

Отзыв

на диссертационную работу **Логунова Александра Александровича** на тему «Пульсирующий поперечно-продольный разряд в высокоскоростных потоках воздуха», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности: 1.3.9 Физика плазмы

Актуальность темы

Диссертация А.А.Логунова посвящена исследованию нестационарного контрагированного газового разряда в высокоскоростных потоках воздуха. Электрический разряд был реализован в электродной системе с двумя тонкими электродами, расходящимися вниз по потоку. При этом разряд существовал в режиме периодически повторяющихся токовых импульсов. Каждый импульс связан с возникновением между электродами высокопроводящего токового шнура, шунтирующего межэлектродный промежуток. Далее токовый шнур выносятся газовым потоком из межэлектродной зоны и вытягивается в форме петли. После достижения токовым шнуром определенной длины его шунтирование межэлектродного промежутка сильно ослабляется (или прекращается вовсе в случае разрыва шнура). В результате исходное высокое падение напряжение между электродами практически полностью восстанавливается, и в узкой части межэлектродного промежутка вновь возникает пробой с формированием нового высокопроводящего токового шнура и последующим повторением описанного выше процесса. В зарубежной литературе указанный автоколебательный разряд называется «gliding arc», что переводится как дуга, скользящая вдоль электродов.

Интерес к данному типу разряда обусловлен как технической простотой его реализации, так и широкими возможностями его технологического применения в различных областях, например, в биомедицине и экологии или при обработке материалов и модификации их поверхности. Ключевые характеристики контрагированной плазмы скользящего разряда, такие как температура плазмы, ее состав и проводимость, сильно зависят от сорта газа, его давления и скорости, а также от величины разрядного тока. В то же время, знание перечисленных зависимостей является необходимым условием для правильного выбора исходных параметров газоразрядной системы на основе скользящего разряда при решении конкретной практической задачи.

В этой связи следует отметить, что в диссертации А.А. Логунова проведены исследования скользящего разряда в потоке воздуха в новой области параметров - при дозвуковых и сверхзвуковых скоростях потока (значения чисел Маха от 0.15 до 1.5) и токе разряда от 4 до 16 Ампер. Эти режимы соответствуют условиям инициации горения в топливно-воздушной горючей смеси в прямоточном воздушно-реактивном двигателе без использования механических стабилизаторов. Таким образом, можно утверждать, что диссертационная работа А.А. Логунова формулирует физические основы для разработки прототипа нового газоразрядного устройства, которое может быть использовано не только в авиации, но и в других различных технологиях. С учетом вышесказанного, востребованность и актуальность диссертационной работы не вызывает сомнений.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций

Поставленные автором в диссертационной работе задачи основаны на критическом анализе большого объема литературы, посвященной исследованиям скользящего разряда (список литературы содержит 256 наименований). Анализ литературы проводился им с прицелом на выяснение возможности использования данного типа разряда для решения важной практической задачи - создание плазмы с параметрами, обеспечивающими

инициацию зажигания горючей смеси. В результате выполненного анализа автор пришел к вполне обоснованному заключению, что скользящий разряд, названный им поперечно-продольным пульсирующим разрядом, может быть перспективным инструментом для решения указанной задачи. В итоге автором была поставлена задача детального экспериментального исследования основных характеристик контрагированного поперечного-продольного пульсирующего разряда, таких как его пространственно-временные формы, а также параметры плазмы в формируемых токовых шнурах. Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации на основе качественно выполненных исследований, являются с высокой степенью обоснованными.

Достоверность и новизна исследования, полученные результаты, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации

Новизна полученных результатов определяется признанным в литературе приоритетом А.А. Логунова в проведении экспериментальных исследований поперечно-продольного контрагированного разряда в воздухе атмосферного давления в высокоскоростном потоке, касающихся условий поддержания разряда и его параметров. Им впервые детально исследованы параметры плазмы в двух вытянутых вдоль потока и почти параллельных плазменных шнурах, концы которых скользят по аноду и катоду. Эти шнуры названы автором «анодная и катодная ветви плазменного шнура», соответственно. Варьируемыми параметрами были скорости потока воздуха и расстояние между электродами в области их максимального сближения.

В результате автором обнаружены следующие новые физические эффекты.

1. Показано отсутствие симметрии в форме и идентичности в поведении катодной и анодной ветвей плазменного шнура. Эффект связывается с различием приэлектродных процессов у катода и анода, а также с противоположным направлением дрейфовой скорости ионов относительно потока в катодной и анодной ветвях плазменного шнура.

2. Обнаружено существование слабых повторных пробоев между катодной и анодной ветвями плазменного шнура, число которых за один цикл существования петлеобразного токового шнура варьируется от одного до пяти, причем слабые пробои не приводят к разрушению исходной токовой петли.

3. Установлено, что газовая и электронная температуры в контрагированном плазменном шнуре сближаются как с ростом плотности электронов в плазме, так и ростом скорости потока. Обнаруженный эффект имеет аналог в литературе для разрядов в покоящейся газе при увеличении плотности электронов в плазме.

Выводы и результаты, полученные диссертантом, обоснованы и достоверны, так как опираются на неоднократное повторение экспериментов в одинаковых условиях, использование различных методов для измерения одних и тех же величин. Сравнение с результатами теоретических и экспериментальных работ других исследователей в аналогичных условиях также показывают их удовлетворительное согласие. Особо следует отметить, что при выборе спектральных линий и областей непрерывного спектра для оптической диагностики автор проводил тщательную проверку применимости исходных предположений используемых спектральных методов.

Значимость для науки и практики полученных автором результатов

С точки зрения физики газового разряда, полученные результаты могут быть использованы для разработки и верификации физических и математических моделей описания пространственно-неоднородных неравновесных квазистационарных разрядов в дозвуковых и сверхзвуковых воздушных потоках. С практической точки зрения, они могут быть научной базой для выработки рекомендаций по использованию газоразрядной плазмы в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей для летательных аппаратов

нового поколения, в частности, для быстрого воспламенения и стабилизации горения в сверхзвуковых воздушно-углеводородных потоках.

Результаты, полученные автором и вошедшие в диссертацию, являлись базовыми для отчетов по грантам РФФИ (№ 08-02-01251-а, № 11-02-01091-а, № 18-02-00336-а), по Программе фундаментальных исследований Президиума РАН (Р-09) «Исследование вещества в экстремальных условиях» и гранту CRDF (№ RUP-1514-MO-06).

Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Результаты диссертации имеют прямое отношение к проблеме поджига топлива скользящим разрядом. По этой причине они могут быть использованы в организациях, занимающихся разработкой и исследованием электроракетных двигателей, таких как ФГАОУ ВО «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», АО ГНЦ «центр Келдыша», ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» и аналогичных других. Возможно также использование полученных результатов в промышленности для создания газоразрядных технологических установок.

Кроме того, полученные результаты имеют фундаментальный характер и расширяют существующие представления о физических и химических процессах, протекающих в скользящем разряде. Результаты диссертации будут полезны специалистам по кинетике плазмы при построении моделей плазмохимических моделей газовых разрядов, а также могут быть рекомендованы к использованию в специализированных учебных курсах по физике газового разряда.

Содержание диссертации

Диссертация Логунова А.А. содержит на 157 страниц текста, включая 65 рисунков и 7 таблиц. Работа состоит из введения, 5 глав, Заключение, в котором сформулированы основные результаты работы, и двух Приложений. Список цитируемой литературы содержит 256 наименования. состоит из введения, пяти глав, заключения/выводов, списка используемых источников, благодарностей и двух приложений.

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.

В первой главе диссертации дан обзор литературы, посвященной экспериментальному изучению низкотемпературной плазмы, полученной при помощи разных газоразрядных источников - с поперечно-продольным, скользящим разрядом, а также с плазменными струями. Анализ указанной литературы позволил автору выявить влияние различных типов плазмы на течение газа в высокоскоростных потоках, а также на воспламенение неподвижных или движущихся воздушно-углеводородных смесей. Отмечена важность создания теоретических моделей плазмы указанных разрядов, а также замечено, что разработка таких моделей наталкивается на недостаточность (или отсутствие) подробных сведений о параметрах плазмы. Именно это обстоятельство побудило автора к постановке задач об экспериментальном исследовании плазмы поперечно-продольного разряда как наиболее перспективного, по его мнению, для решения многих практических и теоретических задач.

Во второй главе подробно описывается набор экспериментальных устройств и методик, которые были использованы при выполнении данной работы. В этот набор входят экспериментальная установка, которая является моделью прямоточного воздушно-

реактивного двигателя, и блок диагностики плазмы. Экспериментальная установка включает в себя функциональные блоки, обеспечивающие создание газовых потоков и измерение их параметров (аэродинамический блок), инициацию разряда и регистрацию его характеристик (разрядный блок), включая фоторегистрацию эволюции разряда с помощью высокоскоростной видеокамеры. Аэродинамический блок содержит устройство для создания высокого давления, сопло Лавалья для создания сверхзвукового потока и аэродинамический канал. Подробно описаны автоматизированные методики измерения тока и напряжения на разряде, а также системы регистрации сигналов от электрических зондов, импульсных датчиков давления, термопарных датчиков, фотоэлектронного умножителя, цифрового спектрографа, тензодатчиков. Изложена спектральная методика измерений электронной, колебательной и газовой температур плазмы, а также концентрации электронов.

В третьей главе диссертации описываются результаты измерения электрических параметров скользящего разряда, а также динамики пространственной структуры формируемого им плазменного шнура, выясненной с помощью высокоскоростной видеокамеры. Привязка плазменного шнура к электродам осуществляется, соответственно, анодным и катодным токовыми пятнами. Установлено, что в межэлектродной области скорости скольжения анодного и катодного токовых пятен вдоль электродов меньше, чем скорость центральной части токового шнура. Другими словами, шнур выгибается в направлении потока (см. рис.3.2). При этом скорость скольжения анодного пятна выше скорости скольжения катодного пятна. В результате анодное пятно раньше катодного достигает кончика анодного электрода и фиксируется на нем. Спустя некоторое время на кончике катодного электрода фиксируется катодное пятно. Далее выгнутый токовый шнур выносится потоком и приобретает форму все более вытягивающейся петли. С увеличением длины токовой петли падение напряжения на ней растет, и при превышении пороговой величины происходит повторный пробой в узкой части межэлектродного промежутка с резким всплеском разрядного тока.

В целом, описанная выше периодическая динамика скользящего разряда известна в литературе, однако автор обнаружил ранее неизвестное явление в этой картине. Как оказалось, в некоторых режимах слабый повторный пробой может происходить не в самой узкой части межэлектродного промежутка, но в произвольном месте между электродами. Более того, слабый пробой может происходить и вне межэлектродного промежутка. В этом случае он происходит между анодной и катодной ветвями вытянутого плазменного шнура. При этом за один цикл существования петлеобразного токового шнура может произойти от одного до пяти и больше слабых повторных пробоев.

Важная особенность обнаруженного явления состоит в том, что слабые повторные пробой, возникающие при наличии вне электродов токовой петли, происходят при напряжении меньше порогового, требуемого для пробоя узкого межэлектродного зазора в отсутствии токовой петли. Кроме того, слабые пробой не приводят к резкому уменьшению напряжения между электродами, как это происходит при пробое самой узкой части межэлектродного зазора, и потому не приводят к распаду плазменной петли.

Эксперименты со скользящим разрядом при варьировании скорости потока, но при постоянной амплитуде напряжения источника питания показали, что увеличение скорости не влияет на величину максимального напряжения на разрядном промежутке, но ведет в среднем к уменьшению полной длины плазменной петли и, соответственно, к росту в ней напряженности электрического поля.

В четвертой главе приведены результаты измерений температуры электронов плазмы и нейтрального газа, а также плотности электронов в разных участках анодной и

катодной ветвей плазменной петли при варьировании разрядного тока. При наблюдении за плазменными шнурами на фиксированном расстоянии от электродов (1 см) эксперимент показал, что средняя температура электронов, температура газа и плотность электронов в плазменной петле растут с увеличением тока. Так, в диапазоне исследованных токов температура электронов растет от 10000 К до 16000 К, концентрация электронов растет от $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ до $4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, а температура газа увеличивается от 6500 до 7500 К. В то же время, несмотря на визуально кажущуюся одинаковость анодной и катодной ветвей, эксперимент обнаружил различие их плазменных параметров. Оказалось, что в анодной ветви плазменного шнура плотность электронов превышает плотность в катодной ветви примерно на 15%. Измерения плазменных параметров вдоль токовой петли показали, что с удалением от электродов плотность электронов падает примерно в 1.5 раза. Более разительное уменьшение обнаружено для температуры электронов. Так, при скорости потока 220 м/с и разрядном токе 12.5 А температура электронов в анодной ветви снижается от 1.2 до 0.55 эВ, а в катодной ветви от 0.9 до 0.45 эВ при удалении от электродов с 5 до 55 мм.

Обнаруженное различие плазменных параметров в анодной и катодной ветвях плазменного шнура автор интерпретирует в рамках представлений о продольном разряде в потоке газа. Согласно этим представлениям, анодная ветвь сопоставляется с продольным разрядом, в котором скорость дрейфа положительных ионов сонаправлена со скоростью газового потока. В катодной ветви ионы движутся против потока.

В пятой главе диссертации представлены результаты измерений параметров разряда и плазмы токовых шнуров в зависимости от скорости газового потока и расстояния между электродами в самой узкой его части. С прикладной точки зрения, важность этих экспериментов состоит в том, что они дают возможность определить область указанных выше параметров, в которой реализуется устойчивый поджиг скользящего разряда и его надежное повторное возбуждение в результате вторичных пробоев. Кроме того, имея в виду использование скользящего разряда для поджига горючей смеси, эти эксперименты позволяют выяснить диапазон указанных выше параметров, в котором обеспечивается наиболее эффективный нагрев газа разрядом. Автор показал, что первая задача успешно решается с использованием минимального зазора между электродами в диапазоне от 0.1 мм до 1 мм. В то же время, как оказалось, для эффективного нагрева газа необходимо увеличивать минимальное межэлектродное расстояние вплоть до величин, при которых устойчивое формирование пробоя может не всегда гарантироваться. При этом максимальная температура газа в плазменном шнуре, определенная по неразрешенной вращательной структуре молекулярных полос CN и N₂⁺, была довольно высокой, но не превышала 7500 К.

В этой главе представлена также экспериментальная информация о росте нагрева газа и плотности электронов в контрагированном токовом шнуре при увеличении скорости течения. При этом отмечалось снижение температуры электронов в плазменном шнуре, что, по мнению автора, свидетельствует о постепенном приближении плазмы в шнуре к частичному термодинамическому равновесию.

В качестве достоинства диссертационной работы следует отметить, что автором проведено большое количество измерений разных параметров столь сложного объекта каким является скользящий разряд при различных условиях его поддержания. Во всех случаях автор стремился провести измерения несколькими способами. Температура электронов измерялась по спектрам тормозного излучения и по отношению линий меди. Измерение поля в плазме проводилось с помощью зондов, однако полученные результаты проверялись по временной регистрации напряжения на разряде и пространственного

расположения положительного столба разряда. В качестве итогового положительного результата нужно указать, что автору удалось реализовать непрерывное поддержание пульсирующего разряда во времени, при котором зарождение и формирование новой плазменной петли происходит до распада предыдущей.

В качестве замечаний к диссертации можно отметить следующие.

1. Автор в процессе выполнения своих экспериментов получил много интересных данных и потому вполне естественно стремился поместить в диссертацию как можно большее их количество. Однако увеличение количества не всегда приводит к улучшению качества. Поэтому иногда обилие представленных экспериментальных результатов как важных, так и менее значимых осложняет усвоение материала и приводит к затруднению в понимании основной идеи, излагаемой автором.

2. Есть замечания к рисункам 3.4 и 5.19, на которых отсутствуют обозначения кривых и спектральных линий, о которых говорится в тексте. Так, на рисунке 5.19 приведены спектры излучения плазмы при различных токах, и при этом отсутствуют обозначения отдельных спектральных линий и полос. Это обстоятельство доставляет неудобство при чтении диссертации, поскольку читатель вынужден обращаться к рисунку 5.20, на котором эти линии и полосы отмечены, но этот рисунок находится на следующей странице.

3. На большинстве рисунков, представленных в диссертации, приведены значения погрешностей измерений. Однако в тексте работы не поясняется, связаны ли эти погрешности с ошибками использованного метода, с неточностью самих измерений или с нестабильностью потока газа и параметров разряда в нем. Это важный вопрос, и он нуждается в детальном обсуждении. На некоторых рисунках оценки погрешностей измерений вовсе не указаны. Что автор может сказать по поводу этого замечания?

4. Имеется вопрос, связанный с зондовыми измерениями плавающего потенциала, из которых определялась величина электрического поля в плазменном шнуре. Обычно плавающий потенциал зонда рассчитывается в приближении, что слой пространственного заряда вокруг зонда является бесстолкновительным. В этом случае плавающий потенциал зависит только от температуры электронов. Однако в работе исследуется разряд при атмосферном давлении. Хотя исследуемая плазма имеет достаточно высокую температуру (следовательно, и пониженную плотность газа по сравнению с комнатной температурой), тем не менее, правомочность применения теории зонда, предполагающей бесстолкновительность околосондового слоя, вызывает большие сомнения. Автору следовало бы обсудить этот вопрос детально в соответствующем разделе диссертации.

5. Различие плазменных параметров в анодной и катодной ветвях плазменного шнура автор интерпретирует в рамках представлений о продольном разряде в потоке газа. При этом анодная ветвь сопоставляется с продольным разрядом, в котором скорость дрейфа положительных ионов сонаправлена со скоростью газового потока, а аналогом катодной ветви является продольный разряд, в котором ионы движутся против потока. Однако аналогия между ветвями плазменного шнура и продольным разрядом может сработать лишь в случае так называемого режима продува, когда внешний поток проникает внутрь плазменного шнура. По моему мнению, в экспериментах автора реализуется режим обдува, при котором внешний поток обдувает анодную и катодную ветви плазменного шнура, но практически не проникает внутрь него. Растяжение плазменной петли происходит частично за счет трения потока о плазменный шнур, но, главным образом, за счет сноса потоком плазменной перемычки между концами анодной и катодной ветвей петли. Что автор может сказать по поводу этого замечания?

6. В диссертационной работе нет подробного обоснования необходимости

использования материалов Приложения 2. По моему мнению, это приложение можно было бы опустить без ущерба качеству диссертации.

Однако, отмеченные выше недостатки не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы и являются, по сути, либо замечаниями редакционного толка, либо пожеланиями для дальнейшего развития сделанной работы.

В целом, диссертация Логунова А.А. является законченной научной квалификационной работой, посвященной экспериментальному исследованию физических особенностей поперечно-продольного пульсирующего разряда в высокоскоростном воздушном потоке. Полученные результаты, среди которых есть ряд новых, достаточно подробно изложены в диссертации. Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации. Содержание диссертации в полной мере отражено в 10 публикациях. Статьи опубликованы в изданиях, индексируемых в международных реферативных базах и базе РИНЦ.

Представленная работа соответствует критериям, установленным для кандидатских диссертаций Положением о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, а ее автор Логунов А.А. заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 - физика плазмы.

Доктор физико-математических наук,
профессор,
начальник лаборатории кинетики
слабоионизированной плазмы
АО ГНЦ РФ «ТРИНИТИ»
Акишев Юрий Семенович

Акишев Ю.С.

108840, г. Москва, г. Троицк,
ул. Пушкина, владение 12.
Телефон: +7 495 841 5236,
e-mail: : akishev@triniti.ru

Подпись Акишева Ю.С. удостоверяю
Ученый секретарь
АО ГНЦ РФ «ТРИНИТИ»
кандидат физико-математических наук
Ежов Александр Александрович
Телефон: 8 (495) 841-53-09

Ежов А.А.