четвертая глава посвящена экспериментальному исследованию подпорогового СВЧ разряда, возбуждаемого с помощью полуволнового инициатора 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 разряды 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 $\sim 10^{15}\text{см}^{-3}$. Проводится сравнение свойств изученных трех типов разряда с точки зрения эффективности их использования для воспламенения потоков.

В заключении сформулированы основные результаты работы. Отдельные выводы и экспериментальные результаты, полученные диссертантом, сравниваются с результатами, полученными другими

авторами.

В Приложении I представлены таблицы скоростей плазмохимических реакций, использованных при 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. Одним из неоспоримых **достоинств** работы можно назвать совмещение как экспериментальных исследований, так и численного моделирования. Кроме этого среди наиболее интересных результатов, являющихся также **достоинствами** данной работы, можно выделить следующие.

1. Эффект различных радиальных пространственных распределений для разных химических компонент разряда, требующий существенной модификации проводимых кинетических расчетов.

2. Проявляющиеся в комбинированном разряде эффекты взаимодействия СВЧ и постоянного полей, наблюдаемые как в изменении свойств плазмы (например, квазичастоты разряда, плотности электронов), так и визуально при видеосъемке. В частности, представляется полезным режим единовременного развития СВЧ стримеров и дуги продольно-поперечного разряда.

В своей работе Корнев К.Н. достиг значимых результатов, которые вносят существенный вклад в понимание физики газовых разрядов.

Вместе с тем хотелось бы отметить следующие **недостатки работы**:

1. В конце главы 1 или в её частях практически отсутствуют выводы из обзора литературы, на основании которых бы строилась работа.

2. В главах 3-6 мало внимания уделено сравнению полученных результатов с данными, полученными ранее как на кафедре физической

электроники МГУ, так и в других организациях. Редкое сравнение с данными других групп можно найти на рис.5.5, и еще в нескольких местах диссертации.

3. Выбранные параметры для представления результатов, такие как давление в ресивере воздуха и баллоне пропана, присущи конкретной экспериментальной установке. Корректнее использовать параметры потока, такие как скорость, число Маха, статическое давление в потоке.

4. Слабая диагностика для описания и анализа процессов воспламенения и горения воздушно-топливной смеси. Однако работа в целом не ставит главной задачей исследование горения, рассматриваются скорее параметры разрядов и их применение в этой области, но в дальнейшем следует провести более тщательный анализ. Например, воспользоваться теневым методом визуализации потока, методами газовой хроматографии отбираемых проб газов у выходного сечения, итд. У автора был ограниченный набор измерительных приборов.

Диссертация Корнева К.Н. является законченной научно-квалификационной работой. 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. Статьи соискателя, послужившие основой диссертации, в полной мере отражают основные полученные в диссертации научные результаты.

В целом, отмеченные недостатки не влияют на общую положительную оценку диссертационной 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:

Кандидат физико-математических наук,
Фирсов Александр Александрович,
старший научный сотрудник Лаборатории 21.3 «Плазменной аэродинамики и стимулированного горения» Объединенного института высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН)

Фирсов А.А.

Контактные данные:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН).
Лаборатория 21.3 «Плазменной аэродинамики и стимулированного горения»
старший научный сотрудник

E-mail: firsov@jiht.ru, телефон: +7 (495) 484-18-11

Адрес места работы: 125412, Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН).

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация: 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики, 01.04.08 – Физика плазмы

Подпись к.ф.-м.н., с.н.с. Фирсова Александра Александровича удостоверяю.

Ученый секретарь

ОИВТ РАН,

д.ф.-м.н.

125412, Москва, улица Ижорская, дом. 13, строение 2

Телефон: +7 (495) 485-90-09

e-mail: alexeykiverin@ihead.ras.ru

Киверин Алексей Дмитриевич

А.Д. Киверин