

На правах рукописи

Колесников Евгений Борисович

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ ИМПУЛЬСНЫХ РАЗРЯДОВ СО
СВЕРХЗВУКОВЫМИ ПОТОКАМИ ВОЗДУХА

01.04.08 – физика плазмы

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2009

Работа выполнена на кафедре Физической Электроники Физического Факультета Московского Государственного Университета им. М. В. Ломоносова

Научный руководитель:

Кандидат физико-математических наук, доцент Черников В. А.

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук, профессор Синкевич О. А.

Доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Бархударов Э. М.

Ведущая организация: ФГУП «Московский Радиотехнический Институт» Российской Академии Наук.

Защита состоится «18» февраля 2010 года в 17-00 на заседании диссертационного совета Д 501.001.66 при Московском государственном университете им. М.В.Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, Физический факультет МГУ, ауд. _____.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета МГУ им. М.В.Ломоносова.

Автореферат разослан «__» _____ 2010 года

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 501.001.66,
кандидат физико-математических наук

Карташов И. Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Одним из важнейших направлений плазменной аэродинамики является исследование возможности реализации плазменно-стимулированного поджига и горения сверхзвуковых топливных смесей. Необходимость этого обусловлена разработкой прямоточных реактивных двигателей, которые способны обеспечить движением летательных аппаратов со сверх и гиперзвуковыми скоростями. При столь высоких скоростях полета только применение плазменных источников способно обеспечить объемное и быстрое воспламенение топливно-воздушной смеси за счет эффективной наработки радикалов. Для данных целей в различных лабораториях проведено большое количество работ по изучению взаимодействия со сверхзвуковым потоком разрядов постоянного тока, разрядов различных частотных (ВЧ и СВЧ) диапазонов, высоковольтных разрядов с длительностью импульсов в наносекундном диапазоне, с преионизацией УФ излучением, а также их различные комбинации.

В настоящей работе экспериментально исследуются параметры и поведение в сверхзвуковом потоке плазмы магнитоплазменного компрессора, капиллярного плазмотрона и продольно-поперечного электродного разряда. Процессы взаимодействие таких разрядов со сверхзвуковыми потоками воздуха не были ранее изучены, поэтому тема настоящей диссертационной работы является достаточно актуальной.

Цель работы.

Основные задачи диссертационной работы :

- Исследование взаимодействия плазмы импульсных разрядов со сверхзвуковыми потоками воздуха.
- Определение основных характеристик таких разрядов в сверхзвуковых потоках.
- Изучение возможности применения таких разрядов для воспламенения сверхзвуковых топливных смесей.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- Исследованы процессы взаимодействия плазмы, созданной магнитоплазменным компрессором (МПК) с поперечными сверхзвуковыми потоками воздуха. Показано, что в неограниченном пространстве характерные параметры разряда в сверхзвуковом потоке остаются практически такими же, что и при разрядах МПК в неподвижном газе. В случае разрядов в замкнутом пространстве плазма

МПК может заполнять все сечение поперечного потока и даже запирает его.

- Впервые проведены исследования плазмы, созданной МПК относительно небольшой мощности с малыми размерами разрядного промежутка. Показано, что длина плазменной струи, отнесенная к миделю МПК, превышает значения, характерные для МПК классического типа. Обнаружено, что в конце импульса разрядного тока в зависимости от энерговклада в разряд образуются разнообразные плазменные формирования, характерные для истечения плазмы импульсных плазмотронов в затопленное пространство.
- Детально изучен процесс взаимодействия плазмы капиллярного разряда со сверхзвуковым воздушным потоком. Обнаружено, что в зависимости от начальных условий плазменная струя капиллярного разряда может либо частично проникать в поток, либо практически полностью сноситься потоком,
- Проведено комплексное исследование электродного продольно-поперечного разряда постоянного тока в сверхзвуковом потоке. Показано, что значение приведенного электрического поля в плазме электродных разрядов в сверхзвуковых потоках определяется главным образом током и давлением. Сделано предположение, что параметры таких разрядов, которые, в основном, определяются значениями E/N , не зависят от способа размещения разряда в потоке и от типа разряда, а основными внешними параметрами являются величина разрядного тока и значения статического давления. Таким образом, результаты, полученные для одного типа разряда можно переносить на другой тип разряда. Показано, что плазма электродных разрядов в сверхзвуковом потоке в исследованном диапазоне давлений (до ≈ 200 Тор) даже при токах в десятки ампер остается неравновесной.
- На основании полученных экспериментальных данных показано, что основным параметром, определяющим характер взаимодействия плазменных струй со сверхзвуковыми потоками воздуха, является мощность, выделяемая в разряде. При относительно большой мощности ~ 20 мВт скорость распространения струи в несколько раз превышает скорость сверхзвукового потока при $M=2$, при этом поток практически не влияет на плазменную струю. При уменьшении мощности до значений $\sim 0,8$ мВт, плазма практически не проникает в поток, т.к. при этом ее скорость становится меньше скорости потока. При дальнейшем уменьшении мощности, выделяемой в разряде, до величины ~ 3 кВт плазменная струя создается потоком и распространяется вдоль него.
- Полученные экспериментальные результаты показывают, что импульсная плазма МПК может быть использована для объемного воспламенения сверхзвуковых топливных смесей, в то время как капиллярный и продольно-поперечный разряды могут применяться для

инициации горения вдоль потока.

Практическая ценность работы.

Полученные в работе экспериментальные результаты могут быть использованы при проведении дальнейших научных работ по исследованиям возможности применения плазменных разрядов, в том числе и импульсных, для инициации поджига и горения топливных смесей в сверхзвуковых потоках.

Они могут быть использованы для оптимизации рабочих условий существующих устройств воспламенения сверхзвуковых потоков топливных смесей и при целенаправленной разработке и создании новых установок.

Апробация диссертации.

Основные результаты работы обсуждались на семинарах кафедры электроники физического факультета МГУ и докладывались на следующих конференциях:

1. Ломоносовские чтения, МГУ, Физический факультет, апрель 18-28, 2005.
2. 43 международная конференция AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, США, Рино, январь 10-13 2005.
3. 44 международная конференция AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, США, Рино, январь 9-12 2006.
4. Тезисы докладов XXXIII международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС, Россия, февраль 13-17, 2006.

Публикации.

Основные результаты диссертации опубликованы в 8 научных работах, список которых приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Первая глава носит вводный характер и содержит обзор литературы, вторая глава содержит описание экспериментальных установок и использованных экспериментальных методов. Третья, четвертая и пятая главы оригинальны. В целом диссертация содержит 156 страниц, включая 101 рисунок и библиографию из 184 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ.

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения.

Во введении дано обоснование актуальности темы представленной работы, сформулированы цели и задачи исследования, показана научная новизна и практическая значимость работы, приведены выносимые на защиту положения.

В первой главе представлен обзор теоретических и экспериментальных работ, посвященных вопросам плазменной аэродинамики, а именно управлению аэродинамическими характеристиками летательных аппаратов, влиянию газоразрядной плазмы на распространение ударных волн и плазменно-стимулированному горению сверхзвуковых топливных смесей.

Эксперименты с электрическими разрядами в высокоскоростных потоках газов проводятся с середины XX века. В 40-50 годах коронные разряды исследовались в связи с проблемой снижения электризации самолетов, а в 70-80 электрические разряды изучались с целью их применения для оптической накачки мощных проточных лазеров. Публикации по снижению сопротивления тел при помощи подвода энергии в набегающий поток вновь пробудили интерес к изучению электрических разрядов, но уже в приложении к аэродинамике.

Интерес к этим исследованиям оказался настолько велик, что, начиная с 1999 года, проходят международные конференции, специально посвященные проблемам плазменной аэродинамики: ежегодно в Москве - "Совещание по магнитно-плазменной аэродинамике в аэрокосмических приложениях" и с 1997 г. также ежегодно в США – Weakly Ionized Gas Workshop в рамках одной из конференций по аэрокосмическим приложениям, организованные AIAA.

На данный момент опубликовано большое количество экспериментальных и теоретических работ посвященных вопросам снижения лобового сопротивления летательных аппаратов. Полученные результаты показали, что газовые разряды и плазменные струи могут значительно изменить характер обтекания тел и, в частности, уменьшить их сопротивление и тепловые нагрузки на них (особенно при сверхзвуковых и гиперзвуковых скоростях потока).

Другим важным направлением плазменной аэродинамики является изучение возможности использования плазмы для поджига сверхзвуковой топливно-воздушной смеси в прямоточных реактивных двигателях. Одним из эффективных способов создания плазменных областей в сверхзвуковом потоке являются электрические разряды. Для данных целей используются разряды постоянного тока, ВЧ и СВЧ разряды, высоковольтные разряды.

Широко исследованы разряды «классического» типа, горящие между двумя электродами в сверхзвуковом потоке в режиме дуги или тлеющего разряда. Для практических приложений характерно большое разнообразие конструктивных решений электродных узлов таких разрядов в аэродинамических трубах, включая разряды в потоке, создаваемые на поверхности диэлектрика или в выемках. Кроме того, исследуются разряды в соплах с центральными телами (сопло – анод, центральное тело – катод).

Такие электроразрядные поджигающие устройства воспламеняют смесь вблизи электродов, поэтому их размещение у стенок малоэффективно, а размещение в потоке создает нежелательные аэродинамические возмущения.

В то же время определенные типы разрядов могут создавать области нагретой плазмы вдали от их источника. Наиболее известные из них – плазмодинамические, когда протекающий импульсный ток очень велик ($I = 10\text{--}10000$ кА), а энергия в импульсе – порядка килоджоулей и выше. Такие разряды могут обеспечить режим объемного воспламенения с помощью плазменного нагрева и УФ-излучения. Типичным примером плазменного генератора, позволяющим создавать гиперзвуковые потоки плотной эрозионной плазмы, является магнитоплазменный компрессор (МПК).

Эрозионная плазма, характерная для плазменных струй, создаваемых капиллярными разрядами, также может быть использована для инициации поджига и горения сверхзвуковых топливных смесей. При небольших значениях токов ($I \approx 100$ А) и запасенной электрической энергии ($W \approx 200\text{--}400$ Дж) формируется дозвуковая плазменная струя, которая проникает в плотный газ на расстояния, значительно превышающие характерные размеры электродной системы.

Большое количество экспериментальных и теоретических работ посвящено исследованию возможности применения СВЧ разрядов для поджига сверхзвуковых топливных смесей. Применялись разряды, создаваемые как в надкритическом (свободно локализованные СВЧ разряды), так и в подкритическом (СВЧ разряды с инициатором) режимах. Показано, что плазменные формирования, созданные СВЧ – излучением различного частотного диапазона обладают рядом преимуществ по сравнению с другими плазменными источниками. С одной стороны время создания импульсной СВЧ – плазмы таково, что за импульс разряда плазменное формирование сносится потоком на незначительные расстояния, т.е. практически остается в области максимального энерговыделения СВЧ – излучения. С другой стороны современные СВЧ – генераторы позволяют создавать такую плотность мощности излучения, при которой даже за такое короткое время нейтральный газ в плазме нагревается до температур $\sim (2000\text{--}2500)$ К. При таких температурах уже возможна инициация горения сверхзвукового потока топливной смеси плазмой СВЧ –разрядом.

В обзоре приводится краткое перечисление теоретических работ, посвященных численному моделированию процессов взаимодействия

плазменных формирований, созданных разрядами различных типов, со сверхзвуковыми газовыми потоками.

В конце первой главы приводится краткое обоснование целей настоящей работы и формулируется постановка задач необходимых исследований.

Вторая глава содержит описание экспериментальных стендов и методики измерений.

В работе использовались два экспериментальных стенда, первый из которых позволял исследовать взаимодействие сверхзвукового воздушного потока с плазменными образованиями, как в неограниченном пространстве, так и в ограниченном объеме, а второй – в сверхзвуковом аэродинамическом канале.

В первой серии экспериментов использовался экспериментальный стенд (Рис. 1.), основной частью которого являлась вакуумная камера (1). Система откачки вакуумной камеры позволяла получать начальное давление от 1 Тора до 1 атмосферы. Внутри камеры находился аэродинамический канал (2), разработанный с учетом возможности использования плазгодинамического поджига горючей смеси при инжекции высокотемпературной плазмы, создаваемой различными типами генераторов, в зону реакции. Основные характеристики потока регистрировались системой измерения газодинамических параметров (6), сигнал с которых выводился через вакуумированные разъемы. Значения величины разрядного тока и падения напряжения на разряде определялись при помощи соответствующей системы измерения электрических параметров (8). Через имеющиеся иллюминаторы (7) проводилась фотосъемка при помощи сверхскоростного фоторегистратора (9).

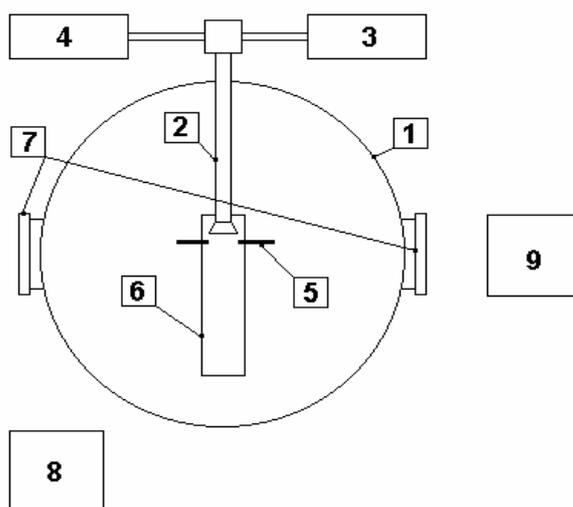


Рис. 1. Схема первого экспериментального стенда: 1- вакуумная камера, 2- аэродинамический канал со сверхзвуковым соплом, 3- система подачи воздуха, 4- система хранения и подачи топлива, 5- генераторы плазмы, 6- рабочий канал и система измерения газодинамических параметров, 7- иллюминаторы, 8- система измерения электрических параметров, 9- сверхскоростной фоторегистратор.

Данная установка позволяет:

1) Проводить исследование характеристик разряда в сверхзвуковом потоке смеси воздуха с газообразными углеводородами и определять влияние параметров потока – давления p , температуры T , скорости V , и состава смеси (например, коэффициента избытка топлива) на характеристики разряда, воздействие разряда на поток, образование активных радикалов и ионизацию среды, а также возможность инициации и стабилизации горения при соответствующих параметрах потока.

2) Проводить эксперименты при числах Маха потока топливно-воздушной смеси, равных 1,5, 2,0 и 3,0, что соответствует диапазону скоростей в камерах сгорания гиперзвуковых ПВРД.

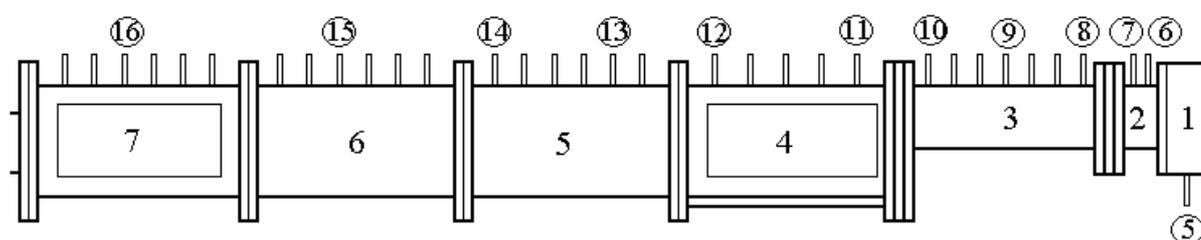


Рис. 2. Схема сверхзвукового канала: 1-Фланец крепления термопары и датчика давления, 2- сопло, 3- формирующий канал, 4- рабочая секция, 5,6-измерительные секции, в кружках 5-16 – датчики давления в канале

Часть экспериментов проводилась на второй экспериментальной установке, отличительной особенностью которой являлось внешнее расположение сверхзвукового канала (Рис. 2.), который служит для формирования сверхзвукового течения воздуха, для ввода топливной смеси и для исследования ее поджига. Канал состоит из нескольких секций. Непосредственно на входе канала размещается секция сверхзвукового сопла (2), рассчитанного на число Маха $M=2$. За секцией сопла размещена формирующая секция (3), представляющая собой канал с внутренним диаметром 25 мм и длиной 25 см., которая предназначена для формирования однородного сверхзвукового течения. С формирующей секцией соединяется рабочая секция с внезапным расширением канала (4), которая имеет прямоугольное сечение с размерами $25 \times 40 \text{ мм}^2$ и длину 20 см. С обеих сторон большой грани этой секции расположены два иллюминатора, в которых вставлены кварцевые окна, что позволяет визуально наблюдать процессы плазменного разряда и горения топливно-воздушной смеси в канале. В малой нижней грани этой секции сделано отверстие для размещения люка с соответствующими генераторами плазмы. За рабочей секцией следуют три секции, предназначенные для проведения различных измерений (5 - 7). Все секции имеют прямоугольное сечение, аналогичное рабочей секции, и длину 20 см. В одной из этих секций (7) также размещены иллюминаторы для проведения визуальных и других диагностических измерений. Весь канал

выполнен из нержавеющей стали.

Основой системы контроля основных параметров сверхзвукового потока являются датчики давления (Рис. 2, поз. 6 - 16), размещенные во всех секциях рабочего канала.

Помимо экспериментальных установок в главе описаны применявшиеся в работе различные диагностические комплексы и методы измерения и расчета параметров сверхзвукового потока и разряда: сверхскоростная фотография, теневая установка, методика спектральных измерений и методика расчета температуры компонент плазмы.

В третьей главе диссертации приводятся результаты экспериментальных исследований плазменной струи МПК в неподвижном воздухе и сверхзвуковом воздушном потоке, а также данные численных модельных расчетов.

На Рис. 3 схематически показана одна из двух конструкций плазмотрона, используемого в экспериментах, и схема его питания. Плазменный генератор состоял из опорной шайбы (1), выполненной из латуни, которая являлась одновременно минусовым электродом. Кроме того, при помощи этой шайбы плазмотрон крепился к разрядной камере. В опорную шайбу вворачивался изолятор (2), сделанный из оргстекла. На изоляторе крепилась переходная муфта (3), в которую вворачивался стержень (4), являющийся положительным электродом. Детали 3 и 4 были сделаны также из латуни.

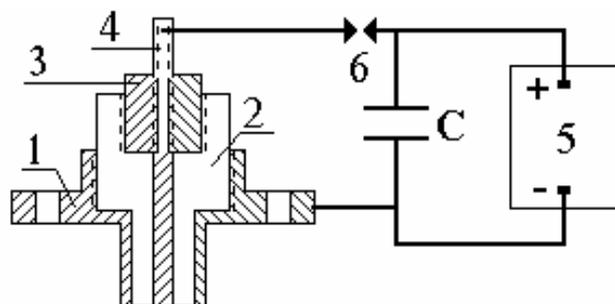
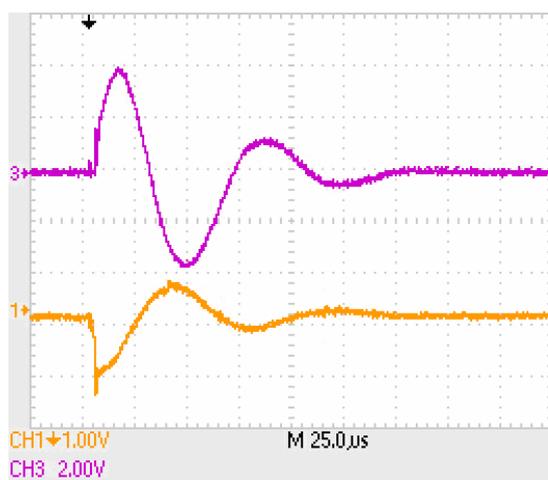
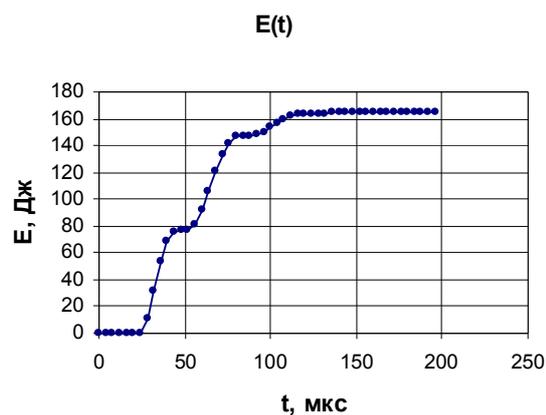


Рис. 3. Конструкция плазмотрона: 1 - опорная шайба (минусовой электрод), 2 - изолятор, 3 - переходная муфта, 4 – стержень (положительный электрод), 5 - источник постоянного тока, 6 - разрядник.

Полученные электрические характеристики разряда (рис. 4-а) позволили рассчитать энергию, выделяемую в плазме разряда как функцию времени. Типичный результат таких расчетов приведен на рис. 4-б. Из представленной зависимости видно, что время основного энергоснабжения в плазме практически совпадает с первым квазипериодом разрядного тока, т.е. равно 65 - 70 мкс и составляет примерно 150 — 400 Дж в зависимости от первоначальной энергии, запасенной в конденсаторе.



а)



б)

Рис. 4. (а) - типичные осциллограммы разряда: 1 – инвертированного напряжения, 3 – разрядного тока. (б) - типичная временная зависимость энергии, выделяемой в разряде. $C=50$ мкФ. $U=3.5$ кВ. $P=100$ тор.

Динамика разряда фиксировалась при помощи сверхскоростного фоторегистратора. Были получены фотографии временной эволюции разряда. На Рис. 5 показаны типичные результаты покадровой съемки динамики плазменного образования в неподвижном воздухе.

Результаты обработки СФР-грамм позволили получить зависимости длины плазменной струи от времени для различных условий разряда. На основании обработки большого количества таких зависимостей были выяснены основные закономерности, касающиеся скорости движения передней светящейся плазменной границы (Рис. 6.).

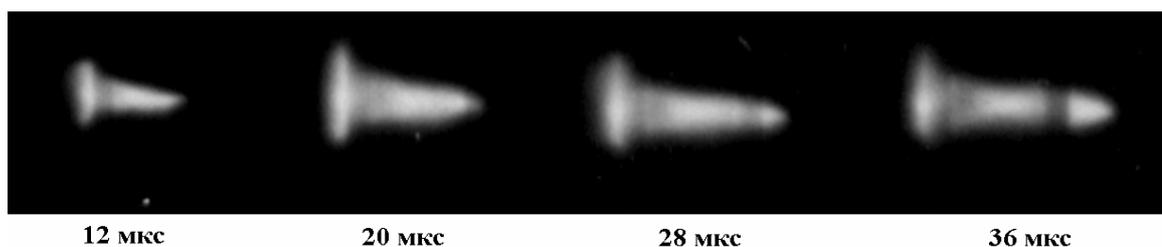


Рис. 5. Фрагменты СФР-граммы плазменной струи созданной МПК в неподвижном воздухе. Выдержка каждого кадра 4 мкс.

Было определено, что в начальные моменты времени, соответствующие первой кумулятивной фазе, скорость распространения плазмы достаточно велика и изменяется в пределах от 1 км/с до 7 км/с. Этот момент времени соответствует первому полупериоду разрядного тока. Затем в течение второго полупериода разрядного тока скорость движения передней плазменной границы резко замедляется и становится равной при различных условиях величине порядка 500 м/с - 800 м/с.. После окончания первого

квазипериода (после окончания основного энерговыделения в плазме), движения передней плазменной границы еще более замедляется, скорость снижается до значений меньших 100 м/с. Таким образом, в этой стадии развития движение остывающей плазмы практически прекращается.

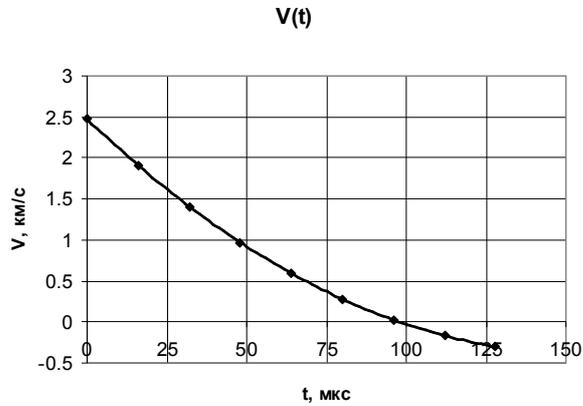


Рис. 6. Типичная зависимость скорости плазменного образования от времени. $C=100$ мкФ. $U=3.5$ кВ. $P=50$ тор.

Следующая серия экспериментов была проведена в условиях, которые позволяли варьировать расстояние между внешним диаметром центрального стержня и внутренним диаметром наружного электрода, т.е. величину разрядного промежутка, и соответственно, изменять пробойное напряжение. Это позволило изменять энергию, запасенную в накопительном конденсаторе, а, следовательно, и энергию, выделяемую в плазме.

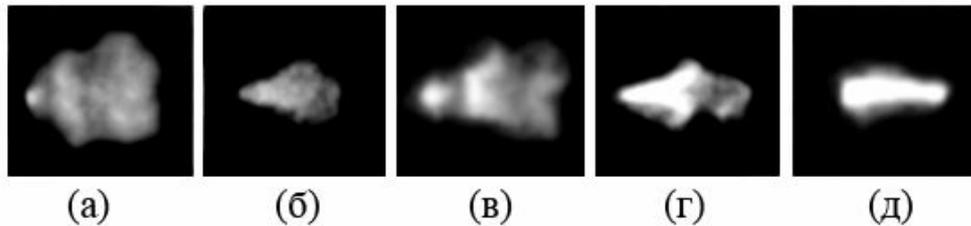


Рис. 7. Скоростные фотографии при различных режимах (энерговклада W) истечения в неподвижном воздухе: б)-1000 Дж, 16 мВт, в),г) – 600 Дж, 10 мВт, д) – 300 Дж, 6 мВт.

Эксперименты показали, что в зависимости от вложенной в разряд энергии, могут реализовываться плазменные образования различной формы. Так практически при всех давлениях затопленного пространства и при всех энерговкладах в течение первых 10–20 мкс наблюдаются примерно одинаковые картины представленные на Рис. 7-а. Продольные размеры плазменного образования при этом достигают 30–50 мм. В течение следующей стадии разряда происходит основное проникновение плазмы в газ, при этом могут реализоваться плазменные образования с несколько

различной структурой. Так, при больших энерговкладах в плазму (~1000 Дж) практически при всех начальных давлениях в разрядной камере в течение второй стадии формируются гантелеобразные плазменные образования, которые трансформируются в шаровые структуры остывающей плазмы (Рис. 7-б). При энерговкладах (~600 Дж) наблюдались плазменные структуры, характерные для истечения из сверхзвукового сопла: диск Маха с висячими скачками уплотнения, из которых формировались плазменные структуры грибообразной формы (Рис. 7-в, г). При пониженных энерговкладах (~300 Дж) в плазму наблюдались турбулентные плазменные струи (Рис. 7-д).

На основании проведенных измерений было получено, что скорость движения плазмы во время основного энерговыведения значительно превышает скорость сверхзвукового потока ~ 500 м/с при $M=2$. Действительно экспериментальное исследование взаимодействия плазмы МПК со сверхзвуковым потоком показало, что плазменная струя свободно проникает в поток. Так на рис. 8 приведены типичные фрагменты скоростных фотографий процесса инжекции плазменной струи, созданной МПК, перпендикулярно оси сверхзвукового воздушного потока, который формировался при истечении в затопленное пространство объемом 3 м^3 . Основное влияние поперечного потока сводится к отклонению плазменной струи от оси МПК, причем угол отклонения остается практически постоянным и достаточно небольшим по величине.

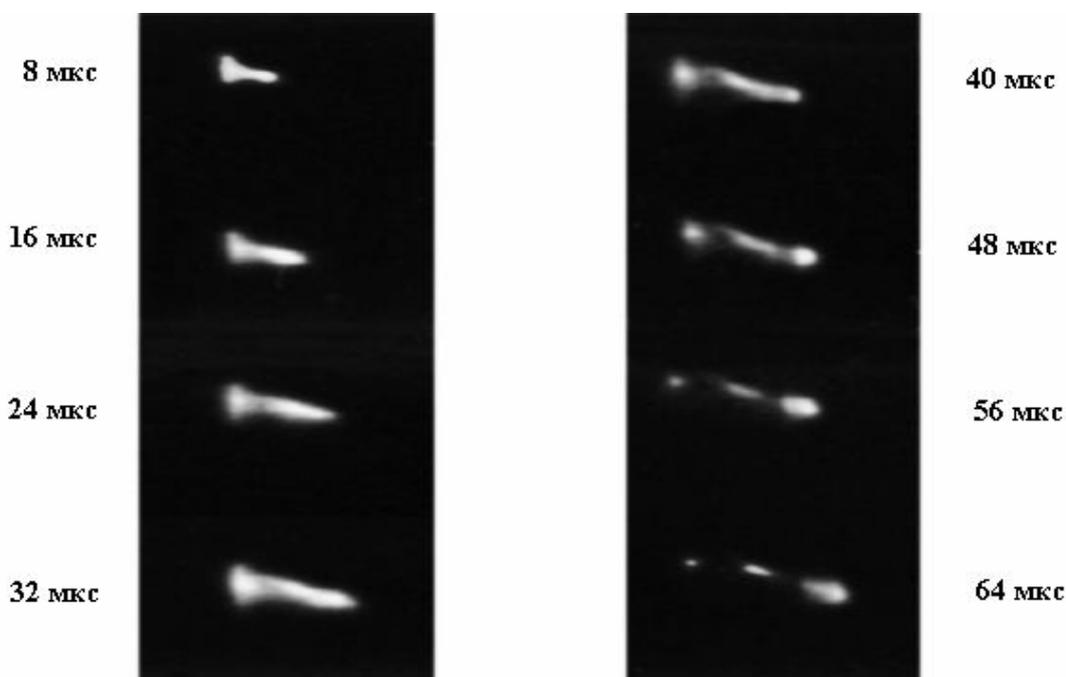


Рис. 8. Фрагменты СФР-граммы плазменной струи, созданной МПК в сверхзвуковом потоке ($M=2$).

В работе также проводились спектральные измерения температуры плазмы по относительным интенсивностям спектральных линий меди 578 нм

и 521 нм. При этом использовалась специальная оптическая система, которая позволяла определять распределение температуры, как вдоль потока, так и в сечении, перпендикулярном ему. Эта серия экспериментов проводилась в сверхзвуковом канале второй установки.

На рис. 9 приведено распределение температуры вдоль оси канала (точка $x = 0$ соответствует месту ввода плазмы в канал). Как видно из приведенных данных температура плазмы остается практически однородной вдоль оси x , однако, можно сказать, что она достигает максимального значения в плоскости торца плазматрона. Кроме того, наблюдается тенденция к образованию некоторого минимума в распределении на удалении (2-3) см от начала плазменной струи. В целом же значения температуры в распределении по оси x лежат в пределах (0,9 -1,3) эВ.

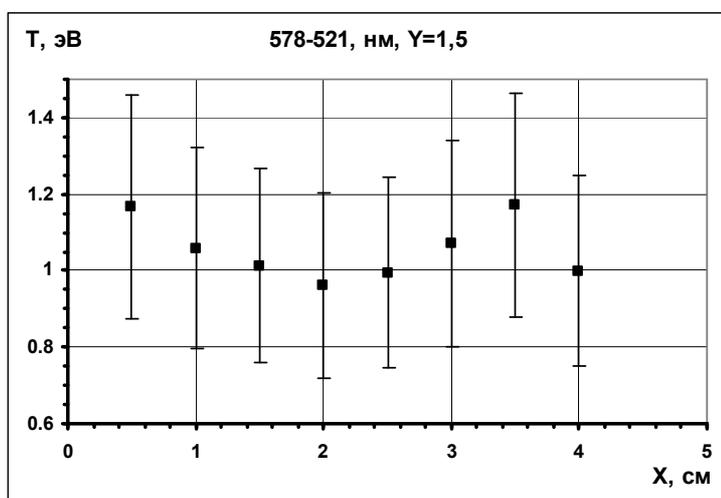


Рис. 9. Распределения температуры вдоль оси канала.
 $C=50\text{мкФ}$, $U=4.0\text{ кВ}$, $p=100\text{ тор}$, $P_p=3\text{ атм}$.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что плазма, созданная МПК может быть успешно использована для инициации объемного горения сверхзвуковых топливных смесей.

В четвертой главе приводятся результаты исследования взаимодействия со сверхзвуковым воздушным потоком плазменной струи, созданной относительно слабomощным капиллярным плазматроном.

Капиллярный плазматрон представлял собой два электрода, размещенных в конусообразном корпусе (Рис. 10), выполненном из диэлектрика (4), на расстоянии ~ 5 мм друг от друга. Между электродами размещалась шайба, изготовленная из оргстекла с каналом диаметром 1–2 мм (2). Внутренний электрод (3) изготовлен из графита и представляет собой шайбу диаметром ~ 10 мм и толщиной 5 мм. В медном наружном электроде (1), конусообразной формы сделано отверстие диаметром ~ 3 мм.

Плазмотрон размещался на срезе формирующего канала сверхзвукового сопла.

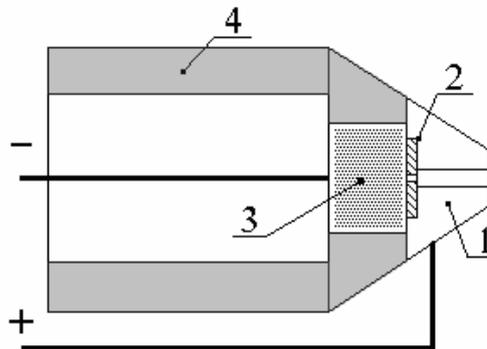


Рис 10. Устройство капиллярного плазмотрона. 1- анод, 2- шайба из оргстекла 3- катод, 4- корпус из изоляционного материала.

Для определения характера изменения формы плазменной струи во времени использовался скоростной фоторегистратор, работающий в покадровом режиме съемки, длительность отдельного кадра можно было изменять от 4 мкс до 400 мкс при общем числе кадров ~ 60 . На рис. 11-а приведены типичные фрагменты скоростной съемки капиллярного разряда в неподвижном воздухе, полученные при длительности одного кадра 20 мкс.

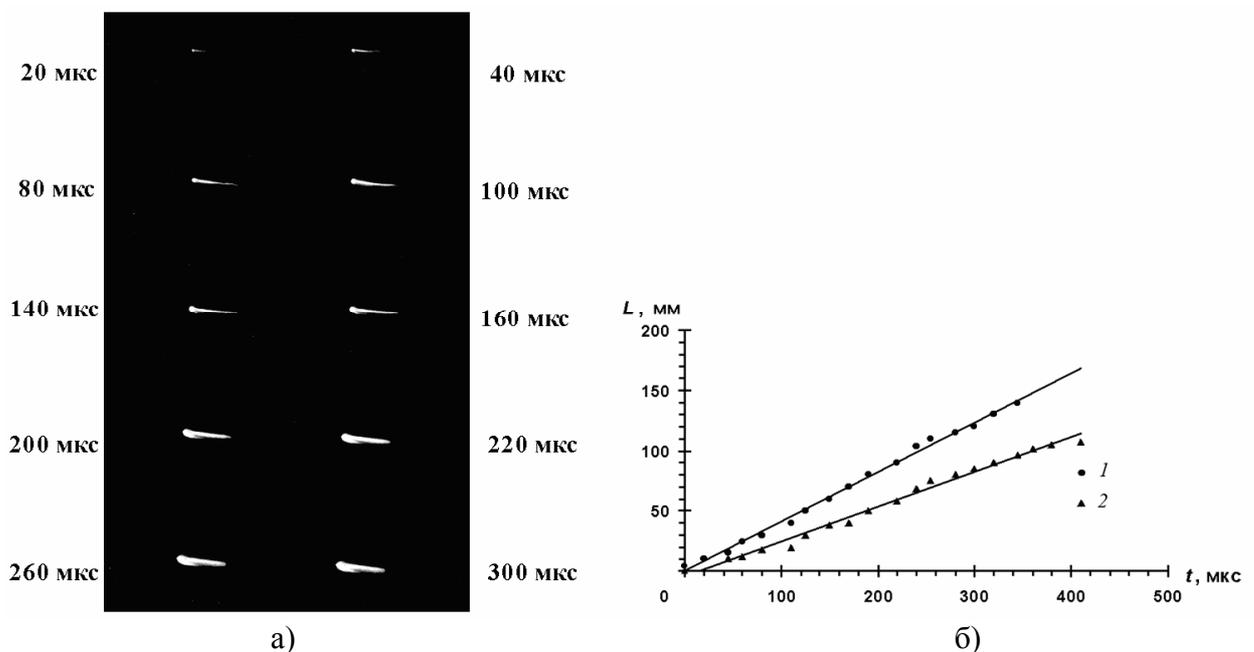


Рис. 11. (а) - скоростные фотографии капиллярного разряда в неподвижном воздухе (б)- временная зависимость характерного продольного размера плазменной струи при различных начальных давлениях в камере истечения: 1 - 20 Тор, 2- 80 Тор.

В результате обработки большого числа аналогичных фотографий было

определенно развитие во времени характерных размеров образовавшейся плазмы. На рис. 11-б показана временная зависимость усредненной длины плазменной струи при двух начальных давлениях в балластной камере. Как видно из приведенного рисунка, длина струи растет во времени практически линейно, причем тем быстрее, чем меньше начальное давление воздуха в камере.

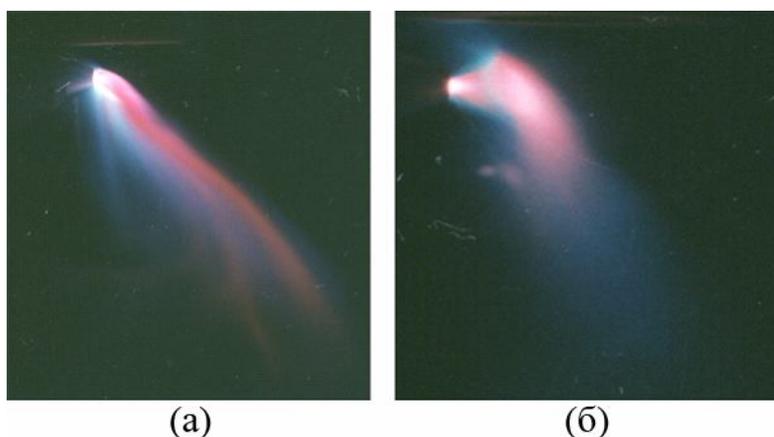


Рис.12. Интегральные фотографии капиллярного разряда в сверхзвуковом потоке, начальное давление в камере равно: (а) - 20 Тор, (б) – 80 Тор. Поток направлен сверху вниз.

Оказалось, что максимальная скорость распространения плазменной струи вдоль ее оси равна 300 м/с при давлении в камере 80 Тор и 450 м/с при давлении 20 Тор. Таким образом, скорость струи зависит от давления в камере, что определяет характер ее взаимодействия с потоком. Так на рис. 12 (а и б) представлены интегральные фотографии капиллярного разряда в воздушном сверхзвуковом потоке с $M = 2$. Видно, что при малых давлениях, когда скорость движения плазмы сравнима со скоростью потока, угол отклонения струи в потоке близок к 45° , в случае же больших давлений (при малых скоростях плазмы), струя практически распространяется вдоль потока, и угол отклонения приближается к 90° .

Аналогичный вывод можно сделать на основании данных скоростной фотографии. Так на рис. 13 показаны типичные фрагменты сверхскоростной съемки процесса взаимодействия плазменной струи капиллярного плазмотрона с поперечным сверхзвуковым потоком воздуха. Диаметр воздушного потока был $\sim 2,5$ см.

Из сравнения приведенных фрагментов видно, что плазменная струя отклоняется сверхзвуковым потоком тем сильнее, чем меньше энергия, вложенная в разряд. В течение интервала времени, соответствующего наибольшей электрической мощности, вложенной в разряд, когда скорость распространения плазмы сравнима со скоростью потока, плазменная струя практически пересекает весь диаметр потока. В тоже время в начале и в конце импульса разрядного тока, когда величина подводимой к разряду

мощности относительно мала, плазменная струя практически не проникает в поток.

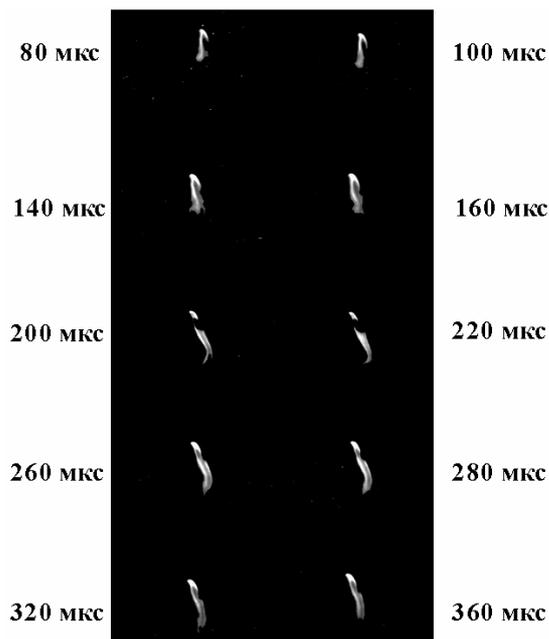


Рис. 13. Скоростные фотографии капиллярного разряда в поперечном сверхзвуковом потоке воздуха $M = 2$ (длительность одного кадра 20 мкс, поток направлен сверху вниз).

Проведенные исследования динамики развития капиллярного разряда в неподвижном воздухе и сверхзвуковом потоке показали, что при инжектировании плазменных струй вдоль сверхзвукового потока возможно использование капиллярного разряда для инициации горения топливных смесей.

В пятой главе приводятся результаты экспериментальных исследований электродного продольно-поперечного разряда (ППР) постоянного тока, создаваемого в сверхзвуковом воздушном потоке.

Эксперименты проводились в сверхзвуковом канале. Для создания разряда на постоянном токе использовался источник питания с выходным напряжением до 5 кВ и максимальным током до 20 А. Величина тока регулировалась балластными сопротивлениями, включенными последовательно с разрядным промежутком. Схема расположения и форма электродов приведена на Рис. 14. Электроды, сделанные из медной проволоки диаметром 3 мм, вакуумно крепились на диэлектрической пластине, которая размещалась в люке рабочей секции сверхзвукового канала. Длина горизонтальной части положительного электрода была 10 мм, а отрицательного – 40 мм. Электроды располагались соосно по потоку, причем конструкция их крепления позволяла изменять как общее положение электродов по высоте, так и относительное расстояние между ними.

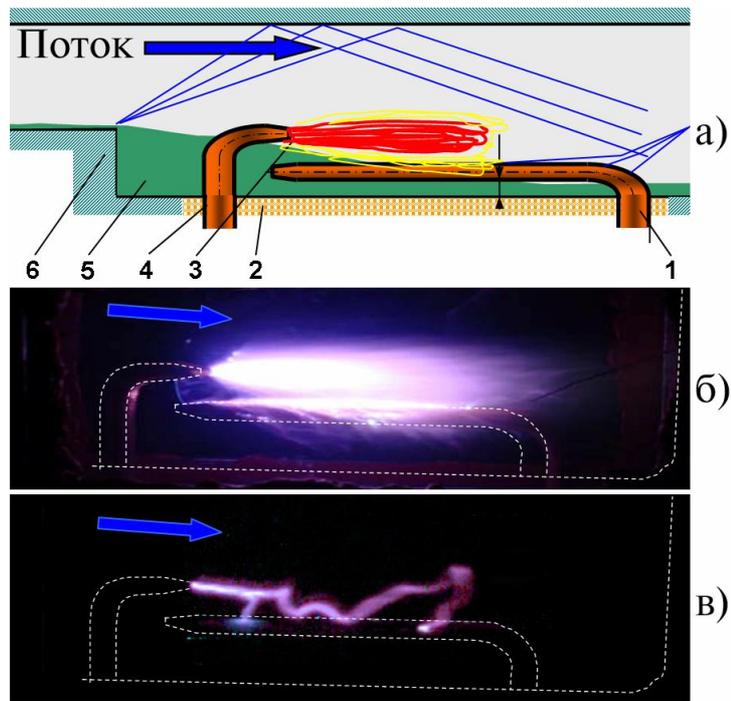


Рис. 14. Схема разряда и типичные фотографии разряда.

- а) - схема расположения электродов : 1- катод, 2 – диэлектрическая подложка, 3 – разряд, 4 – анод, 5 – застойная зона, 6 – стенки канала; фотографии разряда с экспозицией:
 б) - 800 мкс и в) – 20 мкс,

На рис. 14 (б и в) представлены два типичных фрагмента скоростной съемки разряда, полученные при времени экспозиции одного кадра 800 мкс (б) и 20 мкс (в). Кадры получены при начальном давлении в рабочем канале 0,28 атм, а в ресивере – 2 атм, длительность импульса напряжения 1 с, величина разрядного тока 9 А. При малых экспозициях видно, что разряд распространяется вдоль потока в виде отдельных каналов, длина которых постоянно меняется в результате сноса потоком и вторичных пробоев межэлектродного промежутка. Таким образом, полная интегральная картина разряда является суперпозицией отдельных плазменных каналов, существующих в течение времени $\sim 10\text{-}20$ мкс. Такое многоканальное развитие разряда в потоке отражается на характере электрических характеристик разряда. Так на рис. 15 приведены типичные временные зависимости тока и падения напряжения на разряде в неподвижном воздухе (рис.15-а) и в сверхзвуковом потоке (рис. 15-б). Видно, что ток разряда как в потоке, так и без него в течение импульса остается практически постоянным и определяется только балластным сопротивлением. В то же время напряжение на разряде в сверхзвуковом потоке претерпевает значительные колебания. Эти колебания связаны с хаотическим изменением длины разрядного промежутка (а, следовательно, и его сопротивления), что при постоянном токе приводит к хаотическим же колебаниям напряжения на разряде.

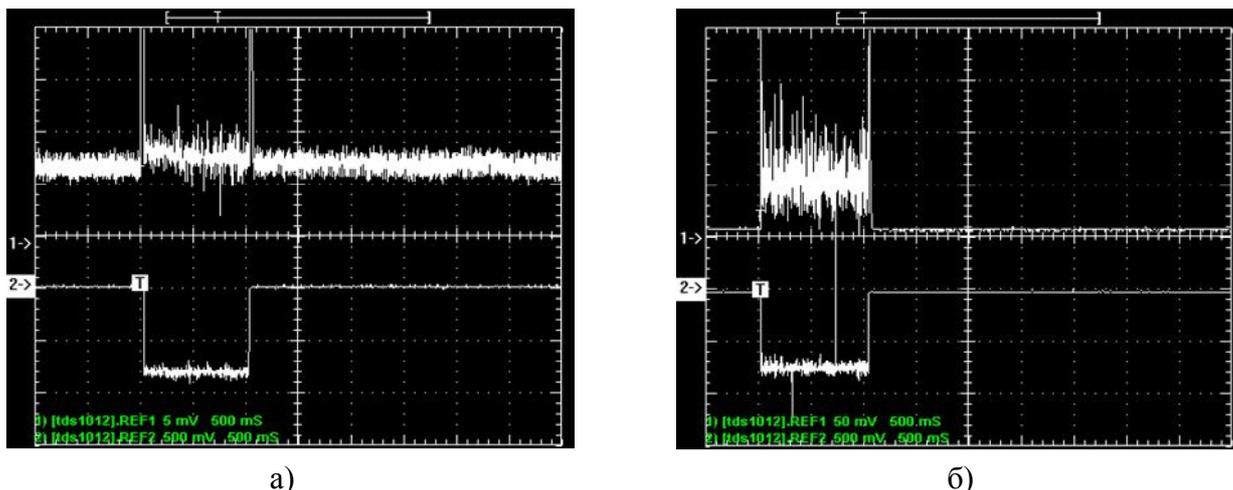
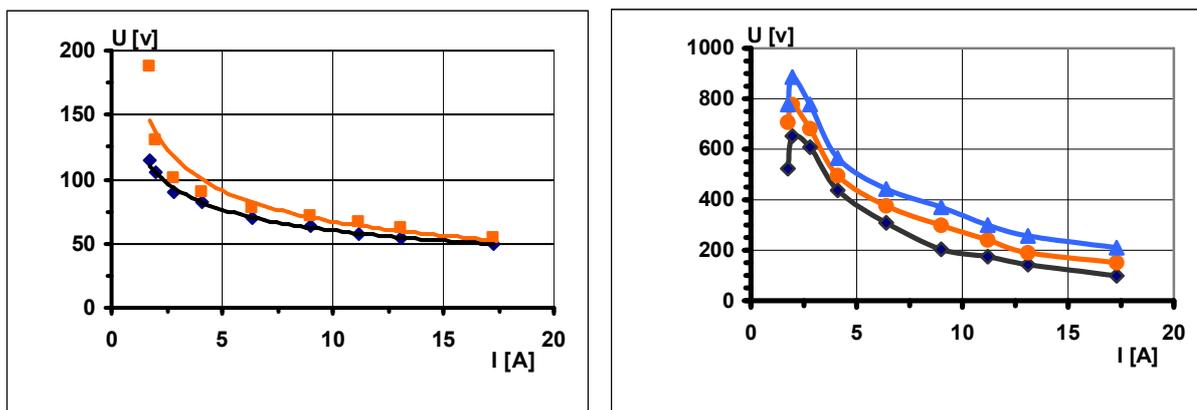


Рис. 15. Типичные осциллограммы напряжения на разряде (1) и разрядного тока (2): а - без потока; б - в потоке; длительность импульса 1 с, $P = 0,14$ атм., $P_p = 3$ атм.

Подобные осцилляции тока наблюдались и в предыдущих экспериментах по исследованию взаимодействия со сверхзвуковым потоком разряда, создаваемого между электродами, расположенными перпендикулярно потоку. Однако в этих экспериментах такие осцилляции носили периодический характер. В случае же продольно-поперечного разряда колебания величины напряжения происходят совершенно произвольно, т.е. хаотически. Такое отличие объясняется тем, что при строго поперечном разряде вторичные пробои, вызывающие осцилляции тока и напряжения, происходят в фиксированном месте разряда, а именно, в области первого диска Маха, положение которого остается практически постоянным во время разряда. В случае же продольно-поперечного разряда вторичные пробои могут происходить в любом месте по длине отрицательного электрода. Эти пробои определяют случайные изменения длины плазменного канала и, следовательно, его сопротивления, изменения которого и определяют хаотические колебания напряжения на разряде.

Обработка осциллограмм тока и напряжения позволила получить вольтамперные характеристики разряда (рис. 16) без воздушного потока (а) и в потоке (б) при различных давлениях в рабочей секции. Ввиду того, что осциллограммы падения напряжения на разряде носят сильно осциллирующий характер, соответствующие точки на рис. 16-б, получались путем усреднения численных данных, полученных из осциллограмм напряжения.

Из приведенных ВАХ видно, что, как и в потоке, так и без потока напряжение на разряде падает с ростом разрядного тока. Такая зависимость характерна для дуговых разрядов, поэтому можно сделать вывод, что в обоих случаях разряд носит дуговой характер.



а) б)
Рис. 16. Вольтамперные характеристики разряда.

(а) без потока: ■ - $P_k = 0,14$ атм., ◆ - $P_k = 0,28$ атм.;
(б) с потоком: $P_k = 0,14$ атм., ▲ - $P_p = 4$ атм., ■ - $P_p = 3$ атм., ◆ - $P_p = 2$ атм.

Проведенные спектральные измерения позволили получить зависимости распределения температуры компонент плазмы вдоль потока (Рис. 17). На этом графике z – расстояние от анода по потоку. Как следует из рисунка колебательная температура лежит заметно ниже температуры возбуждения, однако выше газовой температуры.

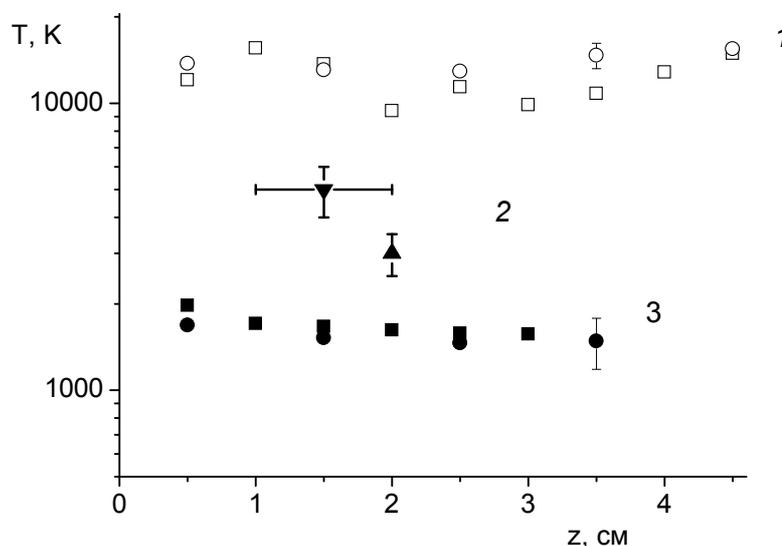
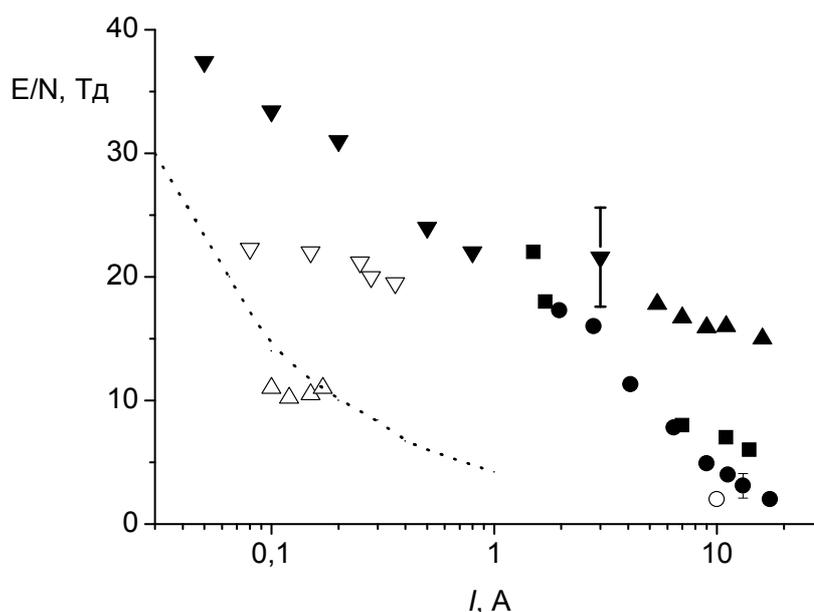


Рис.17. Аксиальное распределение температуры компонент плазмы.

ППР.1 – температура возбуждения, 2 – колебательная температура: ▲ - поперечный ИПР, $I = 8$ А, ▼ - поверхностный разряд, $I = 2$ А. 3 - температура нейтрального газа плазмы ППР, $p = 230$ Тор: ■, □ - $I = 9$ А; ●, ○ - $I = 18$ А.

Среднее значение температуры «возбуждения» (близкой к температуре электронов) составляет $(1,5 \pm 0,5)$ эВ, в то время как среднее значение температуры газа равно (2000 ± 500) К. Таким образом, плазма ППР в сверхзвуковом потоке является сугубо неравновесной.

Проведенная скоростная фоторегистрация разряда в сверхзвуковом потоке позволила определить среднюю длину разрядного канала при данном токе, соответствующую среднему значению падения напряжения на электродах разряда U . Это позволило определить среднюю напряженность электрического поля. Данные по измерениям средних по объему значений напряженности электрического поля $E(I, p)$ и температуры нейтрального газа $T_g(I, p)$ дали возможность оценить для плазмы ППР величину одного из важнейших газоразрядных параметров – приведенного электрического поля E/N . Результаты таких расчетов приведены на рис. 16 в сравнении с ранее измеренными зависимостями E/N , полученными в различных работах для электродных разрядов при различных способах их размещения относительно потока. Видно, что значения приведенного поля для разрядов в потоке заметно выше аналогичных значений в неподвижном газе для всех токов и давлений, хотя с ростом тока и давления это различие падает. При этом как для разрядов в потоке, так и неподвижном воздухе значения E/N падают с ростом разрядного тока и ростом статического давления. Зависимость $E/N(I)$ в ППР слабо отличается от аналогичных зависимостей для поперечных разрядов при близкой величине статического давления.



воздуха, приводит к увеличению величины E/N только при малых токах $I \leq 10$ А. При $I > 10$ А, отличие E/N в потоке от случая неподвижного воздуха становится незначительным.

На основании полученных результатов можно сделать предположение, что параметры электродных разрядов, которые, в основном, определяются значениями E/N , не зависят от способа размещения разряда в потоке, а основными внешними параметрами являются величина разрядного тока и значения статического давления. Таким образом, при равных начальных условиях (величине разрядного тока и давления) результаты, полученные для одного типа разряда, можно переносить на другой тип разряда.

Полученные экспериментальные значения температуры нейтрального газа позволяют сделать вывод о том, что плазма, созданная электродным разрядом постоянного тока, может быть использована для инициации воспламенения сверхзвуковой топливной смеси.

Основные результаты и выводы:

- Проведен комплекс экспериментальных исследований процессов взаимодействия плазодинамических разрядов МПК с поперечными сверхзвуковыми потоками воздуха. Показано, что при одинаковых начальных условиях в отсутствие ограничивающих стенок характерные параметры разряда (температура и скорость распространения плазмы) остаются практически такими же, что и при разрядах МПК в неподвижном газе. В случае разрядов в канале с ограничивающими стенками плазма МПК может заполнять все сечение поперечного потока и даже запирает поток.
- Впервые изучены режимы плазодинамических разрядов МПК малой мощности с малыми размерами электродов и рекордно большими значениями длины струи, отнесенной к миделю МПК. Показано, что в зависимости от энерговклада в разряд на заключительных стадиях развития струи МПК образуются разнообразные плазменные формирования, характерные для истечения плазмы импульсных плазмотронов в затопленное пространство.
- Исследован процесс взаимодействия капиллярного разряда со сверхзвуковым воздушным потоком. Показано, что в зависимости от начальных условий (мощность, выделяемая в разряде, скорость набегающего воздушного потока, начальное давление в канале и пр.) плазменная струя, созданная капиллярным разрядом, может либо проникать в поток на незначительные расстояния $\sim (1-3$ см), либо распространяться вдоль его внешней границы.
- Проведено комплексное исследование электродного продольно-поперечного разряда постоянного тока в сверхзвуковом потоке. Показано, что значение электрического поля в плазме разрядов в сверхзвуковых

потоках определяется главным образом током и давлением, другие факторы (конфигурация электродов относительно потока, длительность импульса разрядного тока, добавка пропана к воздуху в пределах стехиометрии) практически не оказывают влияния. Таким образом, результаты, полученные для одного типа разряда (например, ИПР) можно переносить на другой тип разряда (ППР). На основании экспериментально измеренных температур компонент плазмы ППР показано, что плазма электродных разрядов в сверхзвуковом потоке в исследованном диапазоне давлений до ≈ 200 Тор даже при токах в десятки ампер остается неравновесной.

- На основании полученных экспериментальных данных показано, что основным параметром, определяющим характер взаимодействия плазменных струй со сверхзвуковыми потоками воздуха, является мощность, выделяемая в разряде. При относительно большой мощности (в случае МПК ~ 20 мВт) скорость распространения струи превышает скорость потока, и плазма пересекает поток, практически не изменяя своего направления. При уменьшении мощности до значений $\leq 0,8$ мВт (капиллярный разряд) скорость распространения плазмы падает, и она практически не проникает в поток. При уменьшении мощности, выделяемой в разряде, до величины ~ 3 кВт (в случае ППР) плазменная струя создается потоком и распространяется вдоль него.

Список публикаций по теме диссертации.

1. Vinogradov V., Chernikov V., Timofeev I., Kolesnikov E. Preliminary Study Of Different Plasma Discharges At M=2 Air Flow // AIAA-2005-0988.
2. Aleksandrov A., Bychkov V., Chernikov V., Ershov A., Gromov V., Kolesnikov E., Levin V., Shibkov V., Vinogradov. V. Arc Discharge as a Means for Ignition and Combustion of Propane-Air Mixture Supersonic Flow // AIAA 2006-1462.
3. Ершов А.П., Колесников Е. Б., Тимофеев И. Б., Черников В. А., Чувашев С. Н., Шибков В. М.. Плазмодинамические разряды в поперечных сверхзвуковых потоках воздуха // ТВТ, Т.44 № 4 С.485-493, 2006.
4. Ершов А. П., Колесников Е. Б., Тимофеев И. Б., Черников В. А., Чувашев С. Н., Шибков В. М.. Взаимодействие плазменной струи капиллярного разряда с поперечным сверхзвуковым потоком воздуха // ТВТ. 2007. Т. 45. № 5. С. 646.
5. Александров А. Ф., Ершов А. П., Колесников Е. Б., Логунов А. А., Черников В. А. , Шибков В. М. Параметры продольно-поперечного разряда в сверхзвуковом потоке воздуха // Вестн. МГУ. Сер. 3. Физика, астрономия. № 5. С. 82, 2007.

6. Ершов А. П., Каменщиков С. А., Колесников Е. Б., Логунов А. А., Фирсов А. А., Черников В. А. О возможности измерения скорости потока с помощью маломощного импульсно-периодического разряда // Изв. РАН. МЖГ. 2008. № 4. С. 119-127.
7. Ершов А. П., Каменщиков С. А., Колесников Е. Б., Логунов А. А., Фирсов А. А., Черников В. А. Измерение скорости потока с помощью поперечного разряда // Вестн. МГУ. Сер. 3. Физика, астрономия. №3 , с.70-72, 2008.
8. Ершов А. П., Колесников Е. Б., Логунов А. А., Черников В. А. Параметры электродных разрядов в сверхзвуковых потоках воздуха // ТВТ, Т.47, № 2, С. 183-192, 2009.