

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

**ЛЯО ЮЙГАНЬ**

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НАНОСЕКУНДНОГО ПОВЕРХНОСТНОГО  
СКОЛЬЗЯЩЕГО РАЗРЯДА С ЗОНОЙ ОТРЫВА В СВЕРХЗВУКОВОМ  
ПОТОКЕ**

Специальность 01.04.17 – химическая физика, горение и взрыв, физика  
экстремальных состояний вещества

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2022

Работа выполнена на кафедре молекулярных процессов и экстремальных состояний вещества физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

- Научный руководитель** – **Мурсенкова Ирина Владимировна**, кандидат физико-математических наук, доцент
- Официальные оппоненты** – **Двинин Сергей Александрович**, доктор физико-математических наук, доцент, МГУ имени М.В. Ломоносова, физический факультет, доцент кафедры физической электроники
- Скорнякова Надежда Михайловна**, доктор технических наук, доцент, Национальный исследовательский университет «МЭИ», заведующий кафедрой физики
- Ревизников Дмитрий Леонидович**, доктор физико-математических наук, профессор, Московский авиационный институт (НИУ), профессор кафедры вычислительной математики и программирования

Защита диссертации состоится « 23 » июня 2022 г. в 17:00 часов на заседании диссертационного совета МГУ.01.01 Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу: г. Москва, Ленинские горы, д.1 стр. 2, физический факультет, ауд. \_\_\_\_

E-mail: [malyshkinaia@my.msu.ru](mailto:malyshkinaia@my.msu.ru)

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»: <https://istina.msu.ru/dissertations/459126687/>

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » мая 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат физико-математических наук

И.А. Малышкина

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В задачах плазменной аэродинамики управление высокоскоростными потоками воздуха может осуществляться с помощью электрических разрядов, которые могут служить источником энергоподвода и создавать контролируемые возмущения. Газоразрядная плазма поверхностных разрядов может применяться для воздействия на приповерхностные течения, на пограничный слой, локальные скачки уплотнения. Взаимодействие сверхзвуковых потоков и ударных волн с плазмой представляет также фундаментальный интерес с точки зрения физики газового разряда и кинетики плазмы при больших скоростях течения. При разработке способов управления потоками с помощью газоразрядной плазмы необходимо учитывать взаимное влияние высокоскоростного газового потока и плазменной области. Поверхностные разряды наносекундной длительности дают возможность отдельно определить тепловое и плазменное воздействие разряда на течение в целом и на пограничный слой. Актуальным является также описание режимов развития поверхностных разрядов в высокоскоростных потоках, определение параметров генерируемой плазмы, величины тепловыделения и оценка влияния разряда на локальные характеристики течения и на общую ударно-волновую структуру.

В работе экспериментально решалась задача о взаимодействии наносекундного поверхностного скользящего разряда со сверхзвуковыми потоками воздуха, обтекающими тонкий клин или малое прямоугольное препятствие в канале ударной трубы и содержащими зоны отрыва. Численно решалась задача о движении ударных волн из области импульсного поверхностного энерговклада в неоднородных сверхзвуковых потоках в канале.

**Целью диссертационной работы** было определение параметров поверхностного скользящего разряда наносекундной длительности при развитии в сверхзвуковых потоках с вихревой зоной и зоной отрыва, изучение динамики ударных волн после разряда, а также численные расчеты течений для определения величины локального энерговклада.

Для этого были поставлены следующие **задачи**:

1. Регистрация пространственно-временных характеристик свечения, спектров и тока наносекундного поверхностного скользящего разрядов в потоках с вихревой зоной и зоной отрыва при различных условиях в потоке;
2. Высокоскоростная теневая визуализация ударно-волнового течения в канале и анализ динамики ударных волн после разряда.
3. Численное моделирование сверхзвуковых потоков и динамики распространения ударных волн из области энерговклада в неоднородном сверхзвуковом потоке в канале.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

1. Впервые экспериментально получены пространственно-временные характеристики излучения, токовые и спектральные характеристики наносекундного поверхностного скользящего разряда в сверхзвуковых неоднородных потоках с вихревой зоной и зоной отрыва. Показано, что режим развития разряда связан с параметрами локальной зоны пониженной плотности.

2. Впервые экспериментально получены последовательности теневых изображений ударных волн, индуцированных наносекундным поверхностным скользящим разрядом в неоднородных сверхзвуковых потоках, с микросекундным интервалом между кадрами. На основе цифровой обработки изображений проанализирована динамика ударных волн, индуцированных разрядом, и их влияние на ударно-волновую структуру высокоскоростного течения.

3. Проведено численное моделирование локального поверхностного энерговыклада в неоднородный сверхзвуковой поток в канале на основе нестационарных двумерных уравнений Навье-Стокса, в результате которого показана зависимость динамики индуцированных ударных волн от пространственно-временных характеристик энерговыклада и параметров течения. На основе сопоставления экспериментальных и численных результатов определена величина локального энерговыклада в сверхзвуковых неоднородных потоках с вихревой зоной и зоной отрыва.

### **Научная и практическая ценность работы**

Получены и обработаны экспериментальные данные о режимах развития наносекундного поверхностного скользящего разряда в сверхзвуковых потоках при обтекании клина и препятствия: пространственно-временному распределению излучения, токовым и спектральным характеристикам.

Получены и обработаны высокоскоростные теневые изображения течений, в которых ударные волны от канала разряда взаимодействуют со сверхзвуковым потоком, с вихревой зоной и зоной отрыва.

Проведено численное моделирование сверхзвукового течения в канале с локальным энергоподводом на основе нестационарных двумерных уравнений Навье-Стокса.

С практической точки зрения эта работа демонстрирует потенциал применения поверхностных скользящих разрядов в качестве плазменных актуаторов для воздействия на неоднородные сверхзвуковые потоки. Полученные результаты могут быть использованы для управления течениями, например, вблизи поверхности сверхзвуковых самолетов, в сверхзвуковых воздухозаборниках и двигателях, которые могут содержать наклонные ударные волны.

## **Достоверность и обоснованность результатов**

Достоверность полученных в диссертационной работе результатов подтверждается значительным объемом и высокой степенью повторяемости экспериментальных результатов при идентичных условиях. Моделирование основано на научно обоснованных физических моделях. Результаты, изложенные в диссертационной работе, многократно докладывались на всероссийских и международных конференциях и опубликованы в высокорейтинговых научных журналах. Полученные результаты не противоречат результатам работ других исследовательских коллективов.

## **Положения, выносимые на защиту**

1. Результаты исследования пространственно-временного распределения излучения наносекундного поверхностного скользящего разряда на основе регистрации с наносекундным разрешением, показывающие локализацию разрядных каналов в области низкой плотности в вихревой зоне или зоне отрыва в сверхзвуковых потоках с числами Маха 1.15-1.68, плотностью 0.01-0.45 кг/м<sup>3</sup>.
2. Экспериментальные зависимости положения разрядных каналов наносекундного поверхностного скользящего разряда от параметров локальных областей низкой плотности в вихревой зоне за клином, обтекаемым сверхзвуковыми потоками воздуха с числами Маха 1.15 -1.37.
3. Экспериментальные зависимости положения и формы разрядного канала наносекундного поверхностного скользящего разряда от параметров области низкой плотности и зоны отрыва, образованной при взаимодействии наклонной ударной волны с пограничным слоем, в сверхзвуковых потоках воздуха с числами Маха 1.18-1.68 при плотности 0.02-0.45 кг/м<sup>3</sup>, а также временные зависимости интенсивности свечения разрядного канала.
4. Результаты высокоскоростного теневого исследования ударно-волновых течений, развивающихся при взаимодействии ударных волн, индуцированных наносекундным поверхностным скользящим разрядом, с высокоскоростными потоками, показывающие продолжительность воздействия на течения более 100 мкс.
5. Экспериментальные временные зависимости вертикальной координаты фронта генерируемых разрядом полуцилиндрических ударных волн в сверхзвуковых потоках с вихревой зоной и зоной отрыва.
6. Результаты численного моделирования неоднородных сверхзвуковых потоков воздуха в канале с обтекаемыми препятствиями после локального поверхностного энерговыклада, показывающие зависимость динамики генерируемых ударных волн от удельной энергии, пространственных параметров объема энерговыклада и временных условий.

### **Апробация работы**

Основные результаты диссертации были представлены на международных и российских конференциях и семинарах:

1. The 19th International Symposium on Flow Visualization, Шанхай, Китай, 2021.
2. XLIX Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС, Москва, Россия, Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС (Звенигород, Россия, 2022, 2021, 2020, 2016)
3. Ломоносовские чтения (Москва, Россия, 2022).
4. Международная научно-техническая конференция «Оптические методы исследования потоков (ОМИП)», Москва, Россия, 2021, 2019
5. Международное Совещание по Магнитоплазменной Аэродинамике, Москва, Россия, 2022, 2020.
6. XIX Всероссийская школа-семинар «Современные проблемы аэрогидродинамики», Сочи, "Буревестник", Россия, 2019.
7. 31 International Symposium on Shock Waves (ISSW31), Нагоя, Япония, 2017.
8. XXIV Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Ломоносов – 2017", Россия, 2017.
9. Семинар "Получение, исследование и применение низкотемпературной плазмы" имени профессора Л.С. Полака, Россия, Москва, ИНХС РАН им. А.В. Топчиева, 2022

### **Публикации**

По результатам работы опубликовано 7 статей в реферируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus, 5 статей в трудах всероссийских и международных конференций и 9 тезисов докладов на всероссийских и международных конференциях (всего 22 печатных работ). Список работ приведен в конце автореферата.

### **Личный вклад автора**

Все результаты экспериментальных исследований получены либо лично автором, либо при его непосредственном участии. Также лично автором проведена обработка экспериментального материала, проанализированы полученные результаты и проведены численные расчеты сверхзвуковых течений в канале.

### **Структура и содержание работы**

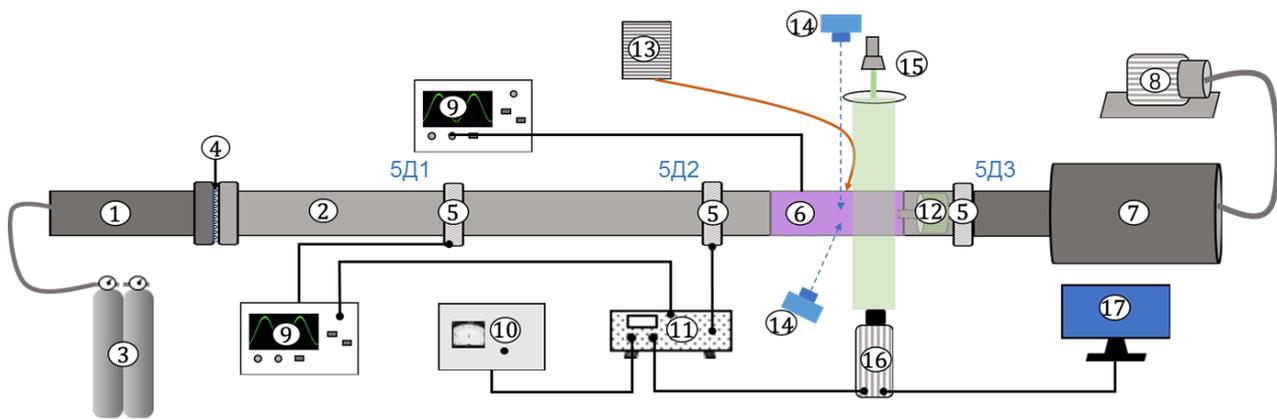
Диссертация состоит из Введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы. Объем диссертации составляет 145 страниц. В работе содержится 119 рисунков. Список использованных источников содержит 92 наименования.

## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

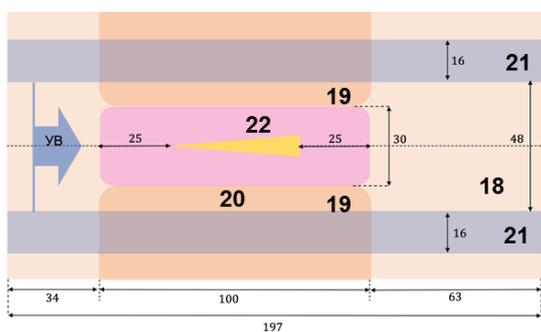
**Во Введении** обоснована актуальность и научная новизна исследования, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, выносимые на защиту положения, определена практическая значимость полученных результатов.

**В первой главе** приведен обзор работ по исследованию газовых разрядов разного типа в потоках воздуха и механизмов воздействия на потоки. В настоящее время плазменное управление потоками представляется вполне осуществимым, особенно для локальных приложений, где энергозатраты в среду может быть невысоким. Плазменные актуаторы – преимущественно поверхностные разряды – исследуются на протяжении последних десятилетий для определения направленного воздействия на структуру течения около обтекаемой поверхности, на пограничный слой, положение скачков уплотнения и зон отрыва, поверхностное трение, динамические нагрузки и т.п. Разряды наносекундной длительности, обеспечивая быстроту воздействия, служат источником ударных волн, движение которых может значительно влиять на высокоскоростной поток. Режимы развития поверхностных разрядов наносекундной длительности в неоднородных сверхзвуковых потоках исследованы на сегодняшний день недостаточно полно. Изучение динамики ударных волн, инициированных наносекундными разрядами в потоках с переменными параметрами, дает возможность определить влияние разряда на течение в целом и на его локальные характеристики, и представляет значительный интерес для фундаментальных и прикладных исследований.

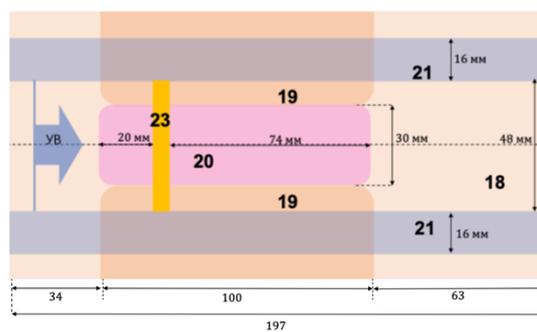
**Во второй главе** описывается экспериментальная установка и диагностическое оборудование. Эксперименты проводились в ударной трубе с разрядной камерой (рис. 1), которая состоит из камеры низкого давления и камеры высокого давления, разделенных диафрагменной секцией. Внутреннее сечение камеры низкого давления длиной 297 см представляет собой прямоугольник размером 24×48 мм<sup>2</sup>. В камеру низкого давления между пьезоэлектрическими датчиками давления 5Д2 и 5Д3 встроена разрядная камера без изменения внутреннего сечения. Боковые стенки разрядной камеры длиной 17 см сделаны из кварцевого стекла типа КУ (полоса пропускания 200-2800 нм); через них осуществлялась оптическая диагностика. В конце камеры низкого давления находится гасящий бак для ослабления отраженных ударных волн. Форвакуумный насос создает необходимое значение начального давления воздуха; толкающим газом является гелий. После раскрытия диафрагмы формируется плоская ударная волна и спутный поток с однородными параметрами за ней. Скорость ударных волн измерялась базовым методом по сигналам датчиков давления 5Д1 и 5Д2, подключённых к осциллографу Tektronix TPS 2014; расстояние между датчиками было 103 см. Система синхронизации процессов от сигналов пьезоэлектрических датчиков давления в канале ударной трубы позволяла инициировать разряд в заданный момент времени.



а



б



в

Рис. 1. а) Схема экспериментальной установки: 1 – камера высокого давления, 2 – камера низкого давления, 3 – баллоны с гелием, 4 – диафрагма, 5 – пьезоэлектрические датчики давления (5Д1-5Д3), 6 – разрядная камера, 7 – гасящий бак, 8 – насос, 9 – осциллограф, 10 – блок запуска разряда, 11 – генератор импульсов, 12 – шунт, 13 – спектрометр, 14 – фотокамера/электронно-оптическая камера, 15 – оптическая система теневого зондирования, 16 – высокоскоростная видеокамера, 17 – ПК. Схема расположения в разрядной камере клина (б) и прямоугольного препятствия (в): 18 – диэлектрик; 19 – медные электроды разряда; 20 – область разряда; 21 – кварцевые стекла; 22 – клин; 23 – препятствие.

Эксперименты по исследованию поверхностных скользящих разрядов (плазменных листов) и генерируемых ими ударных волн проводились в сверхзвуковых потоках за фронтом плоских ударных волн с числами Маха 2.30-5.20 (числа Маха потоков 1.15-1.68 при плотности 0,01-0,45 кг/м<sup>3</sup>). Число Рейнольдса потока, оцененное по размеру канала ударной трубы, составляло  $(1.0-2.2) \times 10^5$ . Толщина ламинарного пограничного слоя на стенках канала не превышала 1 мм.

Были проведены исследования двух типов течений с инициированием поверхностного скользящего разряда:

1) сверхзвукового обтекания тонкого клина, расположенного под нулевым углом атаки к набегающему потоку (рис. 2 а); инициировались поверхностные скользящие разряды на верхней и нижней стенках разрядной камеры. Клин длиной 49 мм, шириной 8 мм, с углом раствора  $\sim 9^\circ$ , изготовленный из диэлектрика (капролона), располагался симметрично в разрядной области (см. рис. 1 б).

2) сверхзвукового обтекания малого препятствия на нижней стенке с формированием наклонной ударной волны за препятствием (рис. 2 а); инициировался поверхностный скользящий разряд на верхней стенке разрядной камеры. Препятствие из диэлектрика (капролона) в виде прямоугольного параллелепипеда длиной 48 мм, шириной 6 мм и высотой 2 мм располагалось в разрядной области на расстоянии 20-30 мм от начала электродов (см. рис. 1 в).

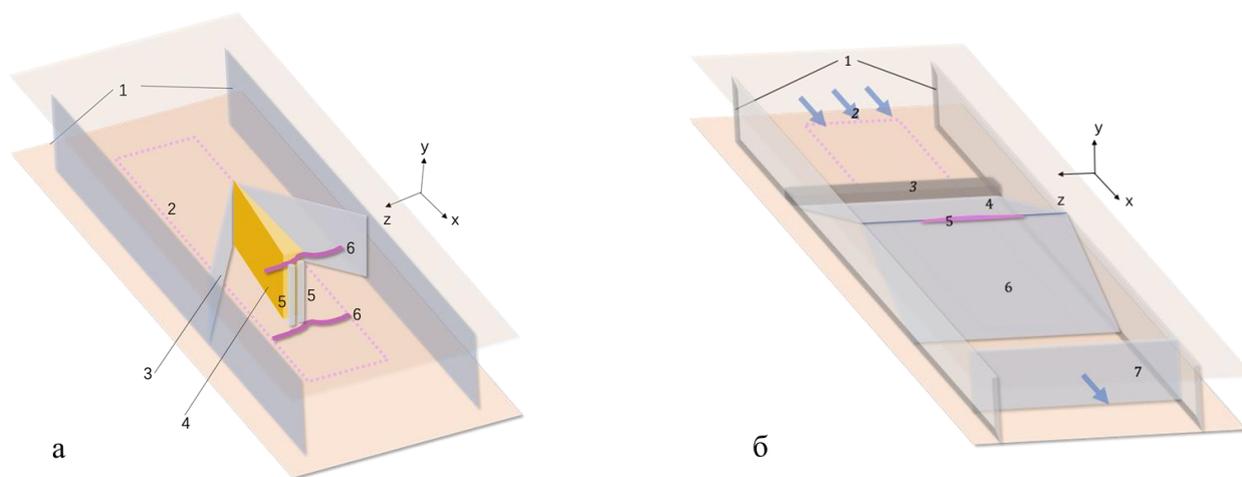


Рис. 2. а) Схема течения около клина: 1 – стекла, 2 – область электродов, 3 – клиновидная головная ударная волна, 4 – клин, 5 – вихревая зона, 6 – каналы разряда на верхней и нижней стенках разрядной камеры;

б) схема течения с препятствием: 1 – стекла; 2 – спутный поток; 3 – препятствие; 4 – наклонная ударная волна; 5 – канал разряда; 6 – отраженная наклонная ударная волна; 7 – исходная плоская ударная волна.

Течение в разрядной камере визуализировалось прямым теневым методом, теневые изображения регистрировались высокоскоростной камерой с частотой кадров 150000-525000 кадров в секунду, экспозицией кадра 1 мкс. Схема теневой визуализации состоит из непрерывного лазера с длиной волны 532 нм и оптической системы формирования параллельных лучей. Свечение разрядов регистрировалось фотоаппаратами Nikon D50, Canon 500, Canon 550 через стекла разрядной камеры под различными углами. Исследовалась динамика свечения разряда с наносекундным разрешением с помощью электронно-оптической камеры БИФО К-011; в экспериментах регистрировались девятикадровые изображения с экспозицией кадра 100 нс и

паузой между кадрами 100-500 нс. Спектрометр AvaSpec-2048FT (диапазон длин волн 200-1100 нм) со световодом использовались для регистрации эмиссионных спектров разряда. Ток разряда регистрировался специальным малоиндуктивным шунтом.

Электрическая схема поверхностных скользящих разрядов показана на рисунке 3. К электродам прикладывалось импульсное напряжение 22-25 кВ; ток разряда составлял  $\sim 1$  кА, длительность  $\sim 500$  нс. Ток разряда имеет колебательный характер; максимальное значение тока, длительность, декремент затухания колебаний различны при разных условиях инициирования разрядов. Электрическая энергия, вкладываемая в разряды, составляла 0.72 Дж. В неподвижном воздухе и в однородном потоке площадь поверхности разряда  $100 \times 30$  мм<sup>3</sup>.

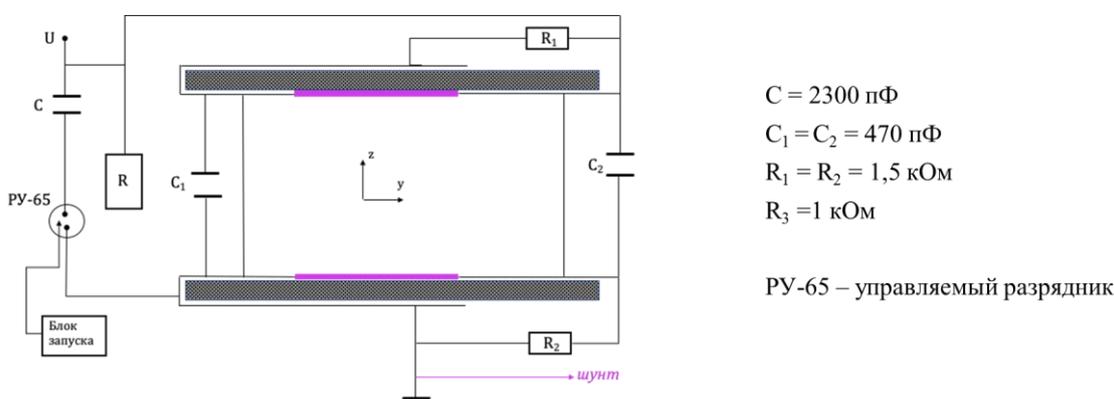


Рис. 3. Электрическая схема поверхностных скользящих разрядов.

В неподвижном воздухе и в однородных потоках поверхностный скользящий разряд (плазменный лист) состоит из параллельных каналов, образуя плазменный слой толщиной  $\sim 0.5$  мм [1]. Основной энерговклад в газ происходит в течение 120-150 нс, т.е. практически мгновенно по сравнению с характерными газодинамическими временами. Значительный энерговклад в малый объем газа приводит к генерации ударных волн. Малая длительность разряда и малая толщина плазменного слоя, сравнимая с толщиной пограничного слоя в ударной трубе ( $\sim 1$  мм) позволяют практически мгновенно воздействовать на пристеночное течение в сверхзвуковом потоке [1, 2].

**В главе 3** приводятся результаты исследования динамики ударных волн, инициированных поверхностным скользящим разрядом в потоке за клином. Плоская ударная волна с числом Маха 2.40-3.50 двигалась по каналу ударной трубы и набегала на клин, установленный под нулевым углом атаки к ее фронту (рис. 1 б). После дифракции ударной волны на клине устанавливалось квазистационарное обтекание клина сверхзвуковым спутным потоком с клиновидной головной ударной волной, замыкающими косыми ударными

волнами и вихревой зоной пониженной плотности за донной частью (рис. 2 а). Скорость набегающего потока в экспериментах составляла 570-920 м/с (числа Маха потока 1.15-1.37), плотность 0.08-0.20 кг/м<sup>3</sup>. При таких условиях в разрядной камере реализовалось однородное сверхзвуковое спутное течение длительностью 300-500 мкс, замыкающееся контактной поверхностью.

При подаче импульсного напряжения 22-25 кВ на верхней и нижней стенках разрядной камеры создавались поверхностные скользящие разряды. Направление распространения каналов разряда перпендикулярно скорости потока. В случае инициирования поверхностных разрядов в потоке с вихревой зоной за клином каждый разряд формировался в виде одного локализованного канала (рис. 4).

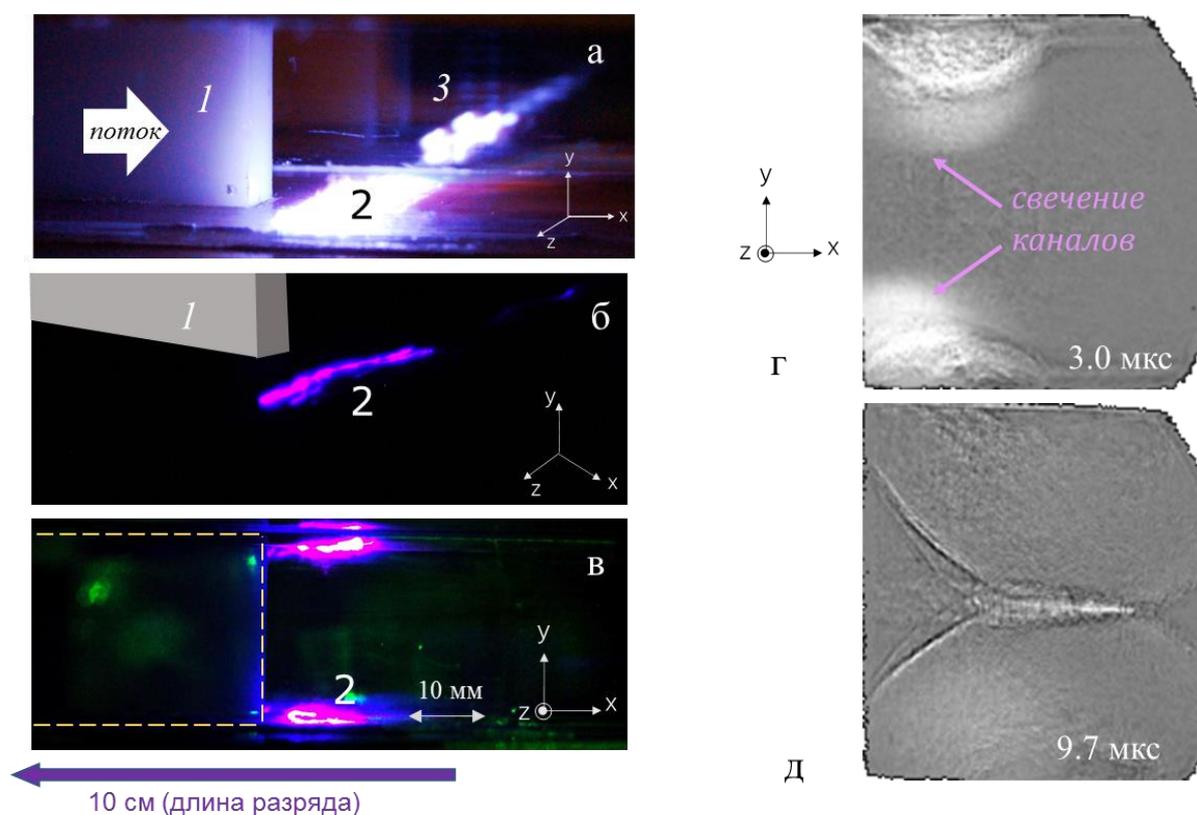


Рис. 4. Фотоизображения свечения поверхностного скользящего разряда в вихревой области за клином, полученные при наклоне объектива к плоскости нижнего разряда (а, б), при размещении объектива перпендикулярно стеклам разрядной камеры (в); изображения б, в зарегистрированы через фильтр (405 нм): 1 – клин, 2 – разрядный канал, 3 – отражение в стекле. Пунктирная линия на (с) показывает контур клина. Два последовательных кадра высокоскоростной теневой съемки поля течения после разряда (г, д).

Режим протекания тока и, соответственно, распределение свечения разряда связаны с неоднородностью плотности, так как характер пробоя зависит от локального значения приведенного электрического поля. Разрядный канал формировался в области низкой плотности вблизи замыкающего скачка

уплотнения (рис. 5). Сопоставление свечения разряда в разных экспериментах показало, что на стадии квазистационарного обтекания клина разрядный канал имеет почти одинаковую форму и расположение в разные моменты времени.

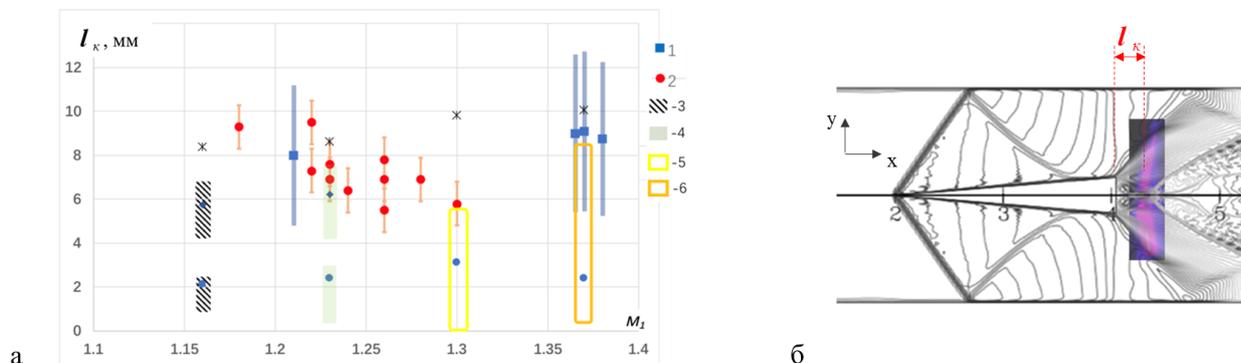


Рис. 5. а) Экспериментальные значения расстояния от дна клина до разрядного канала в потоках с вихревой зоной (1, 2) и расчетные положения области пониженной плотности ( $\rho/\rho_{п} \leq 0.5$ ) (3-6) в зависимости от числа Маха потока, символом \* отмечено положение замыкающего скачка уплотнения; б) расположение разрядного канала на расчетном поле плотности при числе Маха потока 1.37.

В потоках с вихревой зоной в областях пониженной плотности приведенная напряженность электрического поля составляла  $E/N \sim 10^{-18} \text{ В}\cdot\text{м}^2 = 1000 \text{ Тд}$  ( $E$  – напряженность электрического поля,  $N$  – концентрация молекул). Ток протекал по локальному каналу, и концентрация электронов в нем была на порядок выше, чем в однородном воздухе с такой же плотностью, и составляла  $\sim 1.6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . В спектрах излучения разряда наблюдались полосы второй положительной системы молекулярного азота (длины волн 280-500 нм), полосы первой отрицательной системы иона азота ( $\text{N}_2^+$ ), линии атомов кислорода, азота, и выраженный континуум.

Теневые изображения поля течения, полученные при высокоскоростной регистрации, показаны на рисунках 6 а, б для двух моментов времени. Форма фронта ударной волны от разрядного канала в разных экспериментах практически одинакова. Цифровая обработка последовательностей кадров высокоскоростной съемки показала, что ударно-волновая конфигурация от локализованного разрядного канала перемещается в направлении потока со скоростью, близкой к скорости спутного потока при указанных условиях экспериментов. Сравнение экспериментальных изображений с результатами численного моделирования (рис. 6 в, г, д) показывает их хорошее соответствие.

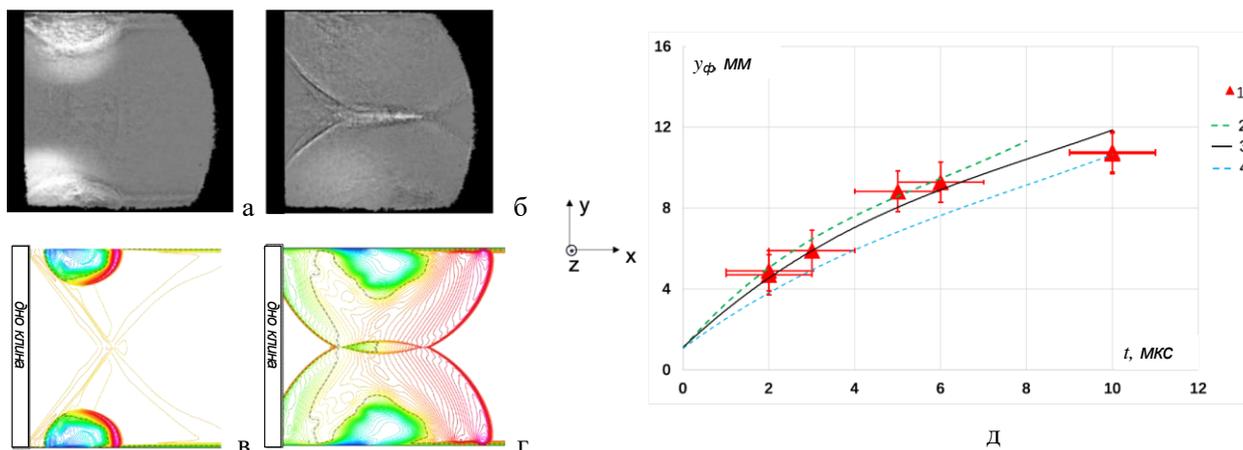


Рис. 6. Экспериментальные теневые изображения в моменты времени 2 мкс (а), 12 мкс (б) после разряда, и расчетные поля локального числа Маха в моменты времени 2 мкс (в), 12 мкс (г) после энерговклада (0.07 Дж). Объем области энерговклада  $60 \text{ мм}^3$ . Зависимость вертикальной координаты фронта ударной волны от времени после разряда и времени после энерговклада (д): 1 – эксперимент; 2, 3, 4 – расчёт (0.11, 0.07, 0.04 Дж соответственно). Число Маха потока 1.23.

В главе 4 приведены результаты исследования наносекундного поверхностного скользящего разряда в потоке с наклонной ударной волной (см. рис. 2 б) и газодинамическое поле течения после разряда. Исследовались режимы развития разряда в потоках со скоростью 660-1370 м/с за плоскими ударными волнами с числами Маха 2.50-5.20 (числа Маха потоков 1.18-1.68, плотность 0.02-0.45 кг/м<sup>3</sup>). В экспериментах поверхностный скользящий разряд инициировался на верхней стенке разрядной камеры через 80-800 мкс после прохождения исходной ударной волной препятствия. В неоднородном потоке с косым скачком уплотнения разряд развивался в виде отдельного интенсивного канала. На рисунке 7 а, б показаны 9-кадровые изображения и фотоизображение свечения разряда в потоке с наклонной ударной волной на квазистационарной стадии при установившейся ударно-волновой конфигурации (см. рис. 2 б).

Спектр излучения разряда в потоке (рис. 7 г) отличается повышенной интенсивностью континуума, свидетельствуя о высокой концентрации и энергии электронов. Длительность свечения разряда оценивалась на основе регистрации 9-кадровой электронно-оптической камерой. Время свечения разрядного канала в потоке достигало 5 мкс. На рисунке 7 в показаны временные зависимости интенсивности свечения и осциллограмма тока. Ток разряда достигает максимального значения в течение первого полупериода (~ 100 нс), затем колебания затухают в течение 500-600 нс. После окончания тока наблюдается послесвечение токового канала с временем затухания ~ 1-3 мкс.

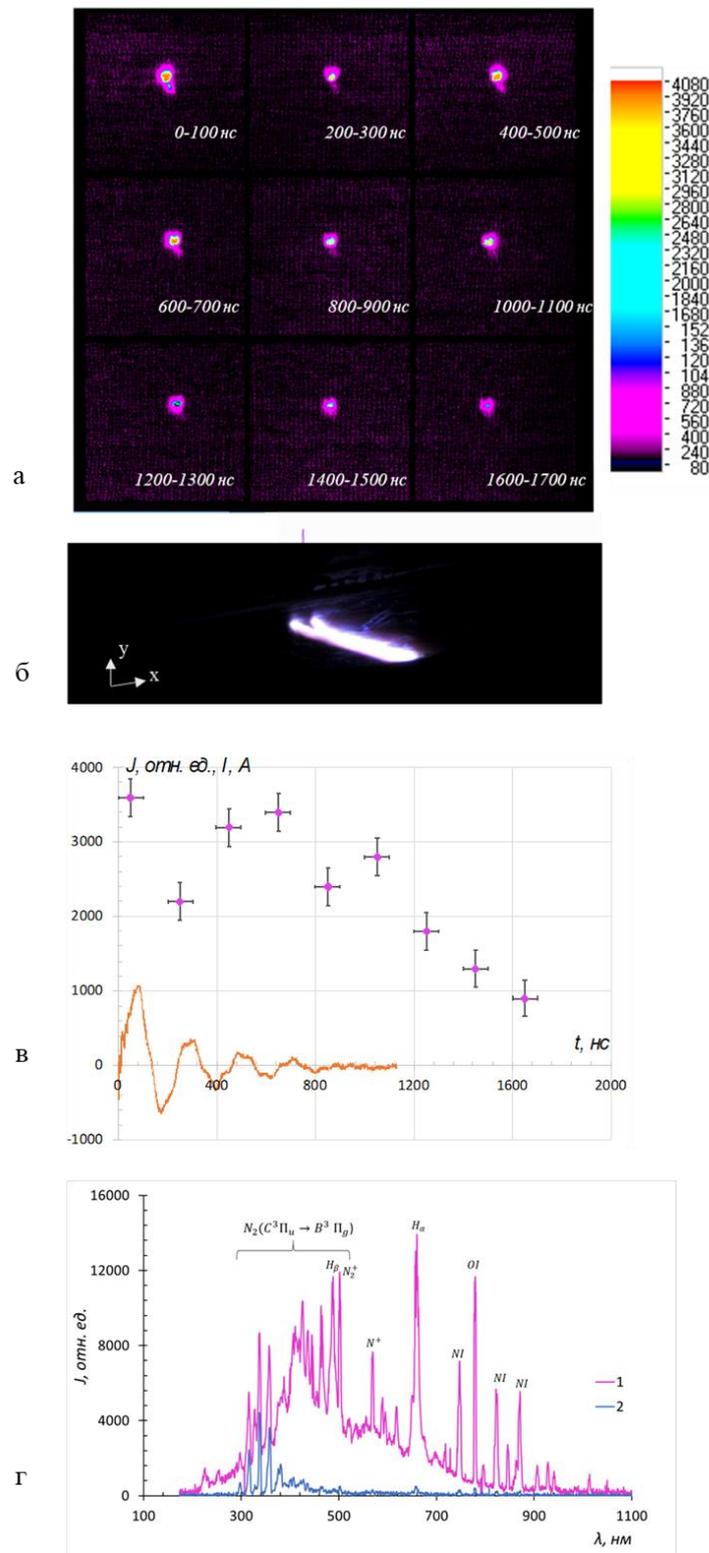


Рис 7. Девятикадровое изображение (а) (легенда показывает относительную интенсивность излучения) и фотоизображение (б) скользящего поверхностного разряда, временные зависимости интенсивности свечения **J** и тока разряда **I** (в) в сверхзвуковом потоке с наклонной ударной волной (число Маха потока 1.30, плотность  $0.11 \text{ кг/м}^3$ ); спектры излучения разряда (г) в потоке (1) (число Маха потока 1.57) и в неподвижном воздухе (2), плотность  $0.10 \text{ кг/м}^3$ .

Геометрия протекания тока разряда была связана с распределением плотности в разрядной области и зависела от времени на стадии установления течения (см. рис. 8). Разрядный канал формировался в области низкой плотности на верхней стенке, формирующейся при взаимодействии наклонной ударной волны с пограничным слоем; структура свечения разряда коррелировала с эволюцией зоны низкой плотности. Полученная в результате обработки изображений свечения временная зависимость положения разрядного канала относительно препятствия хорошо коррелирует с расчетным положением области низкой плотности. На стадии квазистационарного обтекания в разных экспериментах положение и форма канала были сходными.

Теневые исследования поля течения после разряда показали, что из области разрядного канала в потоке распространяется ударная волна, форма фронта которой близка к полуцилиндрической на начальной стадии движения. Она перемещается вниз, от канала, и смещается вправо в направлении потока, затухая (рис. 9 а). Разные скорости участков волнового фронта приводят к изменению формы фронта с течением времени. Движение ударной волны значительно изменяет структуру течения в разрядной камере. Образуется тепловой след от разрядного канала, который распространяется в пограничном слое.

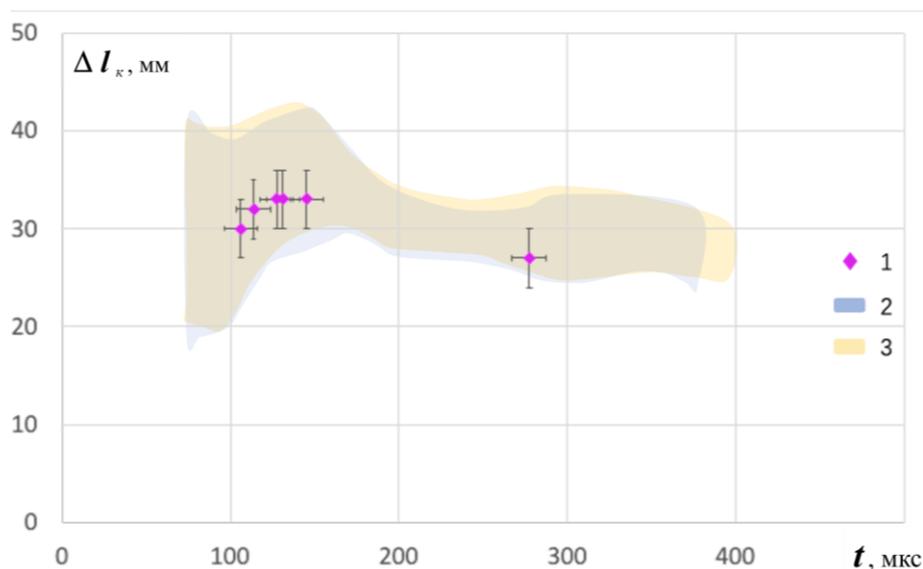


Рис. 8. Расстояние от донной части препятствия до разрядного канала в потоках с числом Маха 1.36-1.40 (1) в зависимости от времени; расчетные положения областей низкой плотности ( $\rho/\rho_{\text{п}} \leq 0.6$ ) в потоках с числом Маха 1.36 (2) и 1.43 (3). Плотность потока  $\rho_{\text{п}} = 0.11 \text{ кг/м}^3$ . (Время после начала дифракции ударной волны на препятствии.)

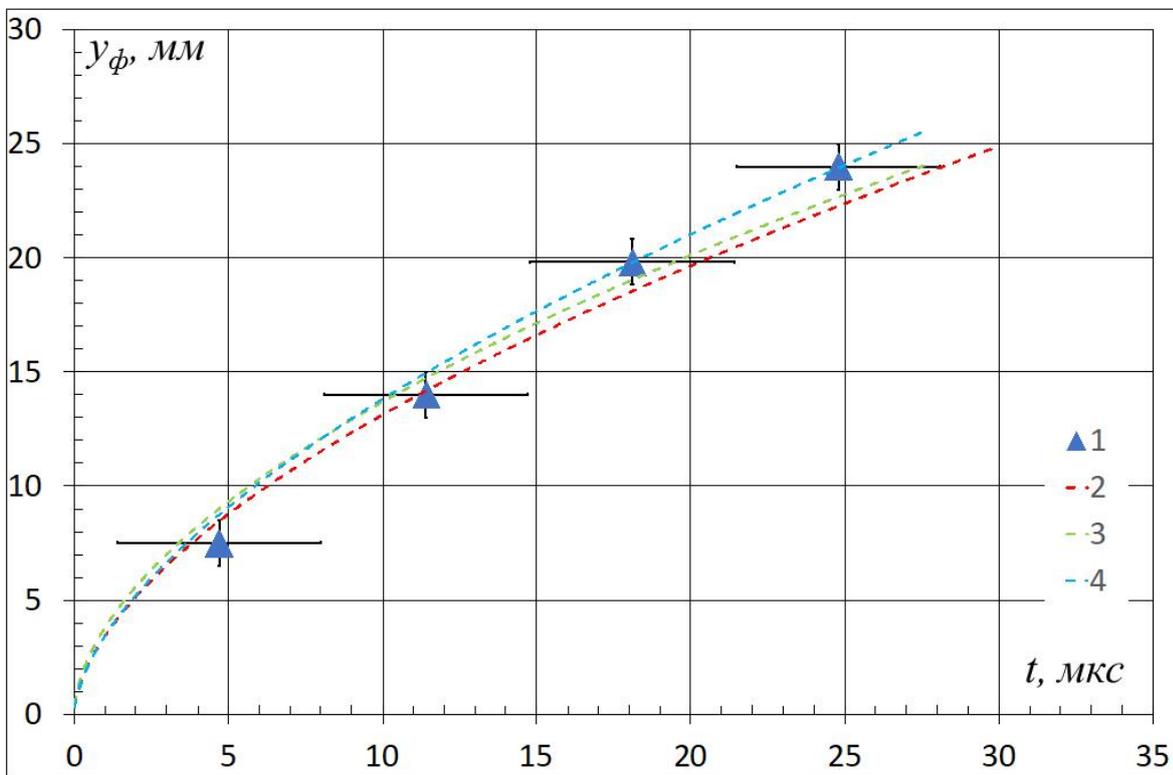
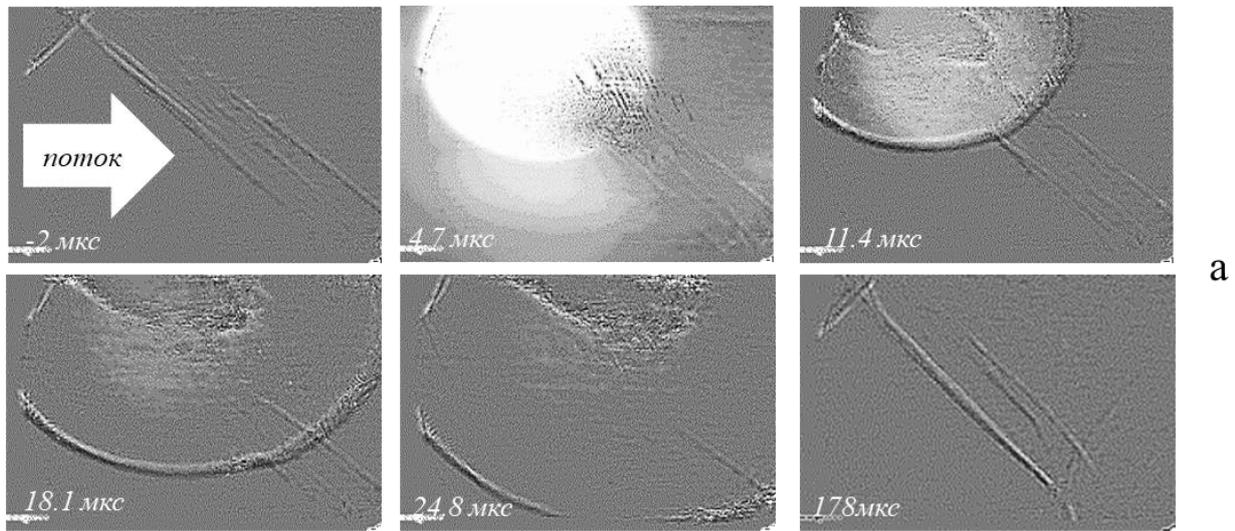


Рис. 9. Последовательность кадров высокоскоростной теневой съемки поля течения после разряда (а); зависимость вертикальной координаты фронта ударной волны  $y_f$  от времени после подвода энергии: 1 – эксперимент; (2-4) – моделирование: (2) – длительность 800 нс, энергия 0.29 Дж; (3) – 800 нс, 0.36 Дж; (4) – 1400 нс, 0.43 Дж. Число Маха потока 1.30. (2 вариант энерговклада, объем 90 мм<sup>3</sup>.)

**В главе 5** описано численное моделирование неоднородных сверхзвуковых течений воздуха с поверхностным энерговкладом в вихревых зонах и зонах отрыва. Численное моделирование с локальным энергоподводом

в плоском канале проведено на основе нестационарных двумерных уравнений Навье-Стокса. Разработка алгоритма программы выполнена доцентом МГУ им. М.В.Ломоносова Ивановым И.Э и ст.н.с. ИПМех РАН Крюковым И.А. [3, 4]. Течение рассчитывалось с учетом эффектов турбулентности с использованием двухпараметрической модифицированной  $k$ - $\epsilon$  модели турбулентности.

Для изучения динамики ударных волн, инициированных разрядом в потоке при обтекании клина, были проведены две серии расчетов: расчет обтекания клина сверхзвуковым потоком в канале и расчет поля течения с мгновенным локальным энерговыделением в вихревой области. В первой серии расчетов определялось поле плотности за донной частью клина в сверхзвуковом потоке с числом Маха 1.16-1.37 при плотности набегающего потока 0.10-0.12 кг/м<sup>3</sup>. Расчеты показали пространственное распределение плотности с положением минимума в вихревой зоне на расстоянии 2-3 мм от дна клина и пониженной плотностью на расстоянии 8-10 мм, в области локализации разрядного канала. Целью второй серии расчетов было изучение динамики ударной волны после энерговыделения. В потоке задавался энерговыделением в объеме в виде прямоугольного параллелепипеда длиной 30 мм, высотой 1 мм, шириной 1-2 мм вблизи поверхности. Варианты энерговыделения в пределах 0.036-0.180 Дж подбирались так, чтобы расчетные и экспериментальные положения фронта ударной волны совпали. На рисунке 6 показаны экспериментальные теневые изображения и расчетные изображения в моменты времени 2 мкс и 12 мкс, на которых видно хорошее совпадение формы и положения ударных волн. Сравнение расчетной временной и экспериментальной зависимостей вертикальной координаты фронта ударной волны после энерговыделения в потоке с числом Маха 1.23 (рис. 6 д) показывает, что динамика фронта ударной волны соответствует расчету при энергии  $0.075 \pm 0.035$  Дж (21%  $\pm$  10% от величины электрической энергии, вкладываемой в разряд). Расчеты для потоков с числами Маха 1.20-1.27 также показали хорошее совпадение с экспериментами при указанной величине энерговыделения.

Целью моделирования энерговыделения в потоке с наклонной ударной волной было определение динамики индуцированной ударной волны после импульсного подвода энергии в приповерхностный поток. Первый этап моделирования включал движение ударной волны через расчетную область и дифракцию на преграде до установления стационарного сверхзвукового течения. На рисунке 10 приведено поле плотности установившегося течения в канале с препятствием и указаны основные элементы течения. На увеличенном фрагменте показано, что область пониженной плотности на верхней стенке расположена в отрывной зоне, которая сформировалась при взаимодействии наклонной ударной волны с пограничным слоем.

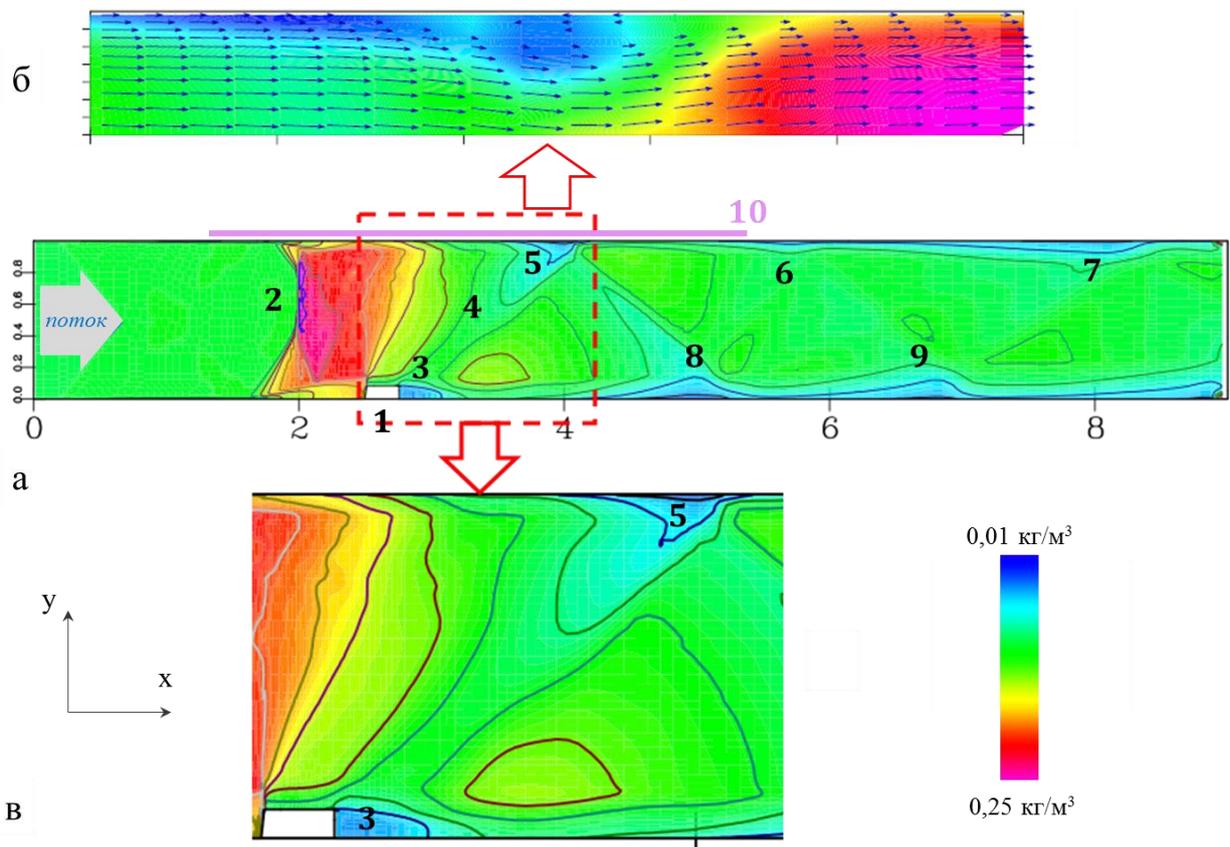


Рис. 10. Расчетное поле плотности в канале с препятствием (а) и увеличенные фрагменты (б, в) для числа Маха потока 1.40. Основные структурные элементы течения: 1 – препятствие, 2 – головная ударная волна, 3 – зона низкой плотности за донной частью, 4 – наклонная ударная волна, 5 – зона низкой плотности в области отрыва, сформировавшаяся при взаимодействии наклонной ударной волны с пограничным слоем на верхней стенке; 6-9 – зоны низкой плотности, сформировавшиеся при взаимодействии отраженных ударных волн с пограничными слоями на стенках, 10 – положение электродов поверхностного скользящего разряда.

Второй этап расчетов включал энерговклад в небольшой объем в зоне отрыва, моделирующий разрядный канал в сверхзвуковом потоке. Поскольку форма разрядного канала в экспериментах близка к прямолинейной, ввод энергии задавался вблизи поверхности в объем в виде прямоугольного параллелепипеда длиной 30 мм, высотой 0.5–2.0 мм и шириной 1–3 мм ( $z \times y \times x$ ) (см рис. 11). Вклад энергии в объем составлял 0.14-0.43 Дж. Варианты ввода энергии варьировались таким образом, чтобы форма фронта и динамика движения моделируемой ударной волны соответствовали экспериментальным данным. Время энерговклада было 300-1600 нс. Энерговклад задавался в двух вариантах: при постоянной мощности энергоподвода (1 вариант) и при линейно снижающейся во времени мощности (2 вариант).

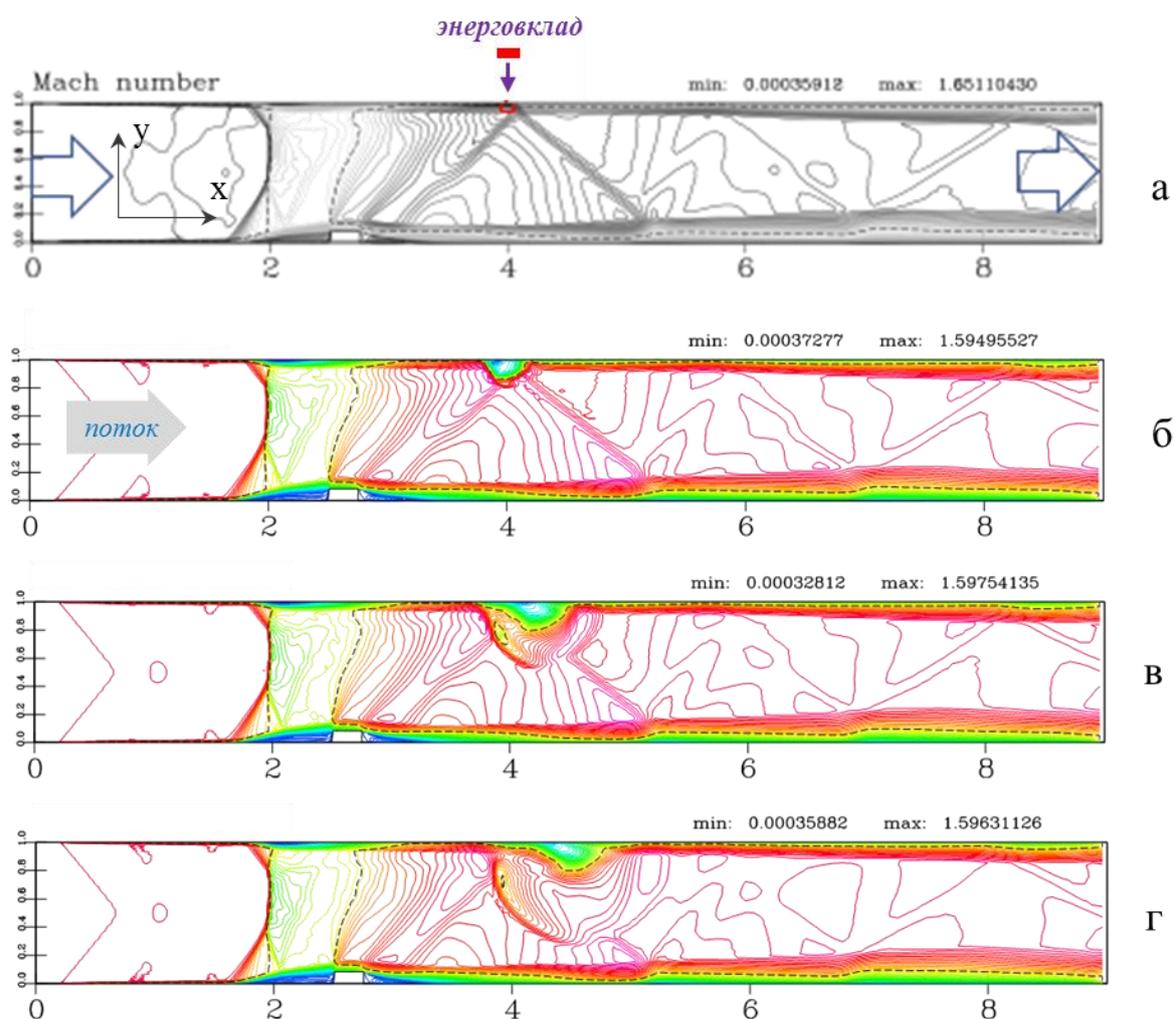
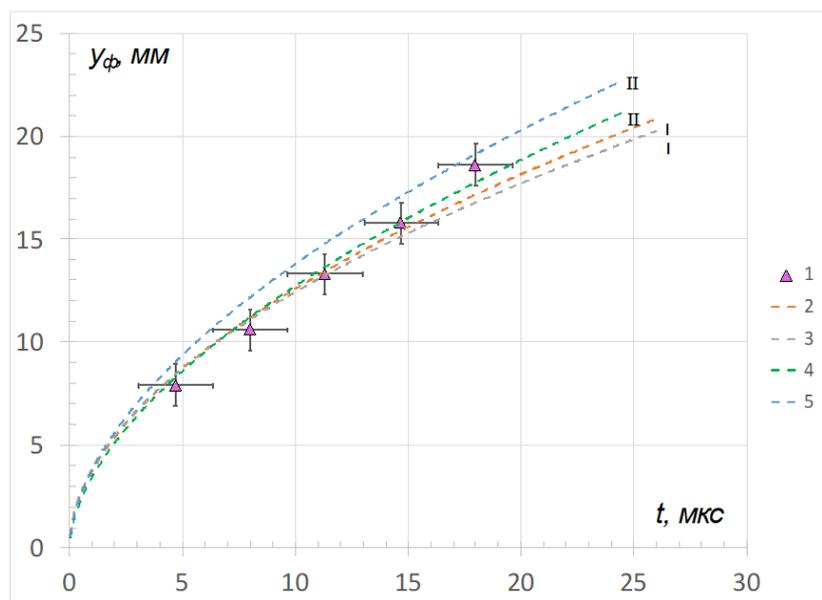
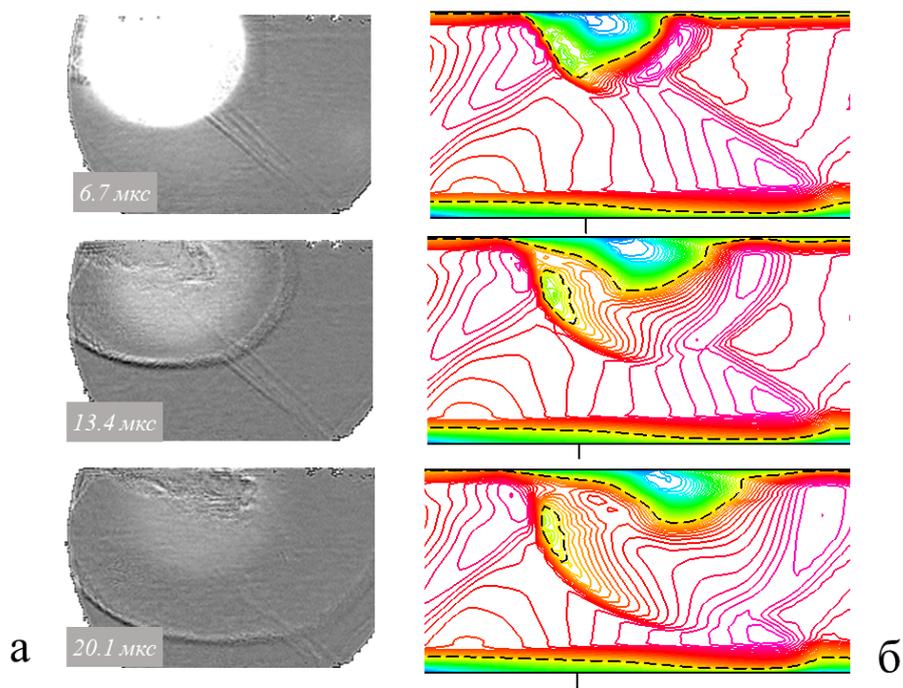


Рис. 11. Расчетная область течения в канале с препятствием с областью энерговклада (а) и поле числа Маха потока после энерговклада (б, в, г) в моменты времени 2.5, 10, 20 мкс соответственно. Число Маха потока 1.40. (1 вариант энерговклада, 0.29 Дж; время энерговклада 800 нс, объем 90 мм<sup>3</sup>.)

Обнаружено, что в расчетах при первом варианте энерговклада независимо от объема и времени энерговклада зависимость вертикальной координаты полуцилиндрической ударной волны от времени не вполне соответствовала экспериментальной зависимости. На начальном этапе движения фронта ударной волны (до 5 мкс) расчетные значения были близки к экспериментальным; после 10 мкс расчетные значения были значительно ниже. Поэтому на завершающем этапе проводились расчеты со вторым вариантом энерговклада, который обеспечивал близкую к экспериментам динамику фронта ударной волны на временном интервале до 30 мкс, когда фронт полуцилиндрической ударной волны достигал нижней стенки (рис. 12).



В

Рис 12. Экспериментальные теневые изображения (а) и численные поля локального числа Маха (б) в указанные моменты времени; зависимость вертикальной координаты фронта ударной волны  $y_{\phi}$  от времени (в): 1 – эксперимент; 2-5 – расчеты: (2) – 1 вариант, длительность 800 нс, энергия 0.29 Дж, объем 60  $\text{мм}^3$ ; (3) – 1 вариант, 600 нс, 0.29 Дж, 60  $\text{мм}^3$ ; (4) – 2 вариант, 1400 нс, 0.21 Дж, 90  $\text{мм}^3$ ; (5) – 2 вариант, 800 нс, 0.29 Дж, 60  $\text{мм}^3$ . Число Маха потока 1,40, плотность 0.11  $\text{кг}/\text{м}^3$ . Численные изображения (б) соответствуют расчету 5 (в). Время отсчитывается от момента ввода энергии.

Анализ численных расчетов при различных начальных параметрах показал, что в основном на результаты расчетов влияют удельная энергия и время энерговыделения. Увеличение времени энерговыделения при прочих равных условиях приводит к усилению индуцированной энерговыделением ударной волны, увеличению скорости ее движения. Варьирование ширины и высоты объема энерговыделения в меньшей степени влияло на динамику ударной волны. Сопоставление экспериментальных и расчетных результатов при числе Маха потока 1.55, плотности  $0.08 \text{ кг/м}^3$  показало, что расчетная динамика полуцилиндрической ударной волны соответствует экспериментальным результатам при энерговыделении  $0.21 \pm 0.04 \text{ Дж}$  в объеме  $90 \text{ мм}^3$  за время 1400 нс (2 вариант энерговыделения); при числах Маха потока 1.40-1.44 – при энерговыделении  $0.29 \text{ Дж}$  за время 1400 нс. Для потока с числом Маха 1.30 результаты расчетов ближе к результатам эксперимента при объеме энерговыделения  $90 \text{ мм}^3$ , длительности 800 нс и энергии  $0.29 \text{ Дж}$  (см. рис. 9 б). Вкладываемая в газ энергия, в результате которой формируется ударная волна, составляет 29-40% электрической энергии разряда.

С точки зрения кинетических процессов в плазме варианты расчета с длительностью энерговыделения больше 600 нс могут соответствовать дополнительному энерговыделению при протекании релаксационных процессов, в результате которых энергия внутренних степеней свободы возбужденных молекул переходит в тепловую энергию на стадии послесвечения [5].

**В Заключение** сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы:

1. Впервые экспериментально получены пространственно-временные характеристики излучения, токовые и спектральные характеристики наносекундного поверхностного скользящего разряда в сверхзвуковых неоднородных потоках воздуха с вихревой зоной и зоной отрыва в канале ударной трубы. Показано, что режимы развития разряда определяются параметрами локальных зон пониженной плотности в сверхзвуковых потоках с числами Маха 1.15-1.68, плотностью  $0.01\text{-}0.45 \text{ кг/м}^3$ .

2. Экспериментально установлено, что при инициировании поверхностных скользящих разрядов в сверхзвуковых потоках воздуха с вихревой зоной за клином происходит формирование разряда в локализованный канал в области низкой плотности вблизи замыкающего скачка уплотнения. Впервые получены временные зависимости положения разрядного канала за клином в сверхзвуковых потоках с числами Маха 1.15-1.37, плотностью  $0.08\text{-}0.20 \text{ кг/м}^3$ .

3. Впервые обнаружено, что при инициировании поверхностного скользящего разряда в сверхзвуковом потоке воздуха с наклонной ударной волной разряд развивается в виде отдельного канала, расположенного в области низкой плотности в зоне отрыва, которая формируется при взаимодействии

наклонной ударной волны с пограничным слоем. Установлено, что при одинаковом импульсном напряжении длительность свечения разрядного канала зависит от условий в потоке, от временной стадии газодинамического процесса и может превышать 5 мкс.

4. Впервые установлена зависимость положения разрядного канала от времени после дифракции на препятствии исходной плоской ударной волны с числом Маха 2.50-5.20. На основе анализа эволюции течения показано, что положение разрядного канала коррелирует с положением области низкой плотности в сверхзвуковых потоках с числами Маха 1.18-1.68, плотностью 0.02-0.45 кг/м<sup>3</sup>.

5. Экспериментально исследованы поля течения после поверхностного скользящего разряда в неоднородных сверхзвуковых потоках с вихревой зоной и зоной отрыва путем высокоскоростного теневого зондирования с частотой до 525000 к/с. На основе обработки теневых изображений проанализирована динамика ударных волн, индуцированных разрядом, и их влияние на ударно-волновую структуру течения продолжительностью более 100 мкс. Впервые установлены временные зависимости вертикального смещения фронта индуцированной ударной волны.

6. Проведено численное моделирование локального поверхностного энерговыклада в неоднородных сверхзвуковых потоках в канале на основе нестационарных уравнений Навье-Стокса. На основе сопоставления экспериментальных и численных результатов показана зависимость динамики индуцированных ударных волн от пространственно-временных характеристик энерговыклада. Установлено, что в потоках с числами Маха 1.20-1.27 величина тепловой энергии, выделяющейся в разрядном канале в вихревой зоне, составляет  $0.075 \pm 0.035$  Дж. Величина энерговыклада в газ, приводящая к генерации ударной волны от разрядного канала в потоках с наклонной ударной волной, определенная с использованием модели распределенного во времени энерговыклада, составила 0.15-0.36 Дж при числах Маха потоков 1.20-1.55, плотности 0.03-0.45 кг/м<sup>3</sup>.

## **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Статьи в рецензируемых научных журналах, индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus, RSCI, а также в изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности:**

A1. Mursenkova I.V., Ivanov I.E., **Liao Yu.**, Kryukov I.A. Experimental and Numerical Investigation of a Surface Sliding Discharge in a Supersonic Flow with an Oblique Shock Wave. // *Energies*, MDPI (Basel, Switzerland), 2022, V. 15, No 6, 2189. Импакт-фактор: 3.00 (Scopus) (вклад 0.30).

A2. **Liao Yu.**, Mursenkova I.V., Ivanov I.E., Znamenskaya I.A., Sysoev N.N. Shock waves generated by a pulsed surface sliding discharge in a supersonic airflow past a wedge. // *Physics of Fluids*, 2020, V. 32, No 10, 106108. Импакт-фактор: 3.52 (Scopus) (вклад 0.40).

A3. Koroteeva E., Mursenkova I., **Liao Yu.**, Znamenskaya I. Simulating particle inertia for velocimetry measurements of a flow behind an expanding shock wave, // *Physics of Fluids*, 2018, V. 30, No 1, 011702. Импакт-фактор: 3.52 (Scopus) (вклад 0.20).

A4. Mursenkova I.V., **Liao Yu.**, Ulanov P.Yu, Shi L. High-Speed Shadowgraphy of the Interaction of an Oblique Shock Wave in a Channel with a Surface Sliding Discharge. // *Scientific Visualization*, 2021, V. 13, No 3, p. 47-57. Импакт-фактор: 1.20 (Scopus) (вклад 0.25).

A5. Mursenkova I., Ivanov I.E., Ulanov P., **Liao Yu.**, Sazonov A. Investigation on nanosecond surface sliding discharge in a supersonic airflow with oblique shock wave. // *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, V. 1698. Импакт-фактор: 0.55 (Scopus) (вклад 0.20).

A6. Мурсенкова И.В., Сазонов А.С., **Ляо Ю.**, Иванов И.Э. Визуализация области взаимодействия косого скачка уплотнения с пограничным слоем свечением наносекундного поверхностного скользящего разряда. // *Научная визуализация*, 2019, том 11, № 3, с. 76-87. Visualization of the interaction region of an oblique shock wave with a boundary layer by the radiation of a nanosecond surface sliding discharge. // *Scientific Visualization*, 2019, V. 11, No 3, p. 76-87. Импакт-фактор: 1.20 (Scopus) (вклад 0.25).

A7. Мурсенкова И.В., **Ляо Ю.**, Иванов И.Э., Сысоев Н.Н. Характеристики наносекундного поверхностного скользящего разряда в сверхзвуковом потоке воздуха, обтекающем тонкий клин. // *Вестник Московского университета*, 2019, № 3, с. 54-60. Импакт-фактор: 0.64 (RSCI) (вклад 0.30). The Characteristics of a Nanosecond Surface Sliding Discharge in a Supersonic Airflow Flowing around a Thin Wedge. // *Moscow University Physics Bulletin*, 2019, V. 74, No 3, p. 269-276. Импакт-фактор: 0.67 (Scopus) (вклад 0.30).

A8. Мурсенкова И.В., Сазонов А.С., **Ляо Ю.** Влияние импульсных скользящих поверхностных разрядов на сверхзвуковое обтекание тонкого клина в ударной трубе. // *Письма в Журнал технической физики*, 2018, том 44, № 4, с. 59-65. Импакт-фактор: 0.76 (RSCI) (вклад 0.30). The Effect of Pulsed Sliding Surface Discharges on Supersonic Airflow past a Thin Wedge in Shock Tube. // *Technical Physics Letters*, V. 44, No 2, p. 157-159. Импакт-фактор: 0.71 (Scopus) (вклад 0.30).

### **Статьи в сборниках:**

A9. Мурсенкова И.В., Уланов П.Ю., Ляо Ю., Ши Л. Высокоскоростное теневое зондирование сверхзвукового потока с наклонной ударной волной при

инициировании импульсного поверхностного разряда. // Труды 16 Международной научно-технической конференции «Оптические методы исследования потоков», 2021, с. 205-211.

A10. Mursenkova I., Ivanov I.E., Ulanov P., Liao Yu., Sazonov A. Nanosecond surface sliding discharge in a supersonic flow with oblique shock wave. // Proceedings of the 19<sup>th</sup> Workshop on Magneto-Plasma Aerodynamics, 2020, с. 22-27.

A11. Mursenkova I., Koroteeva E., Liao Yu., Znamenskaya I. Gas-Dynamic Flow Behind Shock Wave Initiated by a Sliding Surface Discharge Channel. // Proceedings of the 31<sup>st</sup> International Symposium on Shock Waves (ISSW31), 2019. Springer, NY, V. 1, p. 557-563

A12. Мурсенкова И.В., Сазонов А.С., Ляо Ю. Визуализация зоны отрыва в пограничном слое сверхзвукового потока воздуха свечением импульсного поверхностного скользящего разряда. // Труды XV Международной научно-технической конференции «Оптические методы исследования потоков», 2019, с. 205-213.

A13. Mursenkova I., Koroteeva E., Liao Yu., Znamenskaya I., Gas-Dynamic Flow behind Shock Wave Initiated by a Sliding Surface Discharge Channel. // Proceedings of the 31<sup>st</sup> International Symposium on Shock Waves (ISSW31), 2017, SBM000348.

### **Список цитируемой литературы:**

1. Знаменская И.А., Латфуллин Д.Ф., Луцкий А.Е., Мурсенкова И.В., Сысоев Н.Н. Развитие газодинамических возмущений из зоны распределенного поверхностного скользящего разряда. Журнал технической физики, 2007. Т. 77, № 5. С. 10–18.
2. Mursenkova. I.V., Znamenskaya. I.A. and Lutsky. A.E. Influence of shock waves from plasma actuators on transonic and supersonic airflow. J. Phys. D: Appl. Phys. 2018, V. 51 (5), 105201
3. Глушко Г. С., Иванов И. Э., Крюков И. А., Метод расчета турбулентных сверхзвуковых течений. Матем. Моделирование. 2009. Т. 21, № 12, С. 103–121
4. Ivanov I.E., Kryukov I.A. Numerical study of ways to prevent side loads in an over-expanded rocket nozzles during the launch stage. // Acta Astronautica, 2019. Vol. 163. P. 196–201.
5. Кузнецов А.Ю., Мурсенкова И.В., Уланов П.Ю. Динамика излучения наносекундного поверхностного скользящего разряда в потоке с ударной волной. Письма в Журнал технической физики, 2019. Т. 45, № 24, с. 48-51.