

На правах рукописи

ЛАТФУЛЛИН Денис Фатбирович

**Импульсный скользящий поверхностный разряд в
газодинамическом потоке**

Специальности:

01.04.17 – химическая физика, в том числе физика горения и взрыва
01.04.08 – физика плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2009

Работа выполнена на кафедре молекулярной физики физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

Научные руководители	доктор физико-математических наук, профессор Н.Н. Сысоев
	кандидат физико-математических наук, И.В. Мурсенкова
Официальные оппоненты	доктор физико-математических наук, профессор А.Ф. Александров
	кандидат физико-математических наук, с.н.с. В.Ю. Гидаспов
Ведущая организация	Институт химической физики им. Н.Н. Семенова РАН

Защита состоится 20 мая 2009 года в 16:30 на заседании диссертационного совета Д 501.002.01 в Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, ГСП-2, Ленинские горы, МГУ, физический факультет, ЮФА.

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

Автореферат разослан 20 апреля 2008 года

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 501.002.01,
кандидат физико-математических наук

Т.В. Лаптинская

1 Общая характеристика работы

Актуальность темы

В последнее время интенсивно развивается сравнительно новая область физики плазмы – плазменная аэродинамика. Задачи плазменной аэродинамики связаны с вопросами взаимодействия плазменных образований с высокоскоростными потоками воздуха и различных газовых смесей. Электрические разряды в потоках газа рассматриваются как эффективный способ подвода энергии к потоку в результате джоулевой диссипации энергии электрического тока разряда [1-3]. С практической точки зрения это можно использовать для перестройки ударно-волновых конфигураций перед летательным аппаратом, управляя обтеканием, или использовать как эффективный способ воспламенения воздушно-топливных смесей в двигателях при движении на больших скоростях.

Преимуществом использования газоразрядной плазмы для воздействия на поток является разнообразие форм и условий организации газового разряда, достаточная простота конструкции газоразрядных установок и быстрота воздействия на течение. В лабораторных условиях в потоке газа реализуют, как правило, разряды постоянного тока, импульсно-периодические и безэлектродные разряды. Объемные газовые разряды используются для управления режимами течения около тел различной формы, поверхностные разряды позволяют направленно воздействовать на пограничный слой вблизи обтекаемых поверхностей [2-8]. Актуальным в таких исследованиях остается нахождение оптимальных режимов развития разряда в потоке газа, определение величины энерговклада, анализ кинетических процессов в плазме разряда, изучение влияния разряда на поверхностное трение, теплообмен, локальную структуру течения (зоны отрыва, скачки уплотнения).

Изучение процессов взаимодействия плазмы с газодинамическими потоками важно как с точки зрения фундаментальных исследований

механизмов и кинетики атомно-молекулярных превращений при наличии сильных электрических полей и при высоких скоростях течения, так и с точки зрения оптимизации плазмохимических процессов и изменения газодинамических параметров течений. Разряды, создаваемые в молекулярных газах (воздух, азот, кислород и их смеси), приводят к эффективному возбуждению внутренних степеней свободы молекул, диссоциации молекул, наработке активных радикалов и нагреву среды. Возникла задача поиска оптимальных способов создания низкотемпературной плазмы в высокоскоростных потоках газа, изучения влияния газового разряда на газодинамические характеристики потока вблизи обтекаемых поверхностей и выявления механизма развития разряда в высокоскоростном потоке. Для более глубокого понимания физико-химических процессов, протекающих при взаимодействии низкотемпературной плазмы газового разряда с потоком необходимо как проведение экспериментальных исследований, так и сопоставление их с расчетами в рамках газодинамических моделей.

Целью диссертационной работы было экспериментальное исследование фундаментальной научной проблемы, связанной с изучением газодинамических и энергетических процессов, протекающих при развитии поверхностного распределенного скользящего разряда наносекундной длительности, и при взаимодействии плазмы разряда с высокоскоростным поперечным потоком воздуха.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- экспериментальное исследование пространственно-временных характеристик импульсного поверхностного скользящего распределенного разряда в покоящемся воздухе при давлениях 15-250 торр и в поперечном потоке воздуха при скоростях до 1600 м/с;
- изучение эволюции газодинамических возмущений, возникающих при иницировании разряда в условиях неподвижной среды и высокоскоростного потока;

- определение уровня мгновенного энерговложения в газ на основе сопоставления экспериментально определяемой динамики ударных волн из области разряда с численными расчетами;
- исследование разряда в ламинарном и турбулентном пограничном слое.

В целом использование скользящего поверхностного разряда позволяет интенсивно воздействовать на газодинамическое течение в области пограничного слоя за время, существенно меньшее времен характерных газодинамических процессов. Поверхностный скользящий разряд наносекундной длительности, обладающий высокой степенью однородности поверхностного энерговклада, не инициировался ранее в сверхзвуковых потоках газа. Этот факт обуславливает научную новизну работы, которая характеризуется следующими основными результатами:

- создана экспериментальная база для исследования импульсного скользящего распределенного поверхностного разряда в потоке воздуха в ударной трубе при различных давлениях, скоростях потока, величинах энерговложения в поток;
- впервые в широком диапазоне давлений воздуха (15-400 торр) и скоростей потока (до 1600 м/с) проведено изучение геометрии плазменного слоя скользящего поверхностного разряда;
- впервые систематически исследована динамика ударных волн из области импульсного поверхностного скользящего разряда в воздухе при различных условиях инициирования разряда, оказывающая существенное влияние на газодинамическое течение в ударной трубе, в том числе на динамические нагрузки на стенки канала;
- предложен и реализован новый метод визуализации структуры приповерхностного течения свечением импульсного поверхностного скользящего разряда; на его основе получены зависимости расстояния ламинарно-турбулентного перехода в пограничном слое при трансзвуковых и сверхзвуковых скоростях потока.

Практическая ценность работы. Полученные в работе данные представляют не только академический интерес, но являются научной базой для выработки рекомендаций по использованию газоразрядной плазмы при создании летательных аппаратов нового поколения; для оценки влияния плазменных образований на приповерхностное течение; для управления горением в высокоскоростных потоках. Результаты исследований включены в отчеты грантов РФФИ и Программы РАН № 09.

Основные положения, выносимые автором на защиту:

1. Зависимость пространственно-временных и спектральных характеристик плазмы импульсного поверхностного скользящего разряда от давления в неподвижном воздухе и от параметров течения в потоке за ударной волной.
2. Результаты исследования динамики ударных волн из области импульсного поверхностного скользящего разряда в воздухе при давлениях 15-400 торр и скоростях потока до 1600 м/с.
3. Способ определения энергии, мгновенного переходящей в тепловую в приповерхностном слое газа, на основе сравнения экспериментальной динамики ударных волн из области разряда с численными расчетами.
4. Зависимость доли энергии разряда, трансформирующейся в тепло за время энергоподвода, от плотности среды.
5. Новый метод визуализации структуры приповерхностного нестационарного течения свечением импульсного разряда и полученные на его основе параметры ламинарно-турбулентного перехода в пограничном слое при трансзвуковых и сверхзвуковых скоростях потока.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на международных и российских конференциях, симпозиумах и семинарах, в том числе: на Всесоюзной конференции по физике низкотемпературной плазмы (ФНТП, Петрозаводск, 2004); XII Международной конференции Ломоносов-2005

(Москва, МГУ, 2005); XIII Школе-семинаре «Современные проблемы аэрогидродинамики» (Сочи, 2005); на 8 и 9 Международных научно-технических конференциях "Оптические методы исследования потоков" (Москва, 2005, 2007); на VI и VII Международных конференциях по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ-2006, 2008); на XXXIII и XXXIV Звенигородских конференциях по физике плазмы и УТС (Звенигород, 2006, 2008); International Symposium on Shock Waves (ISSW-26, Germany, 2007) и на научных семинарах кафедры молекулярной физики физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы (110 ссылок). Объем диссертации составляет 117 страниц. Работа содержит 62 рисунка.

2 Содержание диссертации

Во **введении** обосновывается актуальность темы, формулируются цели и задачи диссертационной работы.

В **первой главе** приведен обзор литературы по взаимодействию потоков газа с плазменными образованиями и способам регистрации структуры потока.

В первом параграфе 1.1 проведен анализ работ по исследованию взаимодействия высокоскоростных потоков газа с газовыми разрядами. В течение последних десятилетий выполнен большой объем экспериментальных и теоретических работ по исследованию взаимодействия газодинамических возмущений со слабоионизованной плазмой. Это позволило в значительной мере понять механизмы и продемонстрировать потенциальные возможности влияния плазменных образований на характеристики высокоскоростных потоков. Электрические разряды являются эффективным способом создания плазменных областей в быстрых потоках газа.

Во втором параграфе 1.2 проанализированы работы, посвященные исследованию поверхностных скользящих разрядов. Скользящий поверхностный распределенный разряд (плазменный лист) – вид газового разряда, развивающийся вблизи поверхности диэлектрика при подаче высоковольтного импульса на систему электродов специальной конфигурации. Выбор скользящего поверхностного разряда как объекта исследования определялся его особыми свойствами по сравнению с другими типами разрядов, а именно:

- 1) развитием разряда в тонком приповерхностном слое газа на границе раздела твердого и газообразного диэлектриков;
- 2) значительной мощностью энергозатрат в газ, определяющейся высокими значениями напряжения и тока в разрядной системе;
- 3) малой длительностью существования разряда по сравнению с временами характерных газодинамических процессов;
- 4) плоской геометрией развития разряда, позволяющей организовать разряд на стенках прямоугольного канала ударной трубы;
- 5) широким диапазоном рабочих давлений и возможностью инициирования, как в импульсном, так и в частотном режимах.

На рисунке 1 показана система электродов, используемая для создания импульсного скользящего поверхностного разряда. При приложении высоковольтного импульса напряжения к электроду А на поверхности диэлектрика Д возникает ток смещения, который определяется величиной напряжения, крутизной его нарастания и переменной емкостью между плазмой поверхностного разряда и электродом К, покрывающим противоположную сторону диэлектрика.

Скользящие по поверхности диэлектрика разряды представляют собой хороший распределенный источник ультрафиолетового излучения вследствие высоких значений напряженности электрического поля. С их помощью можно осуществлять энергоподвод в приповерхностную область течения газа.

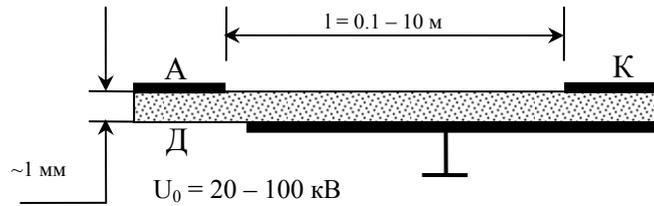


Рис. 1. Конфигурация электродов скользящего поверхностного разряда

В параграфе 1.3 описываются методы визуализации структуры сверхзвуковых и дозвуковых течений. Рассматриваются преимущества и недостатки основных классических теневых методов, метода рассеяния излучения на специальных частицах в среде, метода визуализации течений свечением стационарных разрядов.

Во второй главе описаны экспериментальная установка, позволяющая моделировать и исследовать взаимодействия плазмы поверхностного разряда с газодинамическим потоком, диагностический комплекс и условия проведения экспериментов.

Параграф 2.1 посвящен описанию экспериментальной установки, представляющей собой ударную трубу с разрядной секцией (рис. 2). Сечение канала камеры низкого давления и разрядной секции $24 \times 48 \text{ мм}^2$. Рабочим газом служил воздух при давлениях 15-400 торр. Скользящие поверхностные разряды площадью $30 \times 100 \text{ мм}^2$ инициировались в неподвижном воздухе и в потоке за фронтом идущей по каналу ударной волны на двух стенках разрядной секции на расстоянии 24 мм друг от друга. Две другие стенки представляли собой плоскопараллельные кварцевые стекла, через которые осуществлялась оптическая диагностика процессов в разрядной камере. На электроды разрядов подавалось импульсное напряжение 25-30 кВ, ток разряда достигал $\sim 1-2 \text{ кА}$. Длительность разряда $\sim 200 \text{ нс}$, что существенно меньше времен протекания газодинамических процессов в ударной трубе (микросекунды). Таким образом, воздействие импульсного скользящего поверхностного разряда на поток было практически мгновенным. В каждый плазменный

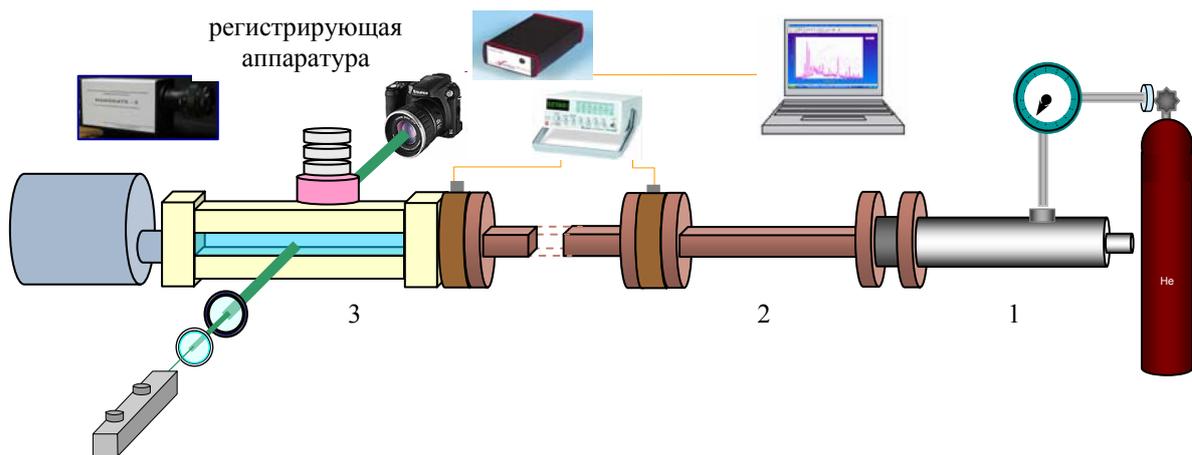


Рис. 2. Схема экспериментальной установки: 1 – камера высокого давления, 2 – камера низкого давления, 3 – разрядная камера

лист вкладывалась энергия ~ 0.4 Дж. Высокие значения напряжения и тока обеспечивали эффективное возбуждение колебательных и электронных степеней свободы молекул. Схема синхронизации процессов позволяла инициировать поверхностные разряды в различных областях потока.

Во втором параграфе 2.2 описаны параметры скользящего поверхностного разряда, проведена оценка параметра Таундсенда в разрядном промежутке ($E/N=(1\div 25)\cdot 10^{-15}$ В·см²) и концентрации электронов ($\sim 10^{14}$ см⁻³), проанализировано распределение энергии разряда по различным каналам.

Третий параграф 2.3 посвящен описанию методов исследования и диагностического оборудования. Структура свечения скользящего поверхностного разряда и его динамика исследовались с помощью цифровых фотоаппаратов и стробируемой камеры с наносекундным затвором. Для визуализации газодинамических возмущений, возникающих при развитии поверхностного разряда, применялось теневое зондирование.

В четвертом параграфе 2.4 указан порядок проведения экспериментов и методика обработки полученных экспериментальных данных.

Третья глава посвящена исследованию интегральных, временных и спектральных характеристик излучения плазмы скользящего разряда в неподвижном воздухе и в потоке воздуха за плоской ударной волной.

В первом параграфе 3.1 исследована пространственная структура свечения разряда в неподвижном воздухе при давлении 15-200 торр. Определены толщина диффузного плазменного слоя, количество каналов на единицу длины, радиусы диффузного и яркого каналов. Толщина диффузного слоя определялась по изображениям интегрального свечения поверхностного разряда, полученным при регистрации в плоскости электродов. Полученная зависимость толщины диффузного слоя от плотности воздуха представлена на рис. 3.

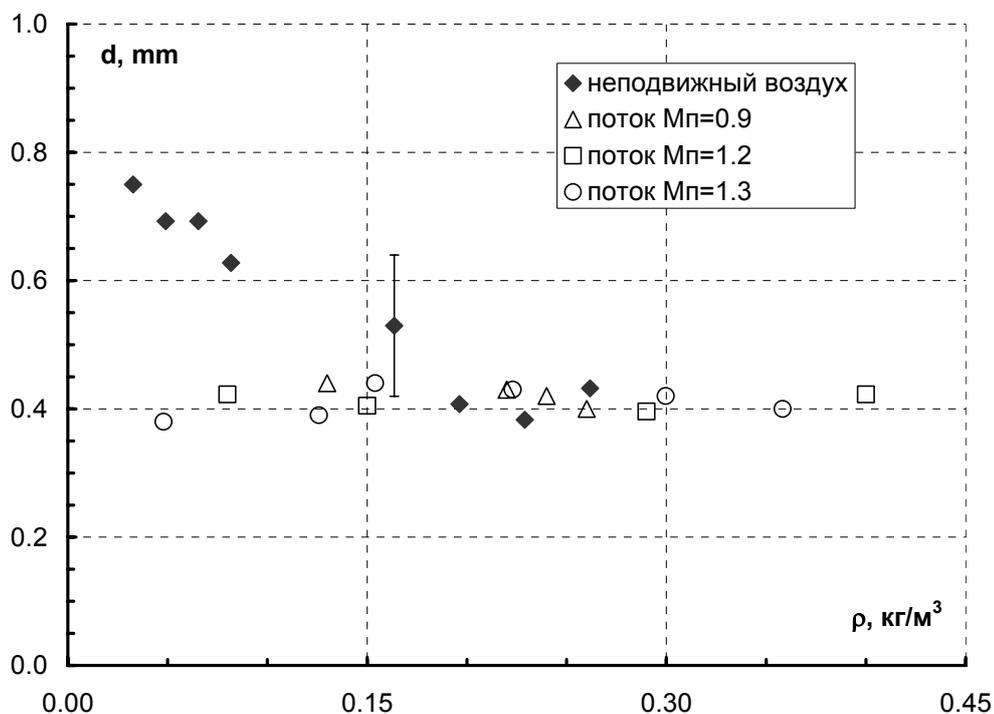


Рис. 3. Зависимость толщины плазменного слоя от плотности воздуха

Из графика видно, что толщина плазменного слоя в неподвижном воздухе уменьшается от 0.8 до 0.4 мм при указанном изменении плотности. Толщина плазменного слоя скользящего поверхностного разряда в других газах зависит от рода газа и также возрастает с понижением давления, составляя 0.1-1 мм [9]. Таким образом, была определена структура и

построена геометрическая модель развития поверхностного скользящего разряда в неподвижном воздухе.

Во втором параграфе 3.2 определена зависимость толщины плазменного слоя в потоке воздуха. В условиях проведенных экспериментов (диапазон плотностей $0.08-0.40 \text{ кг/м}^3$, числа Маха потока $0.9-1.3$) толщина плазменного слоя не зависла от параметров потока и составляла около 0.4 мм (рис. 3), что сравнимо с толщиной пограничного слоя на стенке канала. Таким образом, показано, что при развитии скользящего поверхностного разряда основной энерговклад происходит в области пограничного слоя течения.

В параграфе 3.3 исследовались временные характеристики свечения разряда в неподвижном воздухе давлениях $25-175 \text{ торр}$. Установлено, что длительность свечения диффузного слоя разряда при указанных условиях не превышает 300 нс , свечение ярких каналов может достигать 3.5 мкс . Таким образом, время свечения плазмы разряда мало по сравнению с характерными газодинамическими временами. Это дает возможность использовать свечение импульсного скользящего поверхностного разряда в качестве визуализирующего средства в газодинамическом потоке.

В четвертом параграфе 3.4 проведен спектральный анализ состава излучения плазмы скользящего поверхностного разряда. Одной из характерных особенностей разряда является эффективное возбуждение электронных уровней молекул, на которое при высоких величинах напряженности электрического поля расходуется (наряду с ионизацией) значительная доля поглощаемой в плазме разряда энергии. Спектр излучения плазменного листа в воздухе определяется в основном электронно-колебательными полосами второй положительной системы азота, с присутствием высокоэнергичной ультрафиолетовой части (рис. 4). В спектре излучения также присутствуют линии иона азота (N_2^+), атомарного кислорода, азота, водорода. Это подтверждает реализацию больших значений приведенного электрического поля, когда эффективно

происходят процессы возбуждения электронных степеней свободы, ионизации, диссоциации.

При повышении давления интенсивность линий ультрафиолетовой части снижается, а линий видимой части спектра возрастает.

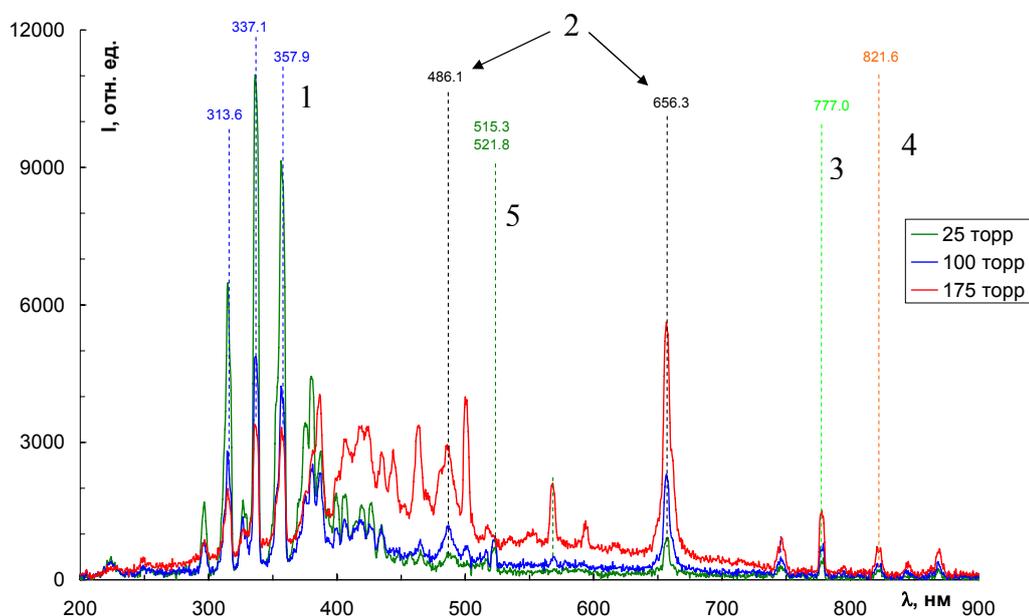


Рис. 4. Основные линии излучения скользящего разряда в воздухе:

- (1) - линии второй положительной системы азота
- (2) - линии атома водорода H_{α} (656.3 нм); H_{β} (486.1 нм)
- (3) - атомарный кислород (777 нм)
- (4) - атомарный азот (821.6 нм)
- (5) - линии меди (материал электродов)

Спектральный состав излучения плазменного листа в потоке за фронтом ударной волны отличается от спектра в неподвижном воздухе присутствием более интенсивных линий длинноволновой части спектра. В этом случае разряд инициируется при высокой температуре (зависящей от числа Маха прошедшей ударной волны), что оказывает влияние на протекание процессов с участием частиц в возбужденных состояниях.

Четвертая глава посвящена исследованию динамики возмущений из области разряда и определению энерговклада в пристеночный слой газа. При инициировании импульсного скользящего поверхностного разряда возникают газодинамические возмущения в виде ударных волн, вызванные

быстрым введением энергии в ограниченную область пространства. Движение ударных волн определяется интенсивностью и распределением энерговложения. Исследование газодинамического воздействия разряда на среду является актуальной задачей, так как динамика движения возмущений позволяет достаточно точно определить долю электрической энергии разряда, переходящую в тепло за время тока разряда.

В первом параграфе 4.1 исследована динамика движения ударных волн от плазменных листов в неподвижном воздухе при давлениях 25-250 торр. Регистрация возмущений проводилась теневым методом.

Скользкий поверхностный разряд развивается в многоканальной и диффузной форме. Теневое зондирование показало, что от каждого канала разряда образуется полуцилиндрическая ударная волна. Ударные волны от соседних каналов взаимодействуют между собой, в результате их интерференции формируется квазиплоский фронт результирующей ударной волны (рис. 5). Так как разряды инициируются на двух противоположных стенках разрядной камеры, то образуются две ударные волны, движущиеся навстречу друг другу от нижнего и верхнего плазменных листов.

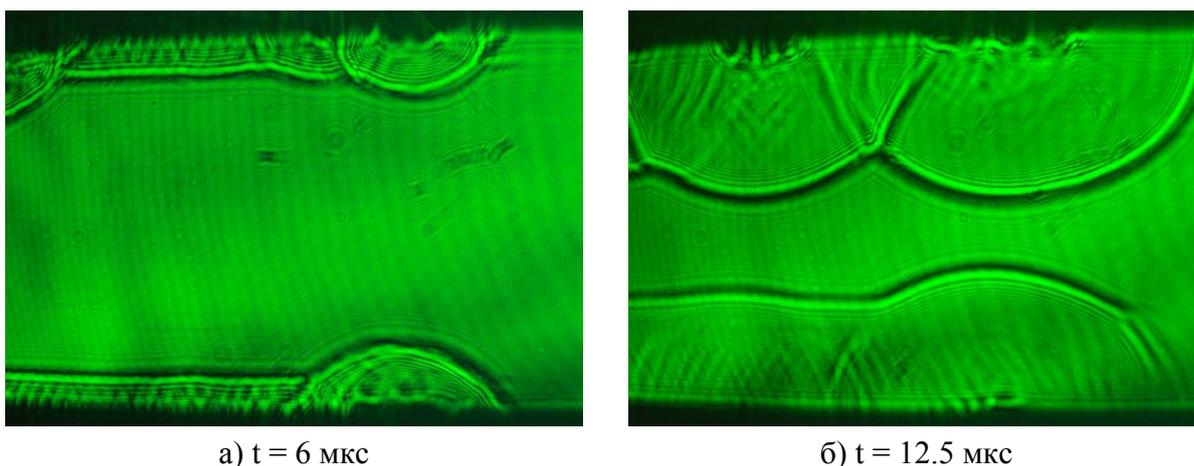


Рис. 5. Теневые изображения ударных волн от плазменных листов в неподвижном воздухе при $p=175$ торр

Обработка и анализ теневых изображений показали, что фронт квазиплоской ударной волны формируется в течении 2-3 мкс и начинает

движение от электродов со скоростью ~ 800 м/с. Затем движение фронта замедляется (в течение 5-6 мкс), и через ~ 10 мкс после разряда волна движется с постоянной скоростью около 450 м/с. Числа Маха ударных волн на стадии установившегося движения $\sim 1.3-1.4$. Далее происходит встречное взаимодействие ударных волн от двух плазменных листов и последующее их затухание. На рис. 6 представлена зависимость усредненной координаты фронта ударной волны от времени после разряда в неподвижном воздухе и в сверхзвуковом потоке с числом Маха 1.5.

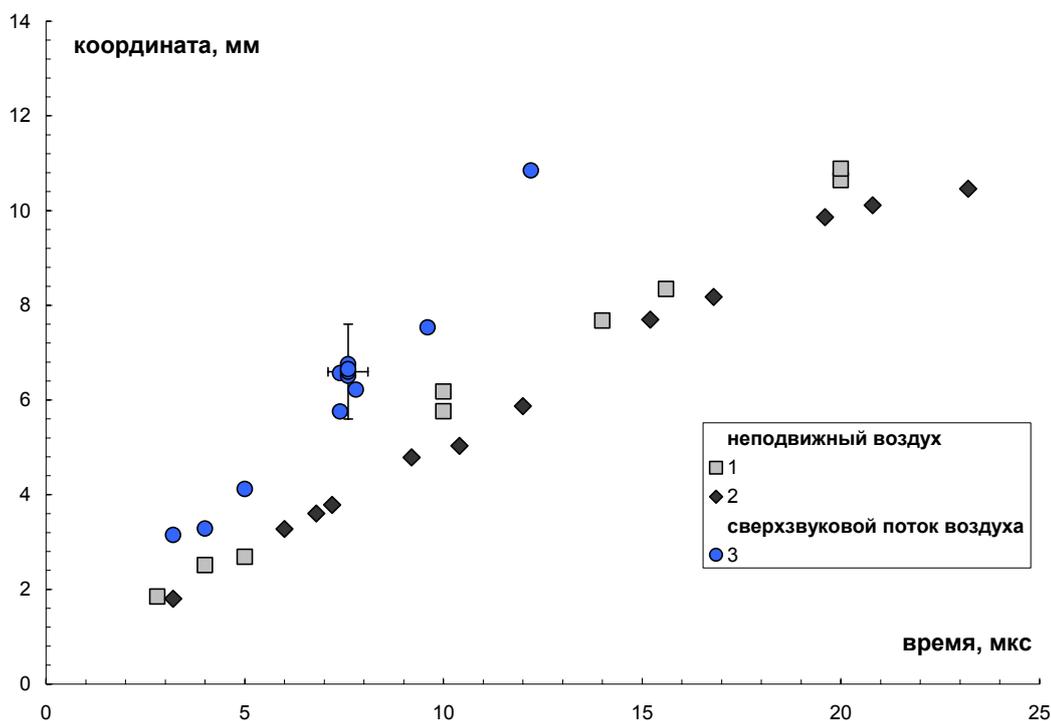


Рис. 6. Зависимость положения фронта ударной волны от времени после инициирования разряда (25 кВ): 1, 2 – в неподвижном воздухе при плотности 1 - 0.04 кг/м³, 2 - 0.42 кг/м³; 3- в сверхзвуковом потоке (плотность 0.09 кг/м³, скорость 950 м/с).

Из полученной экспериментальной зависимости следует, что в неподвижной среде при одинаковом энергокладе скорость движения ударных волн при повышении давления немного уменьшается.

Во втором параграфе 4.2 исследована динамика движения ударных волн от плазменных листов в потоке за ударной волной. Эксперименты проводились в дозвуковых и сверхзвуковых потоках (скорости 300-950 м/с). Установлено, что образование ударных волн от плазменных

листов в потоке воздуха происходит таким же образом, как и в неподвижном газе. Встречное движение ударных волн накладывается на движение в направлении потока.

В потоках за фронтом ударной волны температура и скорость звука выше, чем в неподвижном воздухе. Скорость движения ударных волн в потоках также была выше, чем в неподвижном воздухе (рис. 6). При скорости потока 950 м/с и температуре 1000 К встречное взаимодействие ударных волн от плазменных листов происходило через 13-15 мкс. При этом числа Маха ударных волн в потоке составляли примерно 1.3-1.4, то есть их интенсивность была такой же, как в неподвижном воздухе.

В третьем параграфе 4.3 проведена оценка энергии, трансформирующейся в тепло на стадии энергоподвода (за время разряда) на основе сравнения экспериментально определенной динамики движения ударных волн с численным расчетом.

Численное исследование импульсного поверхностного энерговклада и динамики образующихся возмущений (ударных волн) проводилось Луцким А.Е (ИПМ им. Келдыша). Рассчитывалась газодинамическая картина движения возмущений из области энерговложения.

Численное моделирование в неподвижном воздухе было выполнено в рамках математической модели нестационарных уравнений Эйлера (вязкость и теплопроводность среды не учитывались), в потоке – на основе уравнений Навье-Стокса.

Ввод энергии моделировался в воздухе вложением энергии по 0.36 Дж в два слоя протяженностью 100 мм вблизи двух твердых поверхностей, расположенных на расстоянии 24 мм друг от друга. Рассматривались однородный и каналированный энерговклад по поверхности. В зависимости от давления толщина плазменного слоя и расстояние между каналами задавались в соответствии с экспериментально определенной структурой разряда.

На рис. 7 приведен обобщающий график зависимости доли электрической энергии разряда, трансформирующейся в тепло, от плотности среды. На нем представлены результаты, полученные при инициировании разряда в неподвижном воздухе и в потоках воздуха. Очевидно, эти данные образуют единую зависимость, показывающую, что доля переходящей в тепло энергии разряда растет от 15 до 65% с увеличением плотности в диапазоне от 0.05 до 0.45 кг/м³. Такую зависимость можно объяснить тем, что при низкой плотности (и, соответственно, при высоких значениях приведенного электрического поля) во внутренние степени свободы молекул переходит больше энергии, чем при высоких давлениях. При повышенных давлениях существенная доля энергии скользящего разряда переходит в тепловую энергию на стадии энергоподвода, т.е. за время существенно меньше 1 мкс, что позволяет эффективно применять его для воздействия на поверхностные течения.

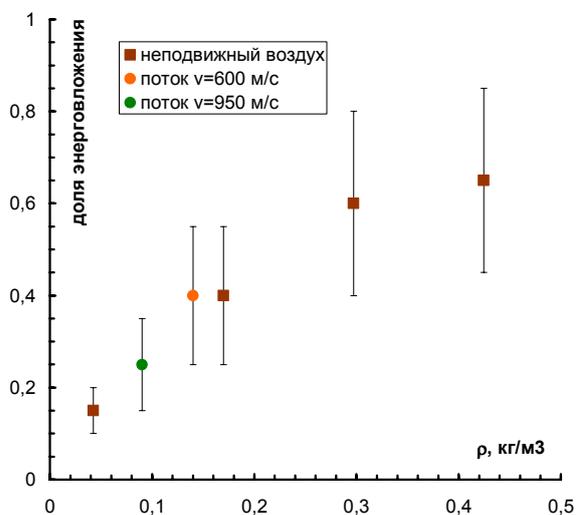


Рис. 7. Доля электрической энергии разряда, переходящая в тепло.

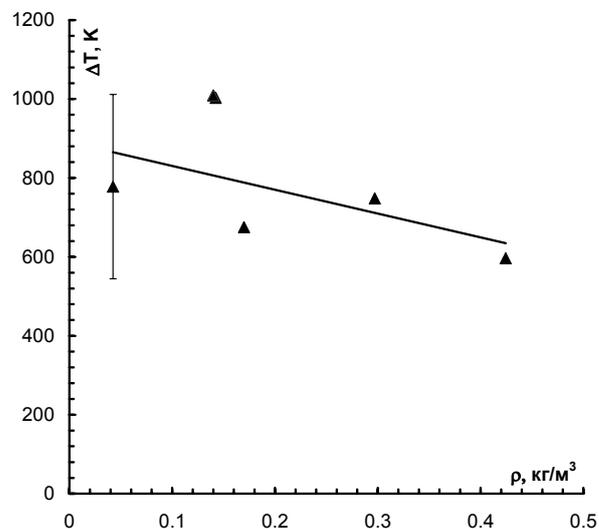


Рис. 8. Нагрев приповерхностного слоя газа за время разряда.

Переход энергии в поступательные степени свободы приводит к нагреву газа в приповерхностной области. Оцененное изменение температуры в приповерхностном слое воздуха приведено на рис. 8. С

увеличением давления эта величина понижается из-за уменьшения удельной энергии, приходящейся на частицу среды.

Нагрев газа в плазменном листе существенно выше экспериментальных и расчетных значений для других типов поверхностных разряда (СВЧ, барьерный). За быстрый нагрев газа может быть ответственен механизм, связанный с эффективным образованием электронно-возбужденных состояний молекул азота с последующим их тушением при больших значениях приведенного электрического поля. В кинетике быстрого нагрева газа значительную роль также играют также реакции с участием атомов кислорода. Классические теории, описывающие кинетику нагрева газа, не в состоянии объяснить механизмы такого быстрого нагрева. Таким образом, проведенные исследования могут послужить основой для построения усовершенствованных моделей и поиску новых механизмов, объясняющих быстрый переход энергии внутренних степеней свободы молекулы в поступательные.

В четвертом параграфе 4.4 экспериментально исследована динамика давления на стенке канала ударной трубы при инициировании импульсных поверхностных скользящих разрядов в сверхзвуковых потоках (числа Маха потока 1.1-1.6). Зарегистрированы периодические пульсации давления на стенке канала ударной трубы. Показано, что динамика давления соответствует движению ударных волн из зоны разряда и сверхзвуковому течению возбужденного разрядом газа вблизи стенки канала. Повышение давления на стенке канала ударной трубы при этом составило 6-18% по сравнению с давлением в невозмущенном потоке.

В пятой главе описываются эксперименты по инициированию разряда в различных областях пограничного слоя. Показано, что свечение скользящего поверхностного разряда зависит от структуры течения в пограничном слое, и на этой основе предложен новый метод визуализации. С помощью этого метода зарегистрирован ламинарно-турбулентный переход в пограничном слое течения воздуха в ударной трубе.

Первый параграф 5.1 посвящен описанию экспериментов по регистрации свечения разряда в различных областях потока. Эксперименты проводились в потоках за ударной волной с числами Маха 1.7-4.2 (скорости потока до 1200 м/с) в диапазоне плотностей 0.04-0.45 кг/м³. В экспериментах обнаружено, что разряд сохраняет каналированную структуру в потоке (ср. рис. 9 а и б), но характер свечения разряда и его структура различаются в различных областях течения.

В условиях экспериментов длина однородного спутного течения за фронтом ударной волны (закрывающегося контактной поверхностью) составляла около 30 см. Протяженность разряда (10 см) меньше длины спутного потока, это дает возможность инициировать разряд в различных областях течения. Очевидно, развитие импульсного разряда возмущает структуру потока. Однако время свечения диффузного слоя разряда (300 нс) много меньше характерных газодинамических времен, и за время регистрации интегрального свечения разряда структура течения не изменяется. Распределение и интенсивность свечения дают информацию о мгновенной структуре течения в пограничном слое. Таким образом, свечение разряда можно использовать в качестве средства для визуализации структуры приповерхностного течения.

Анализ полученных изображений интегрального свечения показал, что непосредственно за фронтом ударной волны, свечение разряда достаточно однородное и гладкое, без видимых разрывов свечения (рис. 9 б). По мере удаления фронта ударной волны и приближения к контактной поверхности характер свечения разряда менялся (рис. 9 в, г). Оно становилось неоднородным, рыхлым, проявлялись отдельные криволинейные каналы, наблюдались завихрения свечения (в отличие от свечения в неподвижном воздухе и в потоке непосредственно за фронтом ударной волны). Вблизи контактной поверхности свечение разряда носило сугубо неоднородный характер (рис. 9 г).

Во втором параграфе 5.2 представлены результаты визуализации ламинарно-турбулентного перехода свечением скользящего разряда.

Анализ свечения разряда в потоке убедительно показал, что характер свечения разряда менялся с изменением структуры пограничного слоя – от ламинарного за фронтом ударной волны к турбулентному ближе к контактной поверхности.

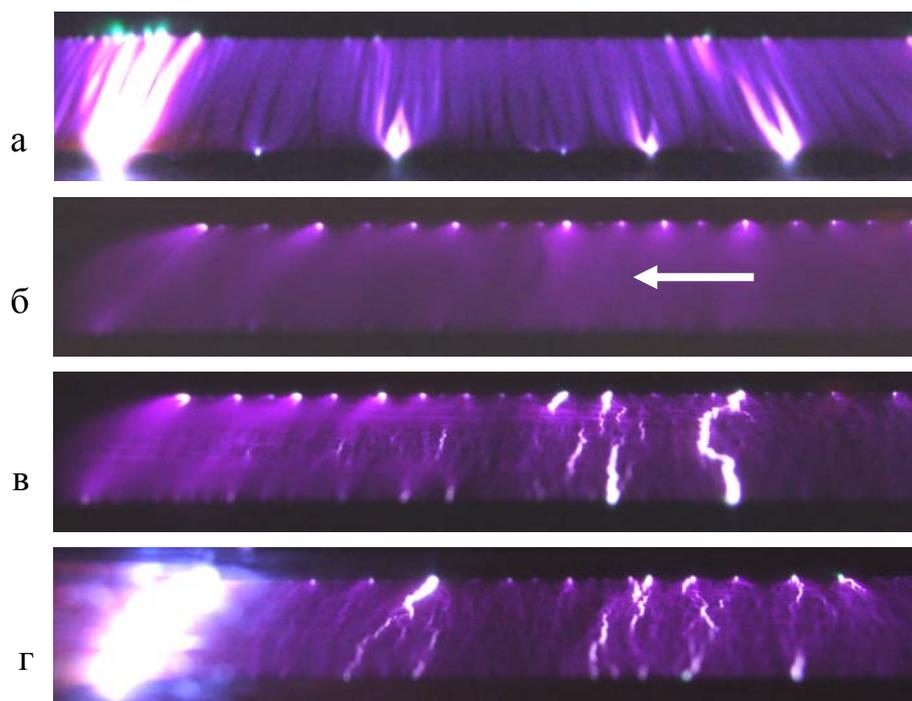


Рис. 9. Свечение плазмы разряда в неподвижном воздухе (а) при плотности 0.11 кг/м^3 и трансзвуковом потоке (б-г) при скорости 570 м/с и плотности 0.20 кг/м^3 . Стрелкой показано направление потока.

Аналогичная картина изменения свечения наблюдалась как в трансзвуковых, так и в сверхзвуковых потоках. По сериям экспериментальных изображений были определены расстояния ламинарно-турбулентного перехода в пограничном слое.

Положение области перехода в потоке за ударной волной можно характеризовать критическим числом Рейнольдса, определяемым как

$$\text{Re}_{кр} = U_{\infty} \cdot \rho_{\infty} \cdot x_{кр} / \mu_{\infty}$$

где U_∞ , ρ_∞ , μ_∞ – скорость, плотность и вязкость потока соответственно, $x_{кр}$ – расстояние от фронта ударной волны, на котором происходит переход.

На рисунке 10 представлены экспериментально определенные значения приведенной длины ламинарно-турбулентного перехода $L^* = x_{кр} [м] \cdot p_0 [атм]$ (p_0 – начальное давление в камере низкого давления ударной трубы) в зависимости от числа Маха ударной волны и соответствующая зависимость [10].

Хорошее соответствие данным [10] показывает, что предложенный метод визуализации пограничного слоя свечением поверхностного скользящего разряда наносекундной длительности позволяет достаточно точно определять положение ламинарно-турбулентного перехода в пограничном слое. Возможность организации данного типа разряда на искривленной поверхности позволяет применять его для визуализации некоторых трехмерных приповерхностных течений.

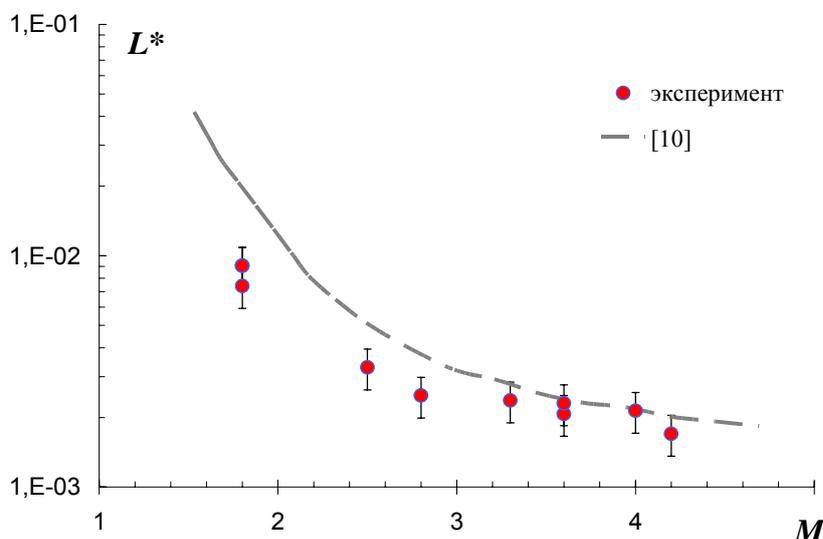


Рис. 10. Зависимость приведенного расстояния ламинарно-турбулентного перехода от числа Маха ударной волны.

В третьем параграфе 5.3 проанализирована динамика движения ударных волн, возникающих при иницировании разряда в ламинарном и турбулентном пограничном слое.

Анализ полученных теневых изображений поля течения показал, что динамика фронтов ударных волн практически не зависит от типа пограничного слоя. Турбулизация пограничного слоя в поперечном потоке приводит к потере диффузного характера разряда, формированию криволинейных каналов за счет возникновения неоднородностей плотности и коэффициента ионизации. Заметного влияния типа пограничного слоя на величину и плотность энерговклада в поток в исследованном диапазоне параметров не обнаружено. Адекватность модели мгновенного теплоподвода для анализа воздействия данного разряда на поток подтверждается при учете динамики ударных волн их области разряда для двух типов пограничного слоя.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы.

3 Основные результаты и выводы

1. Сильноточный поверхностный распределенный скользящий наносекундный разряд (плазменный лист) инициирован в дозвуковом и сверхзвуковом поперечном потоке в ударной трубе. Впервые экспериментально определены пространственно-временные и спектральные характеристики разряда в газодинамическом потоке в широком диапазоне экспериментальных условий (давления 15-400 торр, скорости потоков до 1600 м/с).
2. Установлена зависимость толщины плазменного слоя от давления в неподвижном воздухе: уменьшение от 0.8 до 0.4 мм при давлениях 15-250 торр. Установлено постоянство толщины плазменного слоя (0.4 мм) в потоках за ударной волной при исследованных скоростях и плотностях потоков.

3. Впервые систематически исследована динамика ударных волн из области импульсного поверхностного скользящего распределенного разряда в неподвижном воздухе и в газодинамическом потоке при давлениях 15-400 торр и скоростях до 1600 м/с. На основе анализа динамики ударных волн из области разряда показано, что данный тип разряда обеспечивает высокоэнергетичное воздействие как на ламинарный, так и на турбулентный пограничный слой. На основе сравнения экспериментальной и расчетной динамики течения установлено, что доля энергии разряда, трансформирующаяся в тепло за время энергоподвода (~ 200 нс), увеличивается от 15% до 65% с увеличением плотности среды от 0.05 до 0.45 кг/м³. При этом температура приповерхностного слоя газа возрастает на 600-1000 К.
4. Установлено, что инициирование поверхностных разрядов приводит к повышению среднего давления на стенке канала в потоке за ударной волной на 6-18% (при числах Маха потока 1.1-1.6 и плотностях 0.06-0.20 кг/м³). Наблюдались периодические пульсации давления, вызванные движением ударных волн из области разряда.
5. Показано, что турбулизация пограничного слоя приводит к потере однородного характера свечения разряда, формированию криволинейных каналов за счет возникновения неоднородностей плотности и коэффициента ионизации.
6. Предложен новый метод визуализации структуры приповерхностного течения газа свечением поверхностного скользящего распределенного разряда наносекундной длительности, на основе которого определено положение ламинарно-турбулентного перехода в пограничном слое при различных скоростях и плотностях потока.

4 Цитируемая литература

1. Черный Г.Г. Эффект энерговклада в областях электрического разряда около тел в потоке. Восьмой Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике. Август 23-29, 2001, Пермь. С. 594.

2. Георгиевский П.Ю., Левин В.А. Управление обтеканием различных тел с помощью локализованного подвода энергии в сверхзвуковой набегающий поток // Известия РАН. МЖГ. 2003. №5. С.152-165.
3. Bletzinger P., Ganguly B.N., Van Wie D., Garscadden A. Plasmas in High Speed Aerodynamics. J. Phys. D: Appl. Phys. 38 (2005). P. R33-R57.
4. Fomin V., Tretyakov P., Taran J.-P. Flow control using various plasma and aerodynamic approaches (Short review). // Aerospace Science and Technology, 8 (2004), pp. 411-421.
5. Андреев С.И., Знаменская И.А., Степанец И.В. Ударный слой в воздухе, возбужденном объемным разрядом. // Химическая физика. 1993, Т. 12, № 3. С. 392-393.
6. Алферов В.И. Исследование структуры электрического разряда большой мощности в высокоскоростном потоке воздуха. Известия РАН, Сер. МЖГ. 2004, № 6. С. 163-175.
7. Третьяков П.К., Яковлев В.И. Структура волны в сверхзвуковом потоке с лазерным энергоподводом. // ДАН. 1999. Т. 365. N 1. С. 58-60.
8. Александров А.Ф., Шибков В.М., Ершов А.П., Шибкова Л.В. Свободно локализованный сверхвысокочастотный разряд в сверхзвуковом потоке газа // Физика плазмы, 2005. т.31, №9, с.857-864.
9. Энциклопедия низкотемпературной плазмы: В 4-х тт. Т. 2. Генерация плазмы и газовые разряды; Диагностика и метрология плазменных процессов. /Под ред. В.Е. Фортова. М., Наука, 2000.
10. Баженова Т.В., Гвоздева Л.Г. Нестационарные взаимодействия ударных волн. М., Наука, 1977. 274 с.

5 Публикации

Результаты работы представлены в следующих основных публикациях:

1. Знаменская И.А., Латфуллин Д. Ф., Мурсенкова И.В., Сысоев Н.Н. Экспериментальное исследование взаимодействия распадающейся плазмы импульсного объемного разряда с ударным слоем. Вестник МГУ, Сер. 3. Физика. Астрономия. 2006. № 3. С. 57-61.
2. Знаменская И.А., Латфуллин Д. Ф., Луцкий А. Е., Мурсенкова И.В., Сысоев Н.Н. Развитие газодинамических возмущений из зоны распределенного поверхностного скользящего разряда. ЖТФ, 2007. Т. 77. Вып. 5. С. 10-18.
3. Знаменская И.А., Латфуллин Д.Ф., Мурсенкова И.В. Ламинарно-турбулентный переход в сверхзвуковом пограничном слое при

- инициировании импульсного поверхностного разряда. Письма в ЖТФ, 2008. Т. 34. Вып. 15. С. 75-80.
4. Латфуллин Д.Ф., Мурсенкова И.В., Сысоев Н.Н. Динамика давления в сверхзвуковом потоке при инициировании импульсных скользящих поверхностных разрядов. Вестник МГУ, Сер. 3. Физика. Астрономия. 2009. №3.
 5. Знаменская И.А., Латфуллин Д.Ф., Мурсенкова И.В. Исследование поверхностных разрядов (плазменных листов) в ударной трубе. Материалы Всероссийской научной конференции по физике низкотемпературной плазмы (ФНТП-2004) (Петрозаводск, 2004). Петрозаводск 2004. С. 172-174.
 6. Знаменская И.А., Латфуллин Д.Ф., Луцкий А.Е., Мурсенкова И.В. Исследование возмущений в зоне поверхностного наносекундного разряда теньвым методом. Труды VIII Международной научно-технической конференции "Оптические методы исследования потоков" (Москва, 2005). М., 2005. С. 28-32.
 7. Latfullin D.F., Lutsky A.E., Mursenkova I.V., Sysoev N.N., Znamenskaya I.A. Nanosecond Surface Energy Release Analysis Based on Shock Waves Investigations. Proceedings of 16th International Symposium on Transport Phenomena (ISTP-16) (Prague, Czech Republic, 2005). CD Rom Proceedings ISTP /2005.
 8. Знаменская И.А., Латфуллин Д.Ф., Мурсенкова И.В. Анализ возмущений при импульсном поверхностном энерговыделении в газодинамический поток. Тез. докл. XIII Школы-семинара «Современные проблемы аэрогидродинамики» (Сочи, 2005). М., 2005. С. 41-42.
 9. Знаменская И.А., Латфуллин Д.Ф., Мурсенкова И.В., Орлов Д.М. Распределенный поверхностный разряд в сверхзвуковом потоке воздуха. Тез. докл. XXXIII Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС (Звенигород, 2006). М., 2006. С. 289.
 10. Знаменская И.А., Латфуллин Д.Ф., Мурсенкова И.В. Экспериментальное исследование распределенного скользящего разряда в сверхзвуковом потоке. Материалы VI Международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ-2006) (Санкт-Петербург, 2006). М., 2006. С. 191-192.
 11. Latfullin D.F., Lutsky A.E., Mursenkova I.V., Orlov D.M., Sysoev N.N., Znamenskaya I.A. Use of Shock Waves Shadowgraphy and Schlieren for Surface Energy Release Analysis. Proceedings of 12th International Symposium on Flow Visualization (ISFV-12) (Göttingen, Germany, 2006). CD Rom Proceedings ISBN 0-9533991-8-4, ISFV-12-3.3.

12. Znamenskaya I.A., Kostyukov S.A., Latfullin D.F., Mursenkova I.V. Nanosecond surface discharge in supersonic air flow. 13th International Conference on Methods of Aerophysical Research (ICMAR-2007) (Novosibirsk, Russia, 2007). Proceedings, Part Y. P. 244-249.
13. Знаменская И.А., Латфуллин Д.Ф., Мурсенкова И.В. Экспериментальное исследование пограничного слоя в сверхзвуковом потоке воздуха при инициировании плазменного листа. Тез. докл. VI и VII Международной школы-семинара "Модели и методы аэродинамики" (Евпатория, Украина, 2007). М., 2007. С. 164-166.
14. Костюков С.А., Латфуллин Д.Ф., Мурсенкова И.В., Сысоев Н.Н. Оптические исследования разряда, скользящего по поверхности диэлектрика (плазменного листа). Труды IX Международной научно-технической конференции «Оптические методы исследования потоков» (Москва, 2007); М., 2007. С. 204-207.
15. D.F. Latfullin, I.V. Mursenkova, I.A. Znamenskaya, T.V. Bazhenova, A.E. Lutsky. Shock Waves Dynamics Investigations for Surface Discharge Energy Analysis. Proceedings of the 26th International Symposium on Shock Waves (ISSW-26) (Gettingen, Germany, 2007). CD Rom Proceedings ISL/2008.
16. Знаменская И.А., Коротеев Д.А., Костюков С.А., Кули-заде Т.А., Латфуллин Д.Ф., Мурсенкова И.В., Орлов Д.М., Сысоев Н.Н. Исследование свечения плазмы наносекундных разрядов с высоким временным разрешением. Тез. докл. XXXV Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС (Звенигород, 2008). М., 2008. С. 339.
17. Латфуллин Д.Ф., Мурсенкова И.В., Сысоев Н.Н. Визуализация ламинарно-турбулентного перехода в сверхзвуковом пограничном слое импульсным поверхностным скользящим разрядом. Сб. тез. докл. Научной конференции «Ломоносовские чтения-2008. Секция Физики». М., 2008. С. 215-218.
18. Знаменская И.А., Латфуллин Д.Ф., Луцкий А.Е., Мурсенкова И.В. Влияние условий инициирования поверхностного скользящего разряда на уровень мгновенного энерговыделения. Материалы VII Международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ-2008) (Алушта, Украина, 2008). М., 2008. С. 207-210.
19. Latfullin D.F., Mursenkova I.V. and Znamenskaya I.A. Supersonic Boundary Layer Investigation using Surface Nanosecond Discharge. Proceedings of 13th International Symposium on Flow Visualization (ISFV-13) and 12th French Congress on Visualization in Fluid Mechanics (FLUVISU-12) (Nice, France, 2008). CD Rom Proceedings Editors: JP Prenel – Y Bailly, 146-080414.pdf.