

На правах рукописи

**МОРАЛЕВ Иван Александрович**

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ПЛАЗМЫ  
С ЗАКРУЧЕННЫМИ ТЕЧЕНИЯМИ**

Специальность 01.04.08 – «Физика плазмы»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2010

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Объединенном институте высоких температур РАН

Научный руководитель: доктор физико-математических наук  
А.И. Климов.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор В.М. Шибков;

доктор физико-математических наук,  
профессор В.В. Голуб.

Ведущая организация: Физико-технический институт  
им. А. Ф. Иоффе РАН.

Защита состоится “22” декабря 2010 г. в “10” час. на заседании диссертационного совета № Д 002.110.02 в ОИВТ РАН по адресу:  
125412 Москва, Ижорская ул., 13, стр.2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИВТ РАН.

Отзывы на автореферат просьба присылать по адресу:  
125412 Москва, Ижорская ул., 13, стр.2, ОИВТ РАН.

Автореферат разослан “ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2010 г.

Ученый секретарь  
Диссертационного совета  
д.ф.-м.н.



А.Л. Хомкин

© Учреждение Российской академии наук Объединенный институт высоких температур РАН, 2010

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность

В настоящее время активно развивается новая область науки и техники – магнитоплазменная аэродинамика (МПА). Основной задачей плазменной аэродинамики является управление аэродинамическими характеристиками обтекаемых тел (такими как подъемная сила, сила сопротивления, моменты и др.) с помощью плазмы газового разряда. Особое место в этих исследованиях отводится изучению управления вихревыми течениями вблизи обтекаемых тел. Такие исследования важны для управления пограничным слоем, отрывом потока, подъемной силой крыла и др. с помощью плазменных образований. В то же время, физика взаимодействия вихря с плазмой газового разряда в настоящее время изучена недостаточно. Для понимания физических механизмов такого взаимодействия необходимо ответить на два основных вопроса:

1. Как влияет закрученное течение на структуру конкретного газового разряда и параметры плазмы в нем.
2. Как процессы в плазме газового разряда отражаются на структуре закрученного течения.

В связи с тем, что практическая задача управления сформировавшимися вихревыми течениями предполагает воздействие на поток на некотором расстоянии от поверхности летательного аппарата, для её решения наиболее перспективными представляются безэлектродные и одноэлектродные электрические разряды, возбуждаемые в ВЧ и СВЧ диапазонах.

Вопрос о влиянии закрученного течения на устойчивость и параметры газового разряда детально исследовался при разработке плазмотронов с вихревой стабилизацией разряда. Необходимо отметить, что в таких устройствах используется, как правило, горячая равновесная плазма. В частности, ряд исследований был посвящен работе плазмотронов с мощным дуговым разрядом [1], а также факельным разрядом. В этих работах исследователей больше всего интересовали вопросы тепловой изоляции горячей газоразрядной плазмы от стенок плазмотрона и ее устойчивости. Существующие электродинамические модели факельных плазмотронов рассматривают разряд как однородный проводник с неизменными по длине параметрами течения [2]. При этом не учитываются эффекты неравновесности, а также реальное распределение проводимости и диэлектрической проницаемости в разряде, что приводит к расхождению численных результатов с экспериментом.

С другой стороны, известно, что ВЧ и СВЧ разряды, в зависимости от режимов возбуждения и параметров окружающей среды, могут существовать в различных формах и режимах в высокоскоростном газовом потоке [3–6]. При этом, влияние закрутки потока на режим горения и параметры этих разрядов на данный момент изучалось только для случая довольно малых тангенциальных скоростей. В то же время, область применения этих разрядов включает, например, инициацию и поддержание процесса горения топлива в высокоскоростных вихревых камерах сгорания и химических реакторах.

Влияние неравновесности возбужденного вихревого потока на его структуру и параметры рассматривалось в ряде работ [7–10]. Выводы этих работ частично противоречивы вследствие использования различных теоретических моделей. Сообщается о распаде вихря, его перестройке в результате взаимодействия или быстрой диссипации в неравновесном газе. Экспериментальные работы, которые бы позволили разрешить разногласия между теоретическими работами на данный момент отсутствуют.

Настоящая работа посвящена экспериментальному изучению взаимодействия газоразрядной плазмы одноэлектродного ВЧ разряда емкостного типа (ВЧЕР) с высокоскоростным газовым потоком.

### **Цель работы**

Изучение взаимодействия газоразрядной плазмы, созданной ВЧЕР, с высокоскоростным вихревым течением.

Для достижения этой цели в диссертационной работе решались следующие основные задачи:

1. Создание экспериментального стенда для изучения взаимодействия газоразрядной плазмы, созданной ВЧЕР, с высокоскоростным закрученным течением.
2. Создание специализированного диагностического комплекса для измерения параметров плазмы разряда (температуры, плотности электронов, степени колебательной неравновесности), и трехмерного закрученного потока (давления, компонент скорости).
3. Получение устойчивых режимов горения ВЧЕР в высокоскоростном закрученном потоке воздуха в трубе и определение границ их реализации.
4. Измерение основных параметров плазменных образований в высокоскоростном вихревом газовом потоке. Определение структуры и динамики протяженного факельного ВЧ разряда в закрученном потоке.
5. Измерение основных параметров закрученного потока в канале и в свободном пространстве при горении в нем одноэлектродного ВЧ разряда.

6. Измерение основных параметров закрученного потока в канале и в свободном пространстве при горении в нем разряда постоянного тока. Сравнение полученных данных об основных характеристиках потока с результатами численного эксперимента.

### **Научная новизна работы**

1. Впервые определены границы областей существования различных форм ВЧЕР в закрученном потоке в зависимости от степени закрутки в диапазоне  $S=0\div 1,5$ . Показано, что возникновение возвратного течения при больших параметрах закрутки потока способствует переходу разряда в факельную форму.
2. Обнаружено, что границы областей существования различных форм одноэлектродного ВЧ разряда в закрученном потоке зависят от средней мощности ВЧЕР в диапазоне 200 Вт ÷ 1 кВт.
3. Впервые изучена динамика и структура протяженного ВЧ разряда в закрученном потоке воздуха при атмосферном давлении. Обнаружено одновременное существование протяженного ВЧ разряда и плазменной ВЧ короны в его головной части на стадии формирования разряда.
4. Измерены параметры ( $T$ ,  $N_e$ ,  $T_V$ ,  $E_{BЧ}/N$ ) плазмы протяженного ВЧ разряда в области малых ВЧ токов ( $I_{BЧ} < 500\text{мА}$ ) в высокоскоростном вихревом потоке воздуха при давлении 40÷760 торр и числе Маха потока  $M \sim 0,1\div 0,5$ . Показано, что параметры плазмы ВЧЕР близки к параметрам тлеющего разряда в воздухе.
5. Впервые исследовано влияние плазмы протяженного факельного ВЧЕР (а также разряда постоянного тока) на параметры закрученного течения воздуха в трубе и свободном пространстве при давлениях 40÷760 торр. Показано, что зажигание разряда приводит к росту давления на оси вихря и уменьшению продольного градиента давления, причем рост давления линейно зависит от вложенной в разряд мощности. В случае свободного закрученного течения показано уменьшение тангенциальных скоростей в ядре вихря.
6. Проведено сравнение полученных экспериментальных данных о параметрах течения с результатами численного моделирования закрученного течения с локальным источником теплоты.

### **На защиту выносятся следующие результаты и положения**

1. Экспериментально определенные границы областей существования различных форм одноэлектродного ВЧ разряда в закрученном потоке в зависимости от параметра закрутки течения  $S=0\div 1,5$  и мощности ВЧ разряда

200Вт - 1кВт. Вывод о роли возвратного течения в вихре в формировании протяженного ВЧ разряда.

2. Экспериментально определенные параметры ( $T$ ,  $N_e$ ,  $T_v$ ,  $E_{ВЧ}/N$ ) плазмы протяженного ВЧЕР в области ВЧ токов ( $I < 500\text{мА}$ ) в высокоскоростном вихревом потоке воздуха при давлении  $40 \div 760$  торр, числе Маха потока  $M \sim 0,1 \div 0,5$ .
3. Динамика и структура протяженного ВЧ разряда в закрученном потоке воздуха при давлении  $40 \div 760$  торр и числе Маха потока  $M \sim 0,1 \div 0,5$ .
4. Экспериментально определенные параметры закрученного течения при горении ВЧЕР и без него при давлениях 760 торр и 40 торр и величине безразмерного энерговклада  $Da = 0,1 \div 1$ . Вывод об уменьшении градиентов давления в приосевой зоне вихря при зажигании разряда.
5. Определенные в эксперименте параметры закрученного течения при горении разряда постоянного тока вблизи оси вихря и без него при давлении 760 торр, числе Маха  $M \sim 0,1$ , величине безразмерного энерговклада  $Da = 0,1 \div 0,5$ . Вывод об увеличении давления на оси вихря и снижении тангенциальной скорости в его ядре.
6. Результаты сравнения экспериментальных результатов с результатами численных расчетов для закрученного течения с локальным источником теплоты.

**Научная и практическая ценность работы.** Полученные экспериментальные результаты являются важными для развития физики плазмы, физики газового разряда, плазменной аэродинамики, физики стимулированного горения и др. Кроме того, полученные экспериментальные результаты могут быть использованы в практической аэродинамике и энергетике, а также при проектировании плазмохимических реакторов с закруткой потока, авиационных двигателей. Использование полученных результатов возможно в ЦАГИ, ЦНИИМАШ, ЦИАМ, МВЗ им.Миля, Институте механики МГУ, МРТИ РАН и ряде других организаций.

**Достоверность результатов исследований** подтверждается совпадением данных, полученных с помощью различных методик измерения. Достоверность измерений параметров потока подтверждается качественным совпадением результатов для различных конфигураций закрученного течения.

**Личный вклад автора** заключается в создании экспериментальной установки, отладке диагностической аппаратуры для определения параметров плазмы и закрученного потока, написании алгоритмов автоматической

обработки данных. Автором доработана методика вращающегося датчика давления для автоматического проведения измерений в закрученном потоке, реализован алгоритм обработки сигнала датчика. Реализован алгоритм обработки интерферограмм течения с использованием преобразования Абеля. Все экспериментальные результаты, изложенные в работе, получены при определяющем участии автора. Формулировка задач и обсуждение результатов численного моделирования проводилась при непосредственном участии автора.

### **Объем работы**

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложения. Объем диссертации составляет 160 страниц, включая 79 рисунков.

### **Апробация работы**

Материалы диссертации докладывались на следующих конференциях:  
4<sup>th</sup> Intren. Workshop and Exhib. on Plasma Assisted Combustion (IWEPAC), 16-19 Sept 2008, Virginia, USA. The 8<sup>th</sup> International Workshop on Magneto-Plasma Aerodynamics, Moscow, March 31-April 2, 2009. 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting, Orlando, FL, 7–11 January 2009. 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, Jan. 7–10, 2008. Школа-Семинар по магнитоплазменной аэродинамике, ОИВТ РАН, Москва 2008. Школа-Семинар по магнитоплазменной аэродинамике, ОИВТ РАН, Москва 2010

По теме диссертации опубликовано 5 работ:

1. Завершинский И.П., Климов А.И., Макарян В.Г., Молевич Н.Е., Моралев И.А., Порфирьев Д.П.. Об особенностях свечения поперечного разряда в зависимости от массового расхода газа в вихревой камере // ПЖТФ, 2009, т.35, выпуск 24 с.59-66
2. Завершинский И.П., Климов А.И., Макарян В.Г., Молевич Н.Е., Моралев И.А., Порфирьев Д.П.. Протяженная светящаяся область в вихревом потоке, созданная поперечным разрядом постоянного тока // ТВТ т.42 №1 (приложение) 2010
3. Моралев И. А., Климов А. И., Преображенский Д. С., Толкунов Б. Н., Кутлалиев В. А.. Взаимодействие емкостного ВЧ-разряда с закрученным течением в трубе // ТВТ т.42 №1 (приложение) 2010
4. Klimov A., Bitiurin V., Tolkunov B., Moralev I, Zhirnov K., Plotnikova M., Minko K., Kutlaliiev V. Longitudinal Vortex Plasmoid Created by Capacity HF Discharge // AIAA paper 2008-1386
5. Klimov A., Bitiurin V., Tolkunov B., Moralev I. Longitudinal Vortex Plasmoid Created by Capacity Coupled HF Discharge // AIAA paper 2009–1046

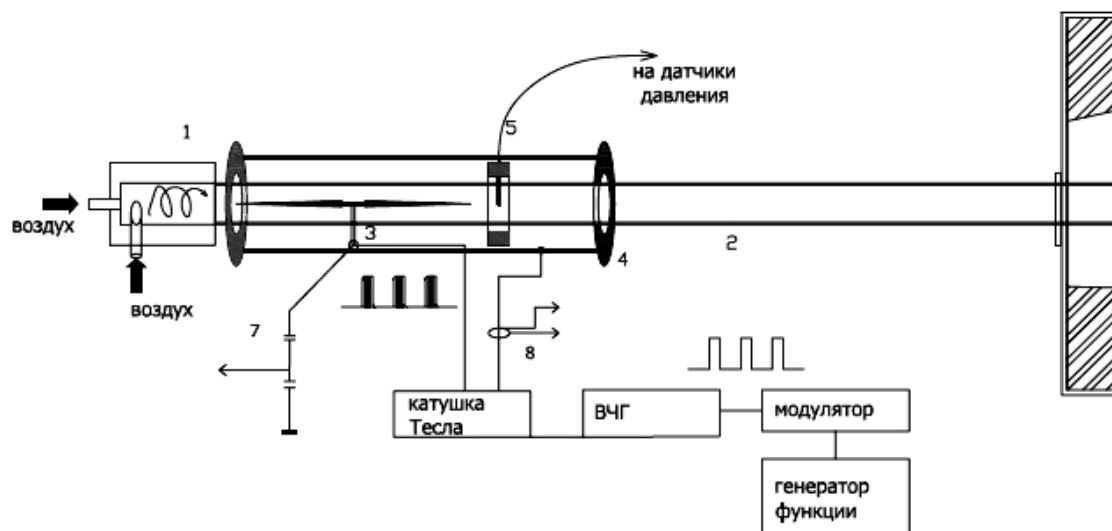
## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обосновывается актуальность темы, формулируются цели и задачи диссертационной работы и изложено её краткое содержание.

В **первой главе** приводится критический обзор работ, посвященных взаимодействию плазмы газового разряда с закрученными течениями. Отмечается, что на данный момент отсутствуют работы, посвященные влиянию закрученного течения на горение одноэлектродного ВЧ разряда. Кроме того, на данный момент все работы, в которых изучается влияние эффектов неравновесного тепловыделения в разряде на вихревое течение, носят теоретический характер.

Во **второй главе** приводится схема экспериментальной установки, а также описание использованных методик определения параметров плазмы газового разряда и характеристик закрученного потока.

В §2.1 описывается экспериментальная установка- вихревая труба (ВТ-1), созданная автором для изучения взаимодействия плазмы различных электрических разрядов с закрученным течением в канале. Схема установки приведена на рис.1.



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки ВТ-1:

1 – завихритель; 2 – кварцевая труба; 3 – электрод; 4 – экран; 5 – датчик давления;  
6 – вакуумная камера; 7 – делитель напряжения; 8 – пояс Роговского

Закрутка потока осуществлялась с помощью завихрителя 1, причем параметр закрутки мог изменяться в пределах от 0 (прямой поток) до ~1,5 (сильная закрутка) путем изменения отношения расходов  $Q_{ax}$  и  $Q_t$  через прямой и тангенциальный вводы газа. Степень закрутки потока в установке



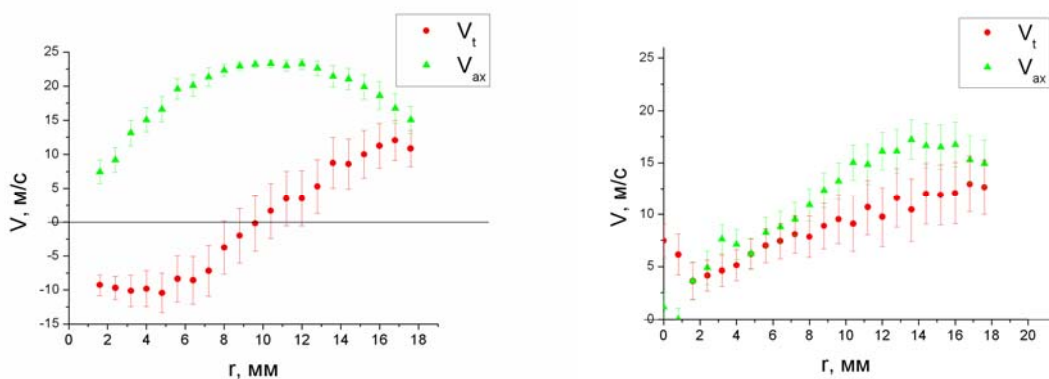
контролировалась параметром  $Z=Q_t/(Q_{ax}+ Q_t)$ . В качестве рабочих газов использовались азот, аргон и лабораторный воздух. Расходы газа могли изменяться в диапазоне 0÷20 г/с. Рабочая секция установки была выполнена из куска кварцевой трубы 2 диаметром 36÷60 мм и длиной от 40 см до 1 м. Открытый ее конец соединялся с атмосферой или с вакуумной камерой 6. Параметры закрученного потока при атмосферном давлении на выходе канала следующие:

максимальная тангенциальная скорость 30 м/с  
 максимальная продольная скорость 15 м/с  
 радиальный перепад давления 5 торр.

Параметры закрученного потока при низком давлении в выходной камере (40 торр) следующие:

максимальная тангенциальная скорость 130 м/с  
 максимальная продольная скорость 60 м/с  
 радиальный перепад давления 16 торр.

В зависимости от значения параметра  $Z$ , в установке реализовывалось два типа течения – слабозакрученный поток (при  $Z<0,4$ ) с однородным профилем осевой скорости по сечению и сильно закрученный поток при  $Z>0,44$  с возникновением на оси канала возвратного течения (рис.2). Значение  $Z=0,4$  приблизительно соответствует критической величине параметра закрутки потока  $S = G_t/(G_{ax}R) \sim 0,6$  (где  $G_t$  и  $G_{ax}$  – потоки момента импульса и импульса через сечение канала), разделяющей области слабой и сильной закрутки потока [11].



**Рис. 2.** Распределения компонент скорости в канале установки при различных значениях  $Z$ : слева –  $Z=1, S=1,5$ ; справа –  $Z=0,3, S=0,5, P=1$  атм.

ВЧ разряд в вихревом потоке создавался на электроде - игле, выполненной из вольфрама толщиной 2 мм 3. Противозлектродом, на который разряд замыкался токами смещения, служил специальный экран 4. Продольный емкостной ВЧ разряд одноэлектродного типа создавался с помощью модифицированных ламповых ВЧ генераторов на частоте 450 кГц и 13,6 МГц, а

также генератора на основе транзисторного преобразователя частоты на частотах 350÷450 кГц. Электрическая мощность, вложенная в разряд, не превышала 1,5 кВт. Разряд создавался в непрерывном и импульсно-периодическом режимах возбуждения с частотой модуляции до 10 кГц.

Диагностический комплекс установки включал в себя датчики давления 5, термопары, модернизированный автором вращающийся датчик давления для измерения компонент скорости в закрученном потоке, оптические спектрометры высокого разрешения с регистрацией спектра, пространственно-разрешенной по высоте щели, оптический интерферометр Майкельсона с системой высокоскоростной регистрации интерферограммы, средства измерения тока и напряжения разряда, емкостные электрические зонды.

Методики измерения параметров закрученного течения, использованные в работе, описаны в §2.2. Для определения температуры в потоке был создан оптический интерферометр Майкельсона. Обработка интерферограмм проводилась с помощью обратного преобразования Абея в предположении о доминирующем вкладе нейтральных невозбужденных молекул газа в показатель преломления. Вычисление Абелевского преобразование проводилось с помощью написанной автором программы методом аналитического интегрирования интерполяционных полиномов 2-го порядка [12]. Распределение статического давления вдоль стенки канала и оси трубы изучалось с помощью датчиков давления с открытым торцом. Подробные измерения распределений давления и компонент скорости в закрученном потоке осуществлялись модернизированным автором вращающимся насадком и датчиком давления.

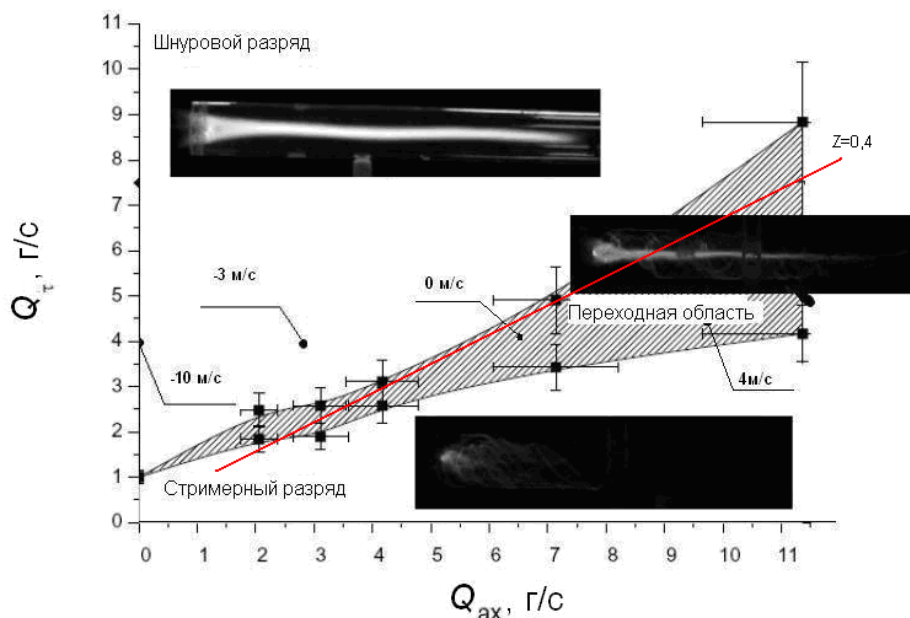
Методики измерения параметров плазмы газового разряда, использованные в работе, описаны в §2.3. Температура электронов, определялась по относительной интенсивности линий атомарного вольфрама, температура газа в разряде определялась из анализа спектра излучения второй положительной системы азота с помощью программы SPEC AIR [13], а также из теплового излучения частиц-продуктов эрозии электрода. Распределения амплитуды и фазы ВЧ напряжения вдоль канала одноэлектродного ВЧ разряда определялись с помощью емкостного зонда. Далее, из этих измерений определялась величина приведенного поля в плазме разряда, оценивалась проводимость плазмы и концентрация электронов.

**В третьей главе** приводятся результаты экспериментального исследования одноэлектродного ВЧ разряда в закрученном потоке воздуха.

§3.1 посвящен изучению режимов горения одноэлектродного ВЧ разряда в закрученном потоке при следующих параметрах: давление  $P=760$  торр, число

Маха потока  $M \sim 0,1$ , параметр закрутки потока  $S=0 \div 1,5$ , мощность разряда  $0 \div 1$  кВт, частота питающего напряжения  $f=450$  кГц.

В условиях свободной конвекции в поле тяжести земли, одноэлектродный ВЧ разряд с частотой 450 кГц в исследуемом диапазоне мощностей реализуется в режиме сильноточной ВЧ короны. Обнаружено, что в прямом потоке разряд также существует в виде ВЧ короны. При увеличении параметра закрутки потока, каналы короны группируются вблизи оси вихря, и затем формируют однородный ярко светящийся шнур, вытянутый по направлению к завихрителю. В этом режиме разряд по своим свойствам наиболее близок к неравновесному факельному разряду. Увеличение мощности, вкладываемой в разряд, при неизменных расходах воздуха через завихритель, также приводит к переходу разряда в форму протяженного факела. На рис.3 приведена диаграмма, иллюстрирующая границы области существования различных форм одноэлектродного ВЧ разряда в закрученном потоке.

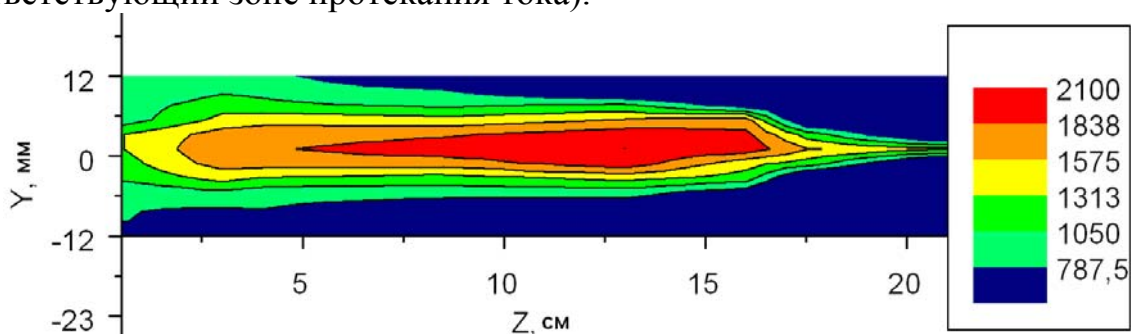


**Рис. 3.** Области существования различных типов продольного емкостного ВЧ-разряда в закрученном потоке в зависимости от параметров закрутки  $S$  (соотношения тангенциального расхода  $Q_\tau$  и осевого расхода  $Q_{ax}$ ). *Кружками* указаны точки, в которых измерена скорость газа на оси вихря. *Прямой* показана линия  $Z=0,4$

Переход разряда в факельный режим приводит к росту разрядного тока и увеличению вкладываемой мощности при постоянном напряжении на электродах. Основной причиной этого является, по-видимому, падение импеданса промежутка за счет увеличения емкостной связи разряда с землей.

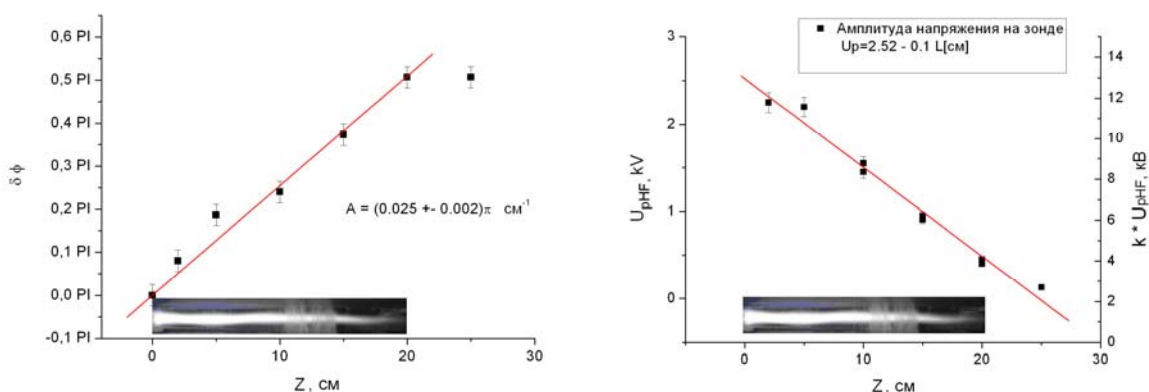
В §3.2 приводятся результаты исследования свойств плазмы разряда при атмосферном давлении, параметре закрутки потока  $\sim 1$ , и токе разряда  $\sim 170$  мА. При данных условиях разряд существует в режиме протяженного факела.

Температура и степень неравновесности плазмы в области разряда определена с помощью метода оптической спектроскопии, на основании анализа спектра излучения второй положительной системы молекул N<sub>2</sub>. Показано, что температура в канале разряда составляет от 600 до 2100 К, при этом максимум температуры достигается на оси разряда на расстоянии 12 см от электрода (при общей длине канала разряда ~20 см), рис.4. Колебательная температура для первых 3-х уровней N<sub>2</sub> практически неизменна по диаметру разряда и составляет 3500÷4000 К. Максимальная степень неравновесности плазмы достигается на периферии факела, а также вблизи его кончика. Возможно, это объясняется наличием большого радиального поля на периферии канала разряда. Диаметр тепловой каверны, образованной разрядом, много больше, чем его световой диаметр (в первом приближении соответствующий зоне протекания тока).



**Рис. 4.** Характерное распределение температуры в факельном ВЧ разряде;  $V_f \sim 20$  м/с,  $I_{HF} = 168$  мА,  $\langle N_{HF} \rangle = 240$  Вт

Далее приводятся результаты измерений и оценок электрических характеристик разряда. Распределения амплитуды и фазы электрического поля вдоль канала разряда измерены с помощью емкостного зонда, перемещаемого между экраном и кварцевой трубкой, и приведены на рис.5.



**Рис. 5.** Измеренные емкостным зондом фаза (слева) и амплитуда (справа) ВЧ напряжения на разряде;  $I \sim 220$  мА,  $V_f \sim 20$  м/с,  $I_{HF} = 168$  мА,  $\langle N_{HF} \rangle = 240$  Вт

На основании этих данных, амплитуда ВЧ поля в разряде составляет  $\sim 500$  В/см, сдвиг фазы напряжения на зонде относительно напряжения на электроде меняется от 0 до  $\pi/2$  в области головки факела. При оценке поля учитывалось, что коэффициент емкостного делителя, образованный плазмой разряда, головкой зонда и заземленным экраном, составляет  $\sim 5$ . Полученные значения поля позволяют оценить приведенное поле на оси разряда  $E/N \sim 10-12$  Тд. Исходя из светового диаметра канала, общего тока в разряде и поля на оси факела, величина проводимости плазмы вблизи электрода составляет  $\sigma \sim 5 \cdot 10^{-4}$  Ом $^{-1}$ см $^{-1}$ . Тогда электронная концентрация в данной области с точностью до порядка величины равна  $N_e \sim 10^{12}$  см $^{-3}$ .

Далее в работе проводится сравнение одноэлектродного разряда с моделью эквивалентной распределенной длинной линии. При частоте 350 кГц, и длине разряда  $\sim 30$  см данная модель может быть сведена к модели полубесконечной RC цепи. Параметры линии выбраны исходя из сопротивления участка канала разряда и погонной емкости разряда относительно внешнего электрода (оценена на основании максимального диаметра разряда). В условиях сильного затухания волны, решение телеграфного уравнения для линии с однородными по длине параметрами дается в виде:

$$u = U_0 \exp(-\mu x) \cos(\mu x + \omega t); \quad \mu = (\omega RC/2)^{0.5}, \quad (1)$$

где  $\mu$  – коэффициент затухания волны. Для параметров линии  $C \sim 0,24$  пФ/см,  $R \sim 2,3$  кОм/см, и частоты ВЧ напряжения  $f = 350$  кГц характерная длина затухания волны составляет  $1/\mu_{теор} \sim 72$  см. В то же время, длина затухания оценивается из рис.4 как  $1/\mu_{эксп} \sim 13$  см. Наблюдаемое расхождение может объясняться изменением реальных параметров линии (погонной емкости и индуктивности) по длине разряда.

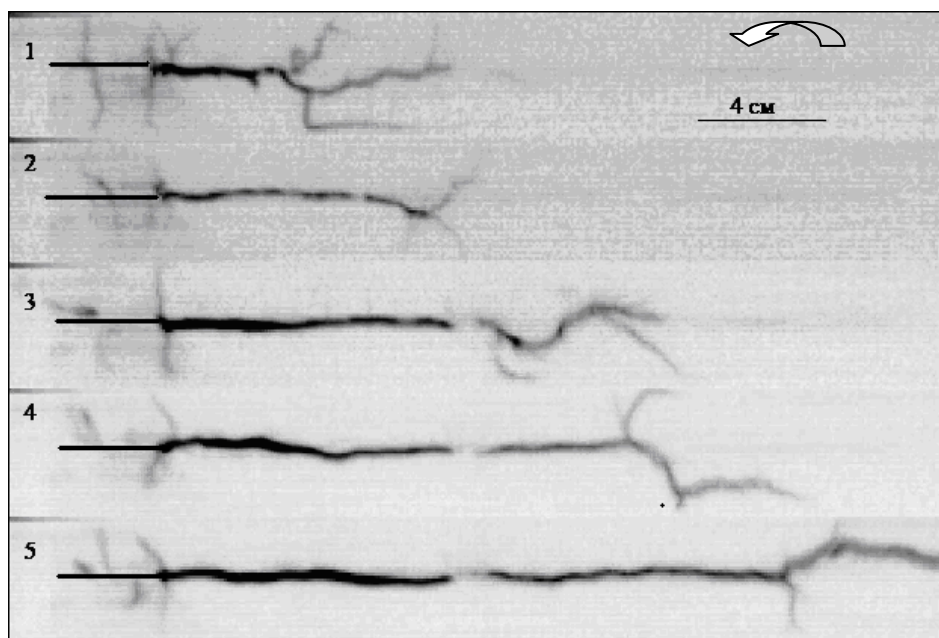
В качестве материала для дальнейшего развития модели длинной линии, далее определены вольт-амперные характеристики двухэлектродного продольного разряда, горящего на оси вихря, в диапазоне разрядных токов  $60 \div 220$  мА в закрученном потоке воздуха. При снятии ВАХ, параметры течения (расходы газа, давление и температура) совпадали с параметрами течения в предыдущем эксперименте. Показано, что в рассматриваемом диапазоне параметров ВАХ положительного столба разряда является падающей, что характерно для положительного столба контрагированного тлеющего разряда в воздухе. Напряженность электрического поля в разряде составляет в данном случае  $\sim 200 \div 700$  В/см, что приблизительно соответствует величинам, полученным с помощью емкостного зонда в одноэлектродном разряде.

В §3.3 описываются результаты изучения структуры и динамики распространения одноэлектродного ВЧ разряда в импульсно-периодическом режиме при атмосферном давлении и сильной закрутке потока (режим

образование зоны возвратного течения). В данном режиме, каждый последующий импульс распространяется в полях плотности, температуры и концентрации возбужденных частиц, определяемых предыдущей историей горения разряда. Поэтому изучение этого режима необходимо для понимания процесса формирования протяженного факельного разряда из ВЧ короны в закрученном течении.

На рис.6 представлены фотографии последовательных импульсов ВЧ-разряда. Показано, что на стадии распространения можно условно разделить ВЧ-разряд на две области: область сформировавшегося факела, вытянутого по оси трубы, и область головной плазменной короны, состоящей из искривленных каналов. При этом плазменный факел удлиняется от импульса к импульсу вверх по потоку со скоростью  $\sim 10$  м/с. Скорость движения головки факела не зависит от частоты следования импульсов. Необходимо отметить, что полученная в экспериментах скорость «головки» разряда близка к характерному значению скорости возвратного течения на оси трубы.

Далее приводятся интерферограммы импульсно-периодического разряда на стадии распространения (рис.7). Показано, что при горении разряда на оси вихря образуется тепловая каверна- область пониженной плотности, граница которой движется по направлению к завихрителю с характерной скоростью  $\sim 10$  м/с. Показано, что на передней границе прогретой зоны возникают каналы ВЧ короны с температурой на оси  $\sim 600$  К и тепловым диаметром  $\sim 2$  мм.



**Рис. 6.** Вид последовательных импульсов ВЧ- разряда в вихревом потоке;  $P=1$  атм,  $V_r \sim 20$  м/с,  $V_{ax} \sim -8$  м/с,  $U \sim 20$  кВ,  $F_M=250$  Гц,  $\tau=500$  мкс. Закрученный поток движется справа налево. Яркость инвертирована

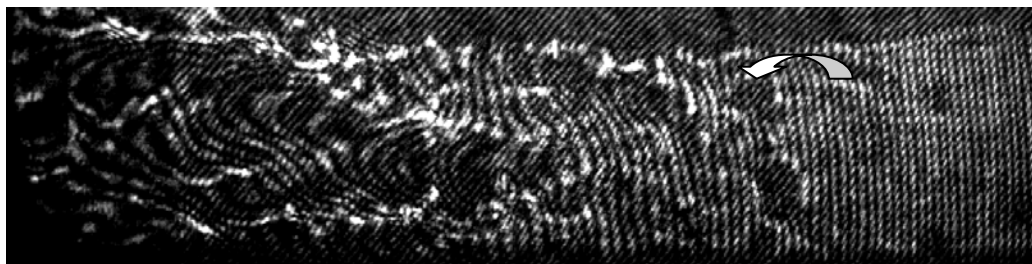


Рис. 7. Интерферограмма одноэлектродного ВЧ разряда в закрученном потоке;  
 $F_m=150$  Гц,  $\tau=2,5$  мс,  $f=350$  кГц  $Q_{ax}=5$  г/с,  $Q_t=5$  г/с,  $t_{exp}=40$  мкс

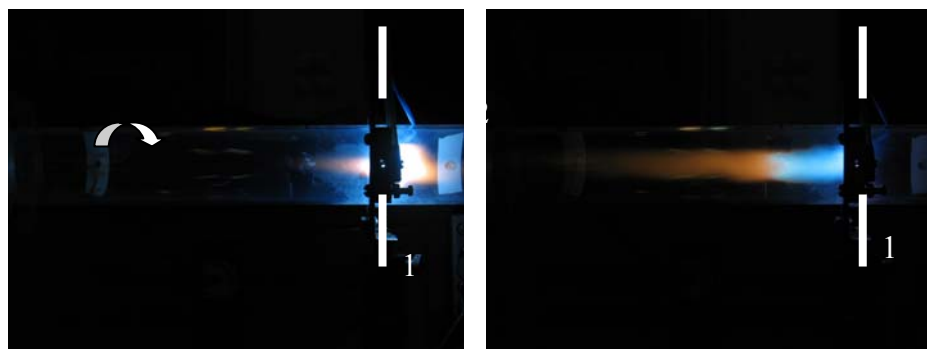
Интерферограммы обработаны с помощью обратного преобразования Абея. При обработке предполагалось, что основной вклад в показатель преломления дают нейтральные невозбужденные молекулы воздуха. Температура в камере между импульсами составляет  $600\div 1000$  К на различном удалении от электрода. При подаче ВЧ импульса, на фоне «теплого» газа образуется канал разряда, в котором температура достигает  $2000\div 3000$  К.

В §3.4 проведен анализ результатов, изложенных в третьей главе. Переход разряда из режима ВЧ короны в режим факельного разряда объясняется возникновением области пониженной плотности на оси вихря вследствие всплывания горячих каналов ВЧ короны к оси трубы. При формировании зоны обратных токов, теплообмен разрядной области с внешним потоком и вынос возбужденных частиц из зоны разряда ослабевают, соответственно увеличивается средняя температура в области горения разряда, падает плотность газа и растет концентрация возбужденных частиц и отрицательных ионов. Рост скорости процессов термической и ассоциативной ионизации приводит к падению напряженности электрического поля. Следствием этого является уменьшение скорости распространения разряда относительно газа. При этом, скорость границы разряда определяется в первую очередь скоростью потока в данной точке. Данные представления подтверждаются близостью скорости распространения головки факела в импульсно периодическом режиме, скорости границы тепловой камеры и скорости противотока на оси трубы.

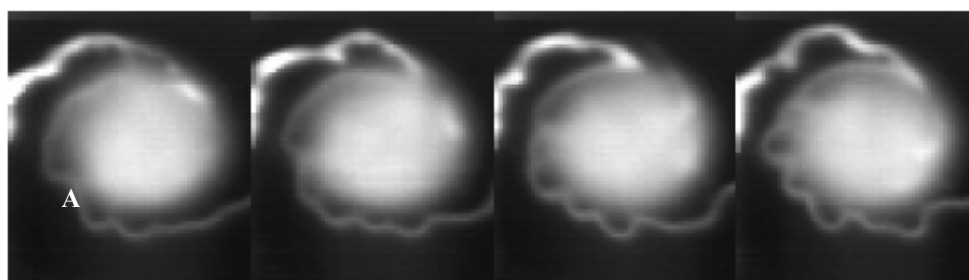
Численное моделирование закрученного течения с одноэлектродным ВЧ разрядом наталкивается на трудности, связанные со сложной структурой источника теплоты, а также с необходимостью учета неравновесного возбуждения колебательных степеней свободы. В первом приближении, имеет смысл рассмотреть влияние локального равновесного тепловыделения на параметры и структуру закрученного течения в канале. В качестве локального источника равновесной плазмы в работе использован разряд постоянного тока, горящий при атмосферном давлении.

В четвертой главе приводятся результаты исследования взаимодействия плазменного образования, созданного источником постоянного тока, с закрученным газовым потоком.

§4.1 посвящен описанию структуры поперечного разряда постоянного тока в потоке азота и воздуха атмосферного давления с различной степенью закрутки. Показано, что увеличение расхода газа через завихритель с 2 до 9 г/с приводит к возникновению зоны равновесной плазмы, вытянутой вверх по потоку от местоположения электродов (рис.8). Показано, что в плоскости электродов в диапазоне токов  $0,5 \div 2$  А разряд представляет собой два шнура-анодный и катодный, закрученных в спираль в направлении вращения потока, с областью диффузного свечения на оси потока (рис.9). Визуальная толщина шнуров вблизи составляет приблизительно 1 мм. Оба шнура испытывают изгибные колебания с длиной волны  $\sim 8$  мм, не наблюдавшиеся в прямом потоке. Горение разряда нестационарно - при удлинении каналов и их приближении к противоположному электроду происходит пробой газа между шнуром и электродом и перезамыкание дуги.



**Рис. 8.** Фотографии разряда при различных параметрах закрутки потока: слева –  $Q=2$  г/с, слабая закрутка; справа –  $Q=9$  г/с, сильная закрутка. 1 – электроды, 2 – протяженное плазменное образование



**Рис. 9.** Кадры высокоскоростной визуализации разряда;  $P=1$  атм,  $M=0,1$ ,  $I=2$  А,  $N_{el}=1,3$  кВт

Далее приводятся параметры плазмы в протяженном плазменном образовании (2, см. рис.8). Температура электронов определялась методом относительных интенсивностей линий атомарного вольфрама W I, температура газа оценивалась по планковскому спектру эрозионных частиц. Показано, что



температура электронов здесь равна  $\sim 0.33$  эВ и близка к газовой температуре  $\sim 3000$  К. При такой низкой температуре электронов, процессы ионизации электронным ударом имеют крайне малые сечения, а время распада плазмы при атмосферном давлении и температуре газа  $\sim 3000$  К определяется константой диссоциативной рекомбинации и составляет  $\sim 10^{-6} \div 10^{-7}$  с. Таким образом, протяженное плазменное образование формируется из нагретого газа и продуктов эрозии электрода, выносимых из области разряда возвратным течением газа. При этом, область тепловыделения в разряде можно представить в виде кольцевой зоны небольшой протяженности, расположенной в плоскости электродов. Эта геометрия источника равновесного тепловыделения использовалась при численном моделировании течения в канале (см. §5.3).

В §4.2 приводятся параметры плазмы *продольного разряда постоянного тока* в вихревом течении воздуха при следующих экспериментальных условиях: давление воздуха 760 торр, ток в разряде  $\sim 200$  мА, окружное число Маха  $M_t = V/c \sim 0,1$ . Плазма положительного столба разряда имеет температуру  $\sim 3000$  К.

В этом же разделе приведены интерферограммы обтекания продольного разряда в закрученном и прямом потоке воздуха. Показано, что закрутка потока приводит к стабилизации границы разряда по отношению к неустойчивости Кельвина-Гельмгольца.

В **пятой главе** приводятся результаты измерения параметров закрученного потока при горении в нем ВЧЕР и разряда постоянного тока. Для выявления общих закономерностей, эксперименты проведены как для закрученного течения в трубе, так и для неограниченного стенками линейного вихря. В работе приводятся данные для следующих конфигураций:

сильно закрученный поток в трубе с поперечным дуговым разрядом постоянного тока и одноэлектродным ВЧЕР,

свободное закрученное течение с продольным разрядом постоянного тока,

вихревое течение за треугольным крылом с одноэлектродным ВЧ разрядом.

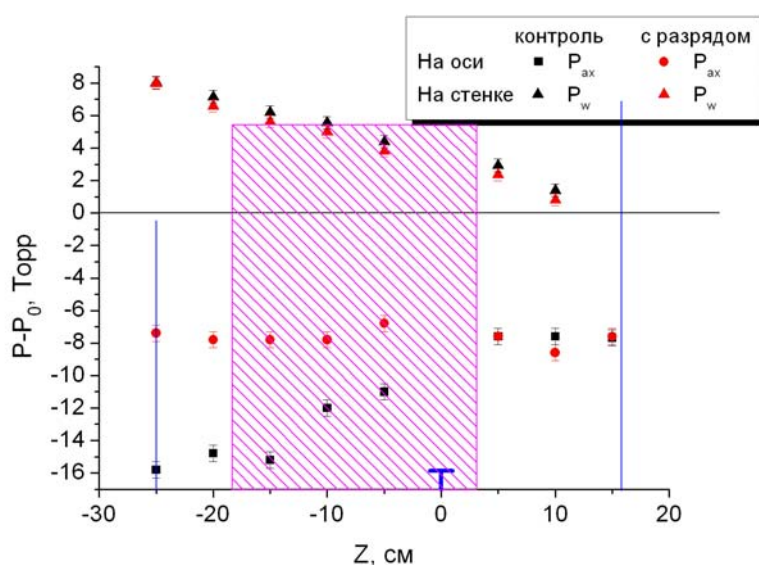
В §5.1 приводятся данные о влиянии одноэлектродного ВЧ разряда на параметры сильно закрученного течения воздуха в канале ( $S \sim 1,5$ ). Исследуется влияние разряда на распределение статического давления вдоль оси закрученного течения.

В первом разделе приведены результаты исследований при давлении 760 торр и числе Маха  $M \sim 0,1$ . Показано, что зажигание разряда приводит к росту давления на оси канала до 90% от начального разрежения при вложенной мощности  $\sim 1,5$  кВт (безразмерный энерговклад  $Da = N_{el} / (c_p T_0 Q) \sim 1,2$ ), и

соответствующему уменьшению радиального градиента давления в вихре. Обнаружено, что в диапазоне мощностей энерговыклада 300-1300Вт ( $Da=0,25\div 1$ ) разрежение на оси вихря зависит от вложенной в разряд мощности как

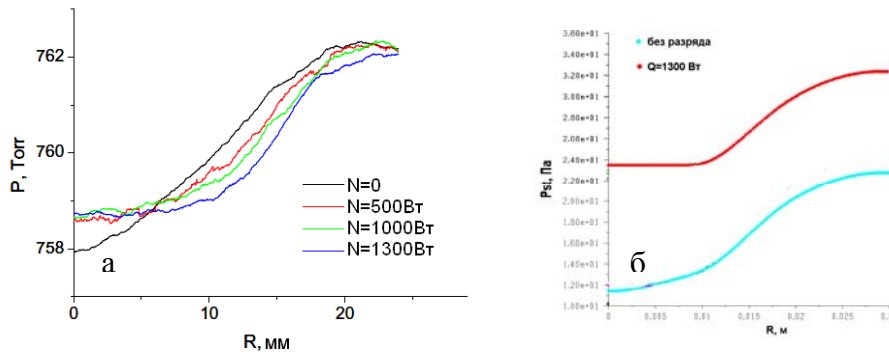
$$\frac{(P_{ax} - P_w)_1}{(P_{ax} - P_w)_0} = \frac{1}{1 + 7Da} \sim \frac{1}{7Da} \quad (2).$$

Далее приводятся аналогичные данные для случая низкого давления газа  $P=40$  торр и числа Маха  $M_t \sim 0.4$ . Обнаружено, что зажигание разряда при безразмерном энерговыкладе  $Da \sim 1.3$  приводит к уменьшению разрежения на оси вихря на 30% от его величины в холодном потоке. Рост давления на оси наблюдается по всей доступной для измерений длине трубы (рис.10).



**Рис. 10.** Распределение статического давления вблизи оси вихря. Продольный ВЧ разряд;  $Q_f = 6.3$  г/с,  $N_{el} = 2.5$  кВт,  $P_{st} = 60$  торр; положение электрода  $z=0$ . Область разряда отмечена штриховкой

В §5.2 описано влияние поперечного дугового разряда постоянного тока на распределение давления в закрученном течении в трубе при следующих условиях эксперимента: давление воздуха  $\sim 760$  торр, выделяемая мощность  $N_{el} \sim 0\div 1,3$  кВт, безразмерный энерговыклад  $Da \sim 0\div 0,55$ . Распределения статического давления по радиусу канала приведены на рис.11а. Видно, что при мощности разряда  $\sim 1,3$  кВт ( $Da=0,55$ ) давление на оси канала увеличивается на 20% от исходного разрежения на оси трубы. Увеличение выделяемой в разряде мощности с 300 до 1300 Вт приводит к увеличению диаметра центральной области с малым градиентом давления с 8 до 12 мм. При этом, давление на оси канала остается постоянным (рис.11б).



**Рис. 11.** Радиальные распределения давления в сечении  $z = -6$  мм от электродов: *a* – полученные в эксперименте при различных значениях энерговклада при  $P=1$  атм,  $M_t=0,1$ ,  $Q=9$  г/с; *б* – полученные в расчете при  $P=1$  атм,  $M_t=0,02$ ,  $Q=9$  г/с

В этом же разделе приводятся данные численного моделирования закрученного течения в трубе с локальным источником тепловыделения (расчет проводился Завершинским И.П., Молевич Н.Е., Порфирьевым Д.П.). Геометрия канала, расходы газа через завихритель и параметры разряда взяты из описанного выше эксперимента. Радиальная зависимость объёмного источника нагрева (моделирующего нагрев в разряде) соответствует преимущественному выделению тепла ( $\sim 70\%$ ) в кольцевом цилиндре с радиусами  $0.5R < r < R$ , длиной  $L = 1$  см, что соответствует структуре разряда, описанной в § 4.1. Положение центра источника  $z=0.4$  м. Полная мощность разряда считалась равной 1,2 кВт ( $Da \sim 0.5$ ). Возбуждение внутренних степеней свободы в разряде не учитывалось.

В расчете показано, что при расходе воздуха через завихритель, взятом из эксперимента, тепловыделение в разряде не приводит к исчезновению области возвратных токов на оси вихря. Это подтверждает предположение о том, что формирование протяженной ярко светящейся области на оси вихря при больших расходах газа через завихритель (см. §4.1) обусловлено выносом эрозионных частиц из зоны разряда.

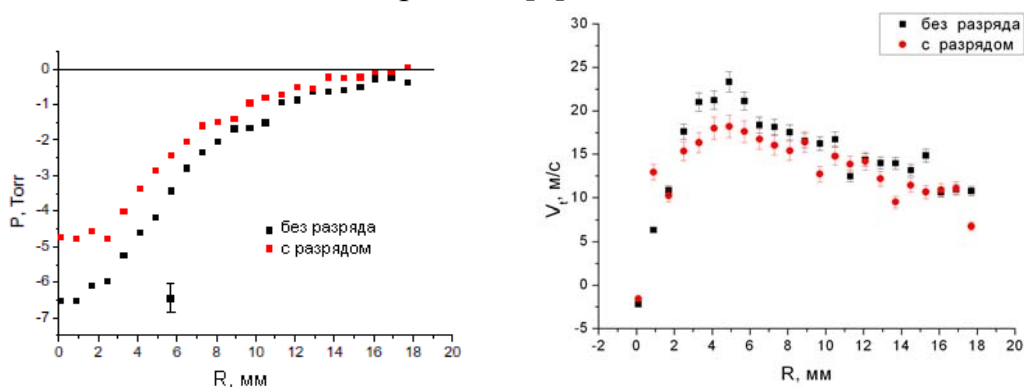
В расчете также получено уменьшение разрежения в закрученном течении на  $\sim 20\%$  при включении разряда (рис.11б). На радиальных распределениях статического давления видно увеличение диаметра области малого радиального градиента давления по оси трубы. При этом, в расчете среднее давление в канале выше по потоку от области энерговыведения падает. Это расхождение можно объяснить малыми, по сравнению с экспериментом, тангенциальными скоростями потока. Таким образом, показано качественное соответствие экспериментальных данных результатам численного моделирования. Отсутствие экспериментальных данных о распределении скорости не позволяет провести более полное сравнение.

В §5.3 описаны изменения, происходящие в свободном (неограниченном стенками) вихревом течении под действием продольного разряда постоянного тока, горящего на оси вихря (см. §4.2).

С помощью вращающегося датчика давления получены радиальные распределения статического давления и тангенциальной скорости (рис.12). Видно, что при вкладываемой мощности  $N_{el}=200$  Вт ( $Da\sim 0.15$ ) зажигание разряда приводит к уменьшению разрежения на оси вихря на 25%, падению плотности на оси вихря на 50%, а также к уменьшению максимальной тангенциальной скорости в ядре вихря на 20% от их значений в невозмущенном течении.

Проведено сравнение полученных экспериментальных данных с результатами одномерного численного моделирования, опубликованными в [7,10]. В расчете показано, что как равновесное, так и неравновесное тепловыделение в разряде на оси вихря в конечном счете приводит к увеличению диаметра вихря, падению давления на его оси и перераспределению окружной скорости.

Качественное совпадение результатов эксперимента и расчета подтверждает основные выводы работы [7].

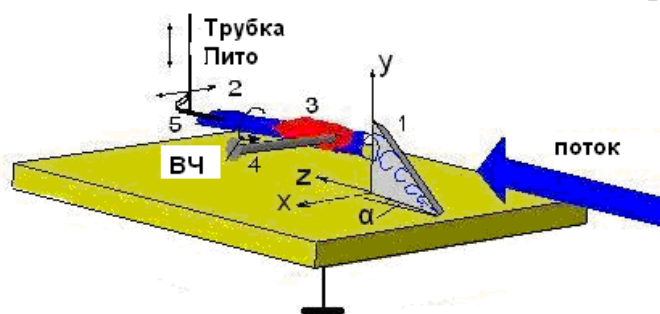


**Рис. 12.** Распределения давления (слева) и окружной скорости (справа) в закрученном потоке за разрядом;  $N_{el}=200$  Вт,  $P=1$  атм,  $Z=3$  см.

В связи с прикладным значением задачи управления течением за треугольным крылом, в §5.4 рассмотрено взаимодействие одноэлектродного ВЧ разряда с коническим вихрем, образованным в результате обтекания передней острой кромки треугольного крыла под малым углом атаки. Угол атаки крыла изменялся в пределах  $6\div 25^\circ$ , скорость набегающего потока  $5\div 30$  м/с, число Рейнольдса  $10^4\div 7\cdot 10^4$ , статическое давление в свободном потоке составляло  $P\sim 1$  атм. Принципиальная схема эксперимента приведена на рис.13.

Показано, что при частоте  $f\sim 13.6$  МГц и мощности в разряде  $N_{el}<1$  кВт разряд существует в факельной форме только в диапазоне углов атаки  $<20^\circ$  и скоростей потока до 10 м/с. Распределения статического и полного давления

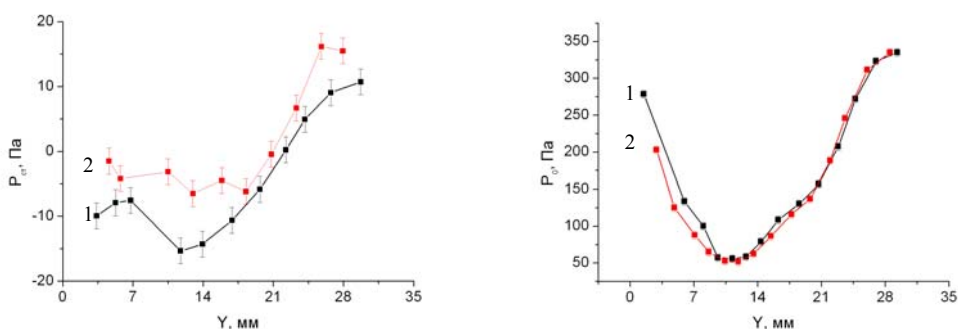
показывают, что в рассматриваемом случае область возвратных течений в потоке отсутствует. Продольная скорость на оси вихря составляет примерно 40% от скорости набегающего потока, тангенциальная скорость  $\sim 6$  м/с.



**Рис. 13.** Схема установки с аэродинамической моделью:

1 – диэлектрическая модель крыла, 2 – вихревой жгут, 3 – ВЧ разряд, 4 – нагруженный электрод, 5 – датчик давления

Изучение влияния разряда на параметры конического вихря за треугольным крылом проводилось при угле атаки  $\alpha \sim 6^\circ$ , скорости набегающего потока  $V_{af} = 25$  м/с и числе Рейнольдса  $Re = 10^4 \div 7 \cdot 10^4$ . Распределение статического и полного давления по радиусу вихря (рис.14), полученные при  $N_{el} \sim 500$  Вт ( $Da \sim 0.2$ ) свидетельствуют об увеличении диаметра области пониженных давлений торможения на 10% и уменьшении разрежения на оси вихря на 30% по сравнению с невозмущенным течением.



**Рис. 14.** Профили статического (слева) и полного давления (справа) при отсутствии разряда (1) и с включенным разрядом (2);  $\alpha = 6^\circ$ ,  $Z = 4$  см,  $V_{af} = 23$  м/с,  $N_{el} \sim 500$  Вт

Таким образом, продемонстрировано, что в диапазоне величины безразмерного энерговклада  $Da \sim 0,15 \div 1$  и давлений  $40 \div 750$  торр, чисел Маха  $0,1 \div 0,5$  влияние разряда на течение проявляется в уменьшении разрежения на оси течения до 90%, а также в уменьшении максимальной тангенциальной скорости в ядре вихря до 20% от значений в невозмущенном течении.

В **приложении** приведены радиальные распределения давления и компонент скорости в установке ВТ-1 для основных режимов, использованных в работе.

В заключении сформулированы основные результаты работы:

1. Создана экспериментальная установка ВТ-1, позволяющая проводить изучение взаимодействия закрученных течений различных газов с плазмой ВЧЕР при давлении  $40 \div 760$  торр, числе Маха потока  $M_t = 0,1 \div 0,5$ , мощности энергоклада в разряд до 2,5 кВт.
2. Создан и отлажен диагностический комплекс, позволяющий измерять параметры плазменных образований, электрических разрядов и закрученного газового потока. В этом комплексе использованы оригинальные методики, такие как:
  - модернизированный вращающийся датчик давления для измерения компонент скорости в вихревом потоке,
  - оптический интерферометр с системой высокоскоростной регистрации интерференционных картин,
  - одновременное использование спектроскопии высокого разрешения и скоростной оптической интерферометрии (или скоростной теневой съемки),Реализован алгоритм обратного преобразования Абеля для интерферограмм с последующим определением плотности и температуры газа.
3. Впервые проведено исследование различных типов плазменных образований, созданных одноэлектродным ВЧЕР ( $F = 0,45$  МГц;  $13,6$  МГц,  $N_{HF} = 0,2 \div 2$  кВт), в высокоскоростном закрученном потоке воздуха. Определены границы областей существования этих образований в зависимости от параметров потока ( $P_{cm} = 760$  торр,  $M_t = 0,1$ , параметр закрутки  $S = 0 \div 1,5$ ) и параметров ВЧ разряда ( $N_{el} = 0 \div 1,5$  кВт,  $f = 450$  кГц). Определена роль возвратного течения в вихре в формировании протяженного факельного ВЧ разряда. Изучена структура и динамика формирования протяженного плазменного образования в закрученном потоке при импульсно-периодическом подводе ВЧ мощности. Обнаружено одновременное формирование ВЧ короны и протяженного факельного ВЧ разряда в закрученном потоке.
4. Измерены параметры плазмы протяженного плазменного образования, созданного ВЧЕР ( $f = 0,35$  кГц,  $N_{el} = 220$  Вт) в высокоскоростном вихревом потоке воздуха при давлении  $40 \div 760$  торр и числах Маха потока  $M_t \sim 0,1 \div 0,5$ . При токе разряда  $I = 168$  мА и мощности  $N_{el} = 240$  Вт (удельный энергоклад  $\sim 10$  Вт/см<sup>3</sup>) параметры плазмы разряда следующие: максимальная газовая температура  $T_{g\_max} = 2100 \pm 200$  К, концентрация электронов  $N_{e\_max} = 10^{12}$  см<sup>-3</sup>, колебательная температура  $T_v = 4000 \pm 500$  К,

продольное ВЧ поле на оси факела  $E_{ВЧ} \sim 500$  В/см, приведенное поле  $E_{ВЧ}/N \sim 12$  Тд, приведенное поле на границе факела  $50 \div 70$  Тд. Максимальная степень неравновесности достигается на границе разряда и составляет  $\eta = T_v/T_g > 5$ .

5. Экспериментально исследовано влияние плазмы протяженного ВЧЕР и плазмы разряда постоянного тока на параметры закрученного течения воздуха в трубе при давлениях  $40 \div 760$  торр и числах  $M_t = 0.1 \div 0.4$ . Показано, что создание протяженного плазменного образования при безразмерном энергокладе  $Da \sim 1$  приводит к росту давления на оси вихря до 90% от начального разрежения, и соответствующему уменьшению градиентов давления в приосевой области течения (вплоть до нулевых значений). Обнаружено, что рост давления обратно пропорционален вложенной в разряд мощности (в диапазоне величины безразмерного энергоклада  $Da = 0,25 \div 1$ ). Проведено сравнение экспериментальных распределений давления с результатами численного моделирования взаимодействия плазменного образования с сильно закрученным газовым потоком в канале при  $P = 1$  атм,  $N_{el} \sim 1,3$  кВт,  $Da \sim 0,55$ ,  $M = 0,02$ . Показано, что локальное тепловыделение в канале уменьшает область обратных токов, но при больших параметрах закрутки противоток на оси вихря сохраняется. Показано качественное согласие экспериментальных результатов с расчетными.
6. Экспериментально исследовано влияние плазмы одноэлектродного ВЧР и плазмы разряда постоянного тока на параметры свободного закрученного течения воздуха при давлении 760 торр и числе Маха  $M_t = 0,1$ .
  - а. В случае разряда постоянного тока, при безразмерном энергокладе с  $Da \sim 0,15$  обнаружено уменьшение тангенциальной скорости в ядре вихря на 20% и уменьшение разрежения на 25%.
  - б. В случае одноэлектродного ВЧЕР, при безразмерном энергокладе  $Da \sim 0,2$  в вихревом жгуте за треугольным крылом обнаружено увеличение диаметра области пониженных давлений торможения на 10% и уменьшение разрежения на оси вихря на 30% по сравнению с невозмущенным течением.

## СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жуков М.Ф., Смоляков В.Я., Урюков Б.А. Электродуговые нагреватели газа: плазматроны – М.: Наука. 1973. 232 с.
2. Тихомиров И.А., Власов В.А., Луценко Ю.Ю., Зорин А.А. // Изв. Томского политехнического университета. 2003.Т.306.№1. С.21-29.
3. Александров К.В., Грачев Л.П., Есаков И.И., Федоров В.В., Ходатаев К.В. // ЖТФ 2006 т.76 №.11 с.52.
4. Вихарев А.Л., Иванов О.А., Степанов А.Н. // Высокочастотный разряд в волновых полях. Горький. 1988. с.212.
5. Shibkov V.M. et.al. Microwave discharges in supersonic plasma aerodynamics // In: AIAA paper 2004-513.
6. Knight D., Kolesnichenko Yu.F., et.al. // In: 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 7-10 January 2008, Reno, NV.
7. Казаков А.В. Влияние объемного подвода энергии на закрученные течения в спутном дозвуковом потоке. // МЖГ 1998 №6 с.4.
8. Завершинский И.П., Климов А.И., Молевич Н.Е., Порфирьев Д.П. Эволюция вихря Рэнкина в газе с источником тепловыделения //ПЖТФ 2009 т.35 №7 с.106.
9. Soukhomlinov V.S., Sheverev V.A., Ötügen M.V. Evolution of a Vortex in Glow Discharge Plasma // Phys. Fluids. 2005. V.17. 058102.
10. Винниченко Н.А., Осипов А.И., Уваров А.В. Эволюция одиночного вихря в однородной неравновесной среде // Вестн. МГУ. Сер. 3. Физика, астрономия. 2009. № 3. с.77.
11. Гупта А., Лилли А., Сайред Н. Закрученные потоки. – М.: Мир, 1987.
12. Laux, C.O. “Radiation and Nonequilibrium Collisional-Radiative Models” von Karman Institute Lecture Series 2002-07 // Physico-Chemical Modeling of High Enthalpy and Plasma Flows. eds. D. Fletcher, J.-M. Charbonnier, G.S.R. Sarma, T. Magin, Rhode-Saint-Genuse. Belgium. 2002.
13. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – М.: Наука. 1992.

**Моралев Иван Александрович**  
**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ПЛАЗМЫ**  
**С ЗАКРУЧЕННЫМИ ТЕЧЕНИЯМИ**

Автореферат

---

Подписано в печать 10.11.2010

Формат 60x48/16

Печать офсетная

Уч.-изд.-л. 1.5

Усл.-печ.л. 1.3

Тираж 100 экз.

Заказ N 123

Бесплатно

---

ОИВТ РАН. 125412. Москва, Ижорская ул., д.13, стр.2