

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию
Логунова Александра Александровича «Пульсирующий поперечно-
продольный разряд в высокоскоростных потоках воздуха», представленную
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.9. Физика плазмы

Диссертация Логунова Александра Александровича посвящена экспериментальному исследованию характеристик поперечно-продольного пульсирующего разряда в высокоскоростном потоке воздуха. Близкий к исследуемому тип разряда за рубежом называется скользящим (sliding) разрядом. Этот разряд предложено применять для инициирования химических реакций, в том числе, процессов горения, очистки атмосферы, получения синтез-газа и других. Использование протяженных электродов, расстояние между которыми увеличивается с удалением от начала (от места ввода потока газа) позволяет реализовать устойчивое возбуждение разряда в области пространства, где расстояние между катодом и анодом мало, и дальнейшее увеличение объема, занимаемого разрядом, по мере его выноса потоком газа. Такой разряд может быть реализован в широком диапазоне давлений в потоке, вплоть до атмосферного и выше.

Исследуемый автором разряд отличается от изучаемого большинством других научных групп малым поперечным размером электродов, что позволяет поместить их в поток газа без существенных возмущений течения. Благодаря этому автору удалось реализовать разряд в широком диапазоне скоростей потока, в том числе при сверхзвуковых скоростях (для сравнения – типичная скорость потока в обычном скользящем разряде составляет 20–40 м/с). Это дает надежду на применение исследуемого автором разряда (конечно, при увеличении вкладываемой мощности) для эффективного воспламенения топливо-воздушных смесей в прямоточном реактивном двигателе.

К сожалению, свойства подобного разряда изучены недостаточно. Поэтому тема диссертации А.А. Логунова и решаемая автором задача исследования свойств разряда в широком диапазоне параметров течения является **важной и актуальной**.

Диссертация имеет стандартную структуру и состоит из введения, пяти глав, заключения, двух приложений и списка цитированных источников.

Во введении изложены актуальность избранной темы, степень ее разработанности, цели и задачи, объект и предмет исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, методология диссертационного исследования, а также положения, выносимые на защиту, степень достоверности результатов. Отмечен личный вклад автора в выполненные исследования, приведены сведения о публикациях, отражающих содержание работы, и об апробации ее результатов и выводов.

Первая глава содержит обзор теоретических и экспериментальных работ по теме исследования. На основе их анализа автор приходит к выводу, что использование поперечно-продольного пульсирующего разряда может быть эффективным способом воспламенения топливо-воздушной смеси. В то же время сведения о физических характеристиках плазмы такого разряда получены в узком интервале токов и давлений, часто носят оценочный характер, что связано со сложностями диагностики плазмы.

Во второй главе диссертации описаны экспериментальная установка и методики измерений. Установка позволяет вкладывать в разряд мощность до 20 кВт при подаче постоянного напряжения на электроды. Средства диагностики дают возможность фиксировать временную эволюцию формы разряда с помощью высокоскоростной видеокамеры, напряжения горения и тока разряда. Плотность электронов и их температуру, а также температуру газа определяли по спектрам излучения плазмы. Для измерения напряженности поля в разряде использованы зонды Ленгмюра, однако поскольку зонды могли сильно возмущать плазму, результаты зондовых измерений сравнивались с расчетами на основе напряжения горения разряда в предположении однородности плазменной петли и с учетом изменения ее размеров и формы, которые фиксировались видеокамерой.

В третьей главе представлены результаты измерений характеристик разряда: изменение во времени длины плазменного канала, скорости его перемещения, частоты пульсаций напряжения горения и тока разряда, напряженность электрического поля в плазме.

Четвертая глава посвящена экспериментальному измерению пространственного распределения параметров плазмы в анодной и катодной ветвях разряда. В ней также описаны зависимости этих параметров от тока разряда. Автору удалось зафиксировать несимметрию анодной и катодной ветвей, что экспериментально сделано впервые.

Пятая глава посвящена исследованию зависимостей параметров разряда от скорости потока газа и от минимального межэлектродного расстояния, а также анализу полученных результатов. Важность этих экспериментов обусловлена необходимостью проверить устойчивость поджига и повторного возбуждения разряда в результате вторичных пробоев при изменении внешних параметров. Кроме устойчивого вторичного пробоя газа необходимо обеспечить и возможно более эффективный нагрев газа разрядом. В завершающем разделе главы автор показывает возможность быстрого воспламенения пропан-бутановой смеси и ее квазистационарного горения в условиях высокоскоростного воздушного потока.

В **Заключении** диссертации сформулированы основные результаты работы.

В **приложениях** приведены методы расчета вращательно-колебательных спектров в плазме и таблицы с литературными данными о составе равновесной плазмы при различных температурах, что полезно для осмысления полученных результатов.

Научная новизна и ценность полученных результатов заключаются в том, что проведенные автором систематические измерения параметров разряда в широком диапазоне давлений позволили получить ряд новых интересных результатов. Выделим наиболее существенные, на взгляд оппонента.

1. Автор экспериментально подтвердил несимметрию анодной и катодной ветвей плазменной петли разряда.

2. Показано, что используемая конфигурация электродов позволяет непрерывно поддерживать поперечно-продольный разряд, а формирование новой разрядной петли происходит до того, как распадется предыдущая.

3. Использование малого расстояния между электродами приводит к устойчивому поджигу разряда. Однако нагрев газа при меньшем расстоянии может быть менее эффективным, что может негативно сказаться на времени инициирования горения.

4. Наконец, следует отметить полученные автором зависимости температуры электронов и температуры газа от скорости потока. Полученные данные могут свидетельствовать о переходе разряда к равновесному (хотя, термодинамическое равновесие в разряде, даже частичное, не достигается). Тем не менее полученный результат говорит о том, что с теорией разряда в настоящее время не все ясно и есть предмет для дальнейших исследований.

В качестве «изюминок» работы следует отметить показанную несимметрию разряда, обнаруженное различие скоростей движения катодного и анодного пятен по электродам и наблюдаемое сближение электронной и газовой температур при изменении скорости потока газа.

Научная и практическая ценность данной работы заключается в том, что автором получен и обработан очень большой объем нового экспериментального материала о свойствах разряда. С одной стороны, надежно показано, что используемый способ организации разряда позволяет реализовать его устойчивое непрерывное поддержание в высокоскоростном потоке газа. С другой стороны, полученные результаты свидетельствуют о необходимости моделирования разряда для корректной интерпретации экспериментальных данных. В частности, нужно определить, из какой зоны разряда идет излучение в различных диапазонах длин волн. Можно ли определять температуры в центральной зоне и на периферии разряда, и какие температуры реально определяются по спектральным данным? Кроме того, полученные спектры излучения разряда свидетельствуют об изменении его состава в различных режимах.

Положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, являются **достоверными и обоснованными**. Достоверность и обоснованность результатов обеспечивается использованием взаимодополняющих методов диагностики для определения параметров плазмы. Так, температура электронов определялась по линейчатому спектру

излучения атомов меди и по тормозному спектру электронов, температура газа – по колебательно-вращательным спектрам молекул CN и молекулярных ионов азота. Зондовые измерения напряженности электрического поля дублировались ее оценками из измеренного напряжения на разряде и длины разряда по данным видеосъемки.

Кроме того, основные результаты и выводы диссертации докладывались и обсуждались на ряде российских и международных конференций и опубликованы в 28 научных работах, включая 10 статей в рецензируемых журналах, индексируемых в международных библиографических базах данных и соответствующих по тематике и содержанию теме исследования. Все сказанное позволяет заключить, что полученные результаты и выводы являются обоснованными и достоверными.

Замечания по работе

1. Выполненные автором исследования и полученные результаты безусловно полезны и интересны. Представляется, что было бы полезным сотрудничество автора с теоретическими группами, которые занимаются изучением такого типа разряда для более глубокой интерпретации результатов.

2. Используемая аппаратура вынуждает проводить измерения, усредненные по нескольким последовательным плазменным петлям. Необходимо проанализировать, какие погрешности вносятся при таких измерениях.

3. Судя по тексту диссертации остался открытым вопрос о корректности отождествления температуры, характеризующей заселенности возбужденных состояний атомов меди в плазме, с температурой электронного газа. Для всех ли условий выполненных экспериментов такое отождествление справедливо?

Указанные замечания не снижают ценности выполненной А.А. Логуновым большой и оригинальной работы. Диссертация Логунова А.А. является законченной научно-квалификационной работой, посвященной исследованию физических характеристик пульсирующего поперечно-продольного разряда в высокоскоростных потоках воздуха. Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации.

Общая оценка работы

Считаю, что диссертация «Пульсирующий поперечно-продольный разряд в высокоскоростных потоках воздуха» соответствует всем требованиям, установленным «Положением о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова», а ее автор Логунов Александр Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9. Физика плазмы.

Главный научный сотрудник научно-исследовательского отдела 3
ФГБУН ИХР РАН
доктор физико-математических наук

Титов Валерий
Александрович

« 30 » октября 2024 г.

Контактные данные:

телефон: +7 (4932) 351859, e-mail: tva@isc-ras.ru

Индекс, почтовый адрес места работы: 153045, г. Иваново, ул. Академическая, д.1
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт химии растворов им. Г.А. Крестова Российской академии наук