МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

КУЗНЕЦОВ АЛЕКСАНДР ЮРЬЕВИЧ

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НАНОСЕКУНДНЫХ СИЛЬНОТОЧНЫХ РАЗРЯДОВ С УДАРНОЙ ВОЛНОЙ

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2021

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

<table>
<tr><td>Научный руководитель</td><td>Мурсенкова Ирина Владимировна,
кандидат физико-математических наук,
доцент</td></tr>
<tr><td>Официальные оппоненты</td><td>Шахатов Вячеслав Анатольевич, доктор физико-математических наук, Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева Российской академии наук, ведущий научный сотрудник
Гидаспов Владимир Юрьевич, доктор физико-математических наук, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), ведущий научный сотрудник
Георгиевский Павел Юрьевич, кандидат физико-математических наук, Научно-исследовательский институт механики МГУ, ведущий научный сотрудник</td></tr>
</table>

Защита диссертации состоится 17 июня 2021 г. в 15.30 на заседании диссертационного совета МГУ.01.01 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д.1, с.2, МГУ физический факультет.

E-mail: laptin@polly.phys.msu.ru

Диссертация находится на хранении в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27). Со сведениями о регистрации участия в защите в удаленном интерактивном режиме и с диссертацией в электронном виде можно ознакомиться, перейдя на страницу диссертационного совета по ссылкам:
https://istina.msu.ru/dissertations/368388648/
https://www.msu.ru/science/dis-sov-msu.html

Автореферат разослан «   » мая 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета МГУ.01.01,

кандидат физ.-мат. наук Лаптинская Т. В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы связана с задачами плазменной аэродинамики, т.е. с вопросами применения газовых разрядов для управления высокоскоростными потоками воздуха и различных газовых смесей. Импульсные электрические разряды являются эффективным способом подвода энергии к потоку газа в результате джоулевой диссипации электрической энергии и могут служить источником контролируемых возмущений. В многочисленных работах показано, что газоразрядная плазма может влиять на режимы обтекания поверхностей и на структуру внутренних течений в каналах: возможно изменение лобового сопротивления обтекаемых тел, подъемной силы, положения и интенсивности локальных скачков уплотнения, смещение зон отрыва, воздействие на пограничный слой, теплообмен и т.п. Исследование взаимодействия высокоскоростных потоков и ударных волн с плазмой газовых разрядов играет важную роль в фундаментальном изучении механизмов и кинетики атомно-молекулярных превращений в сильных электрических полях и при больших скоростях течения газа. Актуальным является нахождение оптимальных режимов развития разрядов в потоках газа, определение величины энерговклада, анализ кинетических процессов в плазме, изучение влияния разряда на локальные параметры потока, а также на структуру течения в целом. При использовании газоразрядной плазмы для управления потоками необходимо учитывать взаимодействие плазменных образований с высокоскоростными потоками воздуха, т.е. их взаимное влияние. Использование импульсных разрядов наносекундной длительности дает возможность детально изучить поведение разряда во времени при постоянстве параметров течения, а также позволяет использовать ударную трубу для организации течения с плоской ударной волной и его синхронизации с реализующейся плазменной областью.

В работе экспериментально решалась задача о взаимодействии импульсных сильноточных разрядов в воздухе – поверхностного скользящего и комбинированного объемного – с плоской ударной волной, находящейся в разрядной области и за ее пределами.

Целью диссертационной работы было изучение параметров поверхностного скользящего разряда и комбинированного объемного разряда наносекундной длительности при взаимодействии с плоской ударной волной и структуры газодинамического течения после разряда.

Для этого были поставлены следующие **задачи**:

1) регистрация пространственно-временных характеристик излучения, спектров и тока разрядов в присутствии фронта ударной волны при различных числах Маха и при различных положениях фронта ударной волны в разрядной области и вне ее;

2) высокоскоростная теневая визуализация ударно-волнового течения и анализ движения газодинамических разрывов после взаимодействия разрядов с плоской ударной волной, находящейся внутри разрядной области и вне ее;

3) определение механизма послесвечения разрядов на основе сопоставления экспериментальных данных и моделирования столкновительно-излучательных процессов в плазме воздуха в послеразрядный период.

<u>Научная новизна работы</u> заключается в следующем:

1) Впервые экспериментально получены осциллограммы тока и спектры излучения, временные характеристики излучения наносекундных сильноточных поверхностного скользящего и комбинированного объемного разрядов при взаимодействии с фронтом ударной волны. Показано, что присутствие ударной волны внутри или вне разрядной области приводит к изменению характера разряда, зависящего от числа Маха ударной волны.

2) Впервые детально с наносекундным разрешением исследована динамика излучения поверхностного скользящего и комбинированного объемного разрядов при взаимодействии с ударной волной; рассмотрена кинетика излучения плазмы в послеразрядный период и проведено моделирование временной зависимости заселенности состояния $C^3\Pi_u$ молекулярного азота в условиях ударного сжатия плазменной области.

3) На основе высокоскоростного теневого зондирования экспериментально показано, что распады газодинамических разрывов на фронте ударной волны приводят к реализации различных ударно-волновых структур в случаях, когда фронт ударной волны находится внутри разрядной области и за ее пределами в момент инициирования разрядов.

<u>Научная и практическая ценность работы</u>

Получен и обработан массив экспериментальных данных о режимах развития наносекундных поверхностного скользящего и комбинированного объемного разрядов в потоках с ударной волной при различных положениях фронта ударной волны относительно разрядной области: о пространственно-временном распределении излучения, спектрах излучения, токе разрядов. Получены временные зависимости интенсивности излучения разрядов при взаимодействии с ударной волной на основе рассмотрения кинетики излучения с учетом движения газодинамических разрывов, которые хорошо коррелируют с экспериментальными зависимостями. С практической точки зрения полученные результаты можно использовать для прогнозирования воздействия импульсных разрядов на течение вблизи поверхности летательного аппарата, для коррекции положения скачков уплотнения в потоках в каналах. Реализация различных типов энерговклада с помощью импульсных разрядов может быть использована для перестройки структуры течения в технологиях управления высокоскоростными потоками.

Достоверность и обоснованность результатов.

Достоверность полученных результатов подтверждается значительным объемом экспериментальных данных и высокой степенью повторяемости при одинаковых условиях проведения экспериментов. Моделирование и расчеты проводились на научно обоснованных физических моделях. Полученные результаты не противоречат результатам работ других исследовательских коллективов.

Положения, выносимые на защиту.

1. Результаты исследования пространственно-временного распределения излучения и тока наносекундных сильноточных поверхностного скользящего и комбинированного объемного разрядов на основе регистрации девятикадровых изображений, разверток свечения, спектров излучения и осциллограмм тока разрядов в неподвижном воздухе при давлениях 2-185 торр и при взаимодействии с плоскими ударными волнами с числами Маха 1.90-5.00, находящимися внутри разрядной области и вне ее в момент инициирования разрядов.
2. Экспериментальные зависимости тока поверхностных скользящих и комбинированного объемного разрядов от положения фронта ударной волны за пределами разрядной области в момент инициирования разряда.
3. Экспериментальные зависимости времен затухания свечения поверхностного скользящего и комбинированного объемного разрядов от давления в неподвижном воздухе.
4. Экспериментальные временные зависимости интенсивности свечения поверхностного скользящего и комбинированного объемного разрядов при взаимодействии с фронтом плоской ударной волны, находящейся внутри и за пределами разрядного объема, показывающие двухступенчатый характер затухания.
5. Результаты высокоскоростного теневого зондирования течений после взаимодействия поверхностных скользящих и комбинированного объемного разрядов с ударной волной, показывающие различие формирующихся ударно-волновых структур при разных положениях ударной волны волны внутри и за пределами разрядной области в момент инициирования разряда.
6. Результаты моделирования временной зависимости заселенности состояния $C^3\Pi_u$ молекулярного азота в послеразрядный период на основе рассмотрения столкновительно-излучательных процессов в воздухе с учетом ударного сжатия плазменной области при взаимодействии с ударными волнами с числами Маха 2.00-5.00.

Апробация работы.

Основные положения диссертации были представлены на следующих конференциях:

1. Всероссийская (с международным участием) конференция "Физика низкотемпературной плазмы" (ФНТП-2020) (Казань, Россия, 2020).

2. Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС (Звенигород, Россия, 2021, 2020, 2019, 2014)
3. Ломоносовские чтения (Москва, Россия, 2019, 2017).
4. Joint Conference of XXXIV International Conference on Phenomena in Ionized Gases (XXXIV ICPIG) and the 10^{th} International Conference on Reactive Plasmas (ICRP-10) (Саппоро, Япония, 2019).
5. XIX Всероссийская школа-семинар «Современные проблемы аэрогидродинамики» (Сочи, Россия, 2019).
6. International Symposium and High-Speed Aerodynamics Workshop (Токио, Япония, 2018).
7. GraphiCon 2018, 28-я Международная конференция по компьютерной графике и машинному зрению (Томск, Россия, 2018).
8. XII Международная конференция по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (Алушта, Россия, 2018).
9. 17^{th} International Workshop on Magneto-Plasma Aerodynamics (Москва, Россия, 2018).
10. XXII International Conference on Gas Discharges and their Applications (Нови-Сад, Сербия, 2018).
11. XXXIII ICPIG 2017, (Лиссабон, Португалия, 2017).
12. 25^{th} International Conference: Week of Doctoral Students (Прага, Чехия, 2016).
13. Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2016» (Москва, Россия, 2016, 2015).
14. 10 Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing (Неаполь, Италия, 2015).

Публикации

По результатам работы опубликовано 5 статей в реферируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus, 6 статей в трудах всероссийских и международных конференций и 13 тезисов докладов на всероссийских и международных конференциях (всего 24 печатные работы). 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 проведено моделирование заселенности излучающего состояния N_2 ($C^3\Pi_u$) молекулярного азота.

Структура и содержание работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы (91 ссылка). Объём диссертации составляет 128 страниц. Работа содержит 91 рисунок.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

В первой главе сделан обзор работ по исследованию газовых разрядов в высокоскоростных потоках воздуха и при взаимодействии с ударными волнами. 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. Отмечено, что исследовалось в основном взаимодействие ударных волн с газоразрядной плазмой стационарных разрядов. Обнаруженные изменения скорости ударных волн и структуры фронта определялись преимущественно джоулевым нагревом среды. Воздействие сильноточных наносекундных разрядов на потоки с ударными волнами исследовано недостаточно полно. В то же время для решения задач плазменной аэродинамики необходимо знание электродинамических процессов в плазме в наносекундном масштабе времен, когда основную роль играют процессы взаимодействия заряженных и нейтральных частиц, определяющие пробой газовой среды и импульсный энерговклад. Исследование характеристик разряда при нестационарном газодинамическом процессе движения ударной волны по газоплазменной среде с переменными параметрами может дать информацию о кинетических процессах в плазме, что также определяет актуальность поставленных в диссертационной работе задач.

Во второй главе описывается экспериментальная установка и диагностическое оборудование. Исследования проводились на ударной трубе с разрядной камерой, в которой инициировались комбинированный объёмный и поверхностные скользящие разряды (рис. 1). Ударная труба включает камеры высокого и низкого давления, разделённые диафрагмой. Камера низкого давления имеет общую длину 290 см и состоит из отдельных секций, изготовленных из медного волновода с внутренним сечением 24×48 мм^2. Камера высокого давления соединена с баллоном со сжатым гелием, который является толкающим газом. После разрушения диафрагмы формируется ударная волна, движущаяся по прямолинейному каналу с постоянной скоростью, и спутный поток с однородными параметрами за ней. Скорость ударной волны измеряется базовым методом с помощью сигналов пьезоэлектрических датчиков давления, подключённых к цифровому осциллографу Tektronix TPS 2014. Эксперименты по исследованию разрядов проводились в неподвижном воздухе при начальных давлениях 2–185 торр и в присутствии ударных волн с числами Маха 1.90-5.00 при давлениях 3-50 торр перед фронтом.

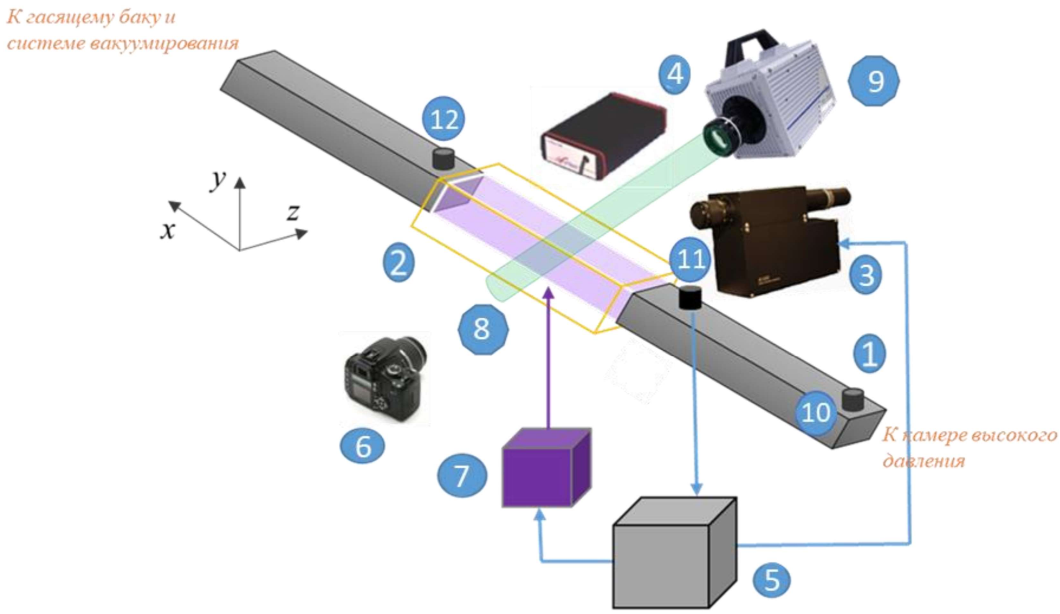


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 - ударная труба, 2 - разрядная камера, 3 - высокоскоростные камеры BIFO, 4 - спектрометр, 5 - генератор импульсов, 6 – фотоаппарат, 7 - блок запуска разряда, 8 – ход лучей системы теневого зондирования; 9 – высокоскоростная цифровая видеокамера теневой сьемки; 10, 11, 12 – пьезодатчики давления.

В камеру низкого давления ударной трубы встроена разрядная камера, внутренняя область которой является продолжением камеры низкого давления. Две стенки разрядной камеры представляют собой плоскопараллельные кварцевые стёкла длиной 197 мм, высотой 24 мм, шириной 16 мм, выполненные из кварца с полосой пропускания λ=200-2800 нм. На двух других противоположных стенках разрядной камеры на расстоянии 24 мм друг от друга инициировались импульсные поверхностные скользящие разряды площадью 30×100 мм^2, протяженностью 100 мм в направлении движения ударной волны. Они обеспечивали предыонизацию объема, и при концентрации электронов ~10^{11} см$^{-3}$ и разности потенциалов между ними формировался объемный разряд в объеме $24\times30\times100$ мм^3. Электрическая схема разрядов показана на рис. 2.

Синхронизация процессов при проведении экспериментов с ударной волной проводилась следующим образом. При прохождении ударной волной пьезодатчика 11 (рис. 1) формируется сигнал и направляется на генератор импульсов; генератор импульсов передает сигналы на блок запуска разряда и на запуск регистрирующей аппаратуры. Таким образом, в заданный момент времени на определенной стадии движения ударной волны в разрядной камере инициировался разряд и осуществлялась диагностика.

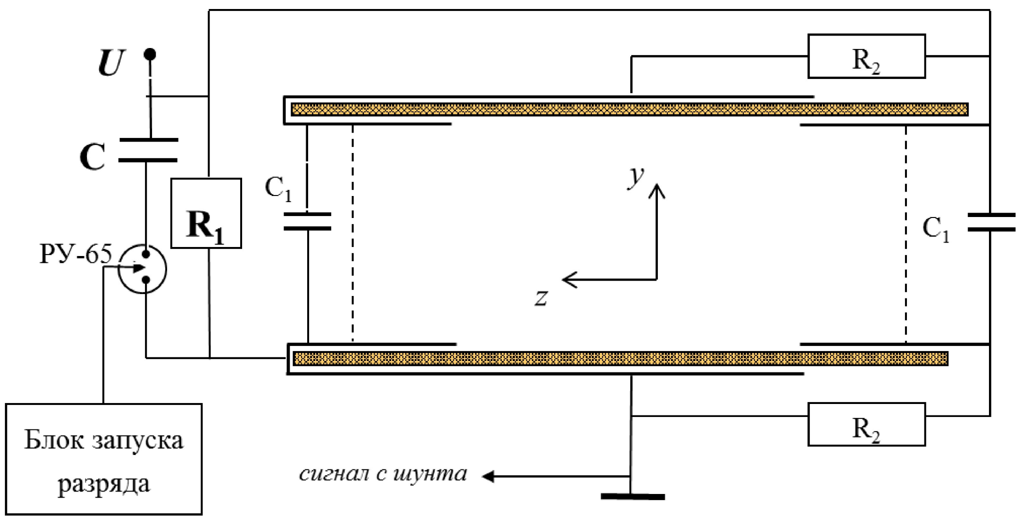


Рис. 2. Электрическая схема разрядов; пунктиром показаны элементы контура при инициировании поверхностных разрядов. С = 2300 пФ, C_1 = 470 пФ, R_1 = 1 кОм, R_2=1,5 кОм.

В экспериментах регистрировались спектры излучения, развертки свечения разряда, девятикадровые изображения, осциллограммы тока и теневые изображения газодинамического течения после разряда. Интегральное свечение разряда фиксировалось фотоаппаратом, размещенным вблизи разрядного промежутка. Свечение разряда с наносекундным разрешением регистрировалась электронно-оптическими камерами БИФО К008 и К011 в виде разверток свечения или девятикадровых изображений соответственно. Спектральный диапазон чувствительности фотокатода камер составляет 370-850 нм. Спектры излучения разряда регистрировались спектрометром AvaSpec-2048FT с диапазоном длин волн 200-1100 нм через кварцевые стекла разрядной камеры. Регистрировался спектр однократного разряда. Световод спектрометра собирал излучение из определенной части исследуемого участка разрядной области.

Схема расположения регистрирующих приборов при теневой регистрации показана на рис. 3. Теневые изображения газодинамического поля течения после разряда регистрировались высокоскоростной камерой с частотой кадров до 750000 к/с, временем экспозиции 1 мкс. Оптическая система теневого зондирования формировала излучение лазера (532 нм) и направляла его перпендикулярно стеклам разрядной камеры. Протяженность разрядной области вдоль направления движения ударной волны составляла 100 мм; конец электродов принимался за нулевое значение координаты *x*. Положение фронта ударной волны внутри разрядной области соответствовало -30 мм $\leq x \leq 0$, а за его пределами – $0 < x \leq 20$ мм. За время протекания тока разряда фронт ударной волны в канале ударной трубы смещался менее чем на 0.5 мм.

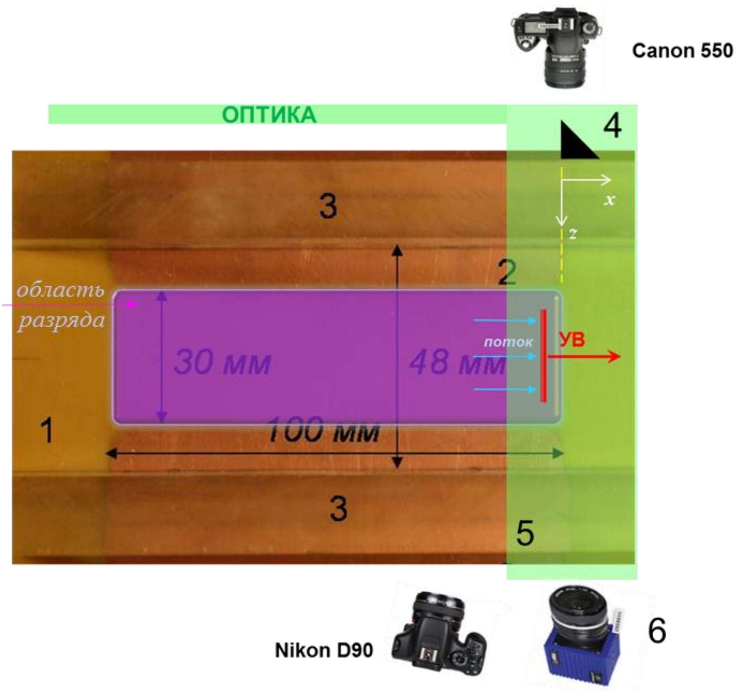
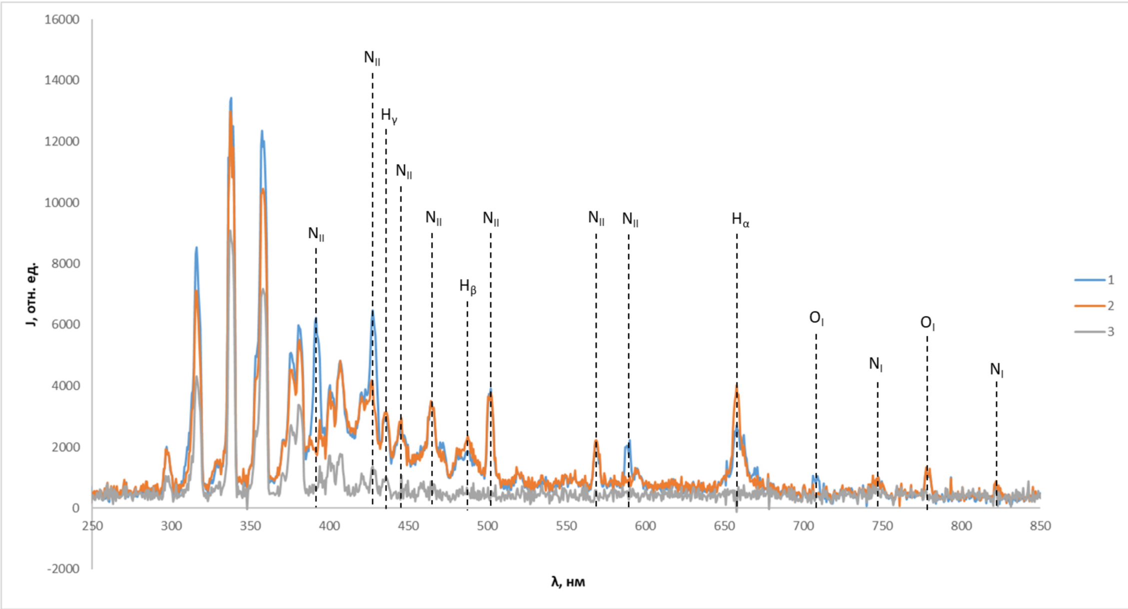
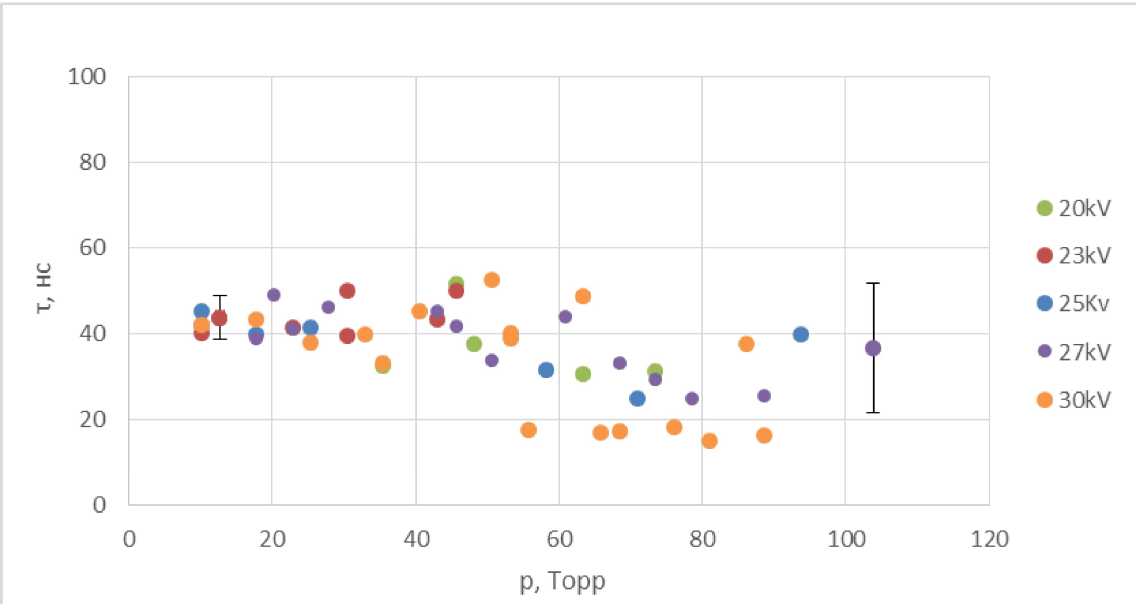


Рис. 3. Схема теневого зондирования течения в разрядной камере: 1 – диэлектрик (стеклотекстолит), 2 – электроды поверхностного скользящего разряда, 3 – положение кварцевых стёкол, 4 – маркер на краю разрядного промежутка, 5 – зондирующий пучок, 6 – высокоскоростная видеокамера.

В главе 3 приводятся результаты исследования комбинированного объёмного разряда в неподвижном воздухе и в потоках воздуха с плоской ударной волной при различных положениях фронта ударной волны относительно разрядного объема. Разряд исследован в неподвижном воздухе при давлениях 5-110 торр, напряжениях 20-30 кВ. Проведенные исследования показали, что спектры излучения разряда в неподвижном воздухе главным образом определяются полосами второй положительной системы азота в диапазоне 280-500 нм. Полная длительность свечения разряда зависит от давления воздуха и напряжения на разрядном промежутке. По разверткам свечения, полученным с помощью камеры К008, определялись времена затухания свечения объемной фазы комбинированного разряда. Определено, что время затухания свечения τ слабо уменьшается с ростом давления в неподвижном воздухе (рис. 4 а). Времена затухания свечения при давлении 10-20 торр близки к времени жизни состояния $C^3\Pi_u$ азота (~40 нс). Это косвенно свидетельствует о том, что основной вклад в излучение вносит вторая положительная система азота (переход $C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g$). На спектре (рис.4 а (3)) видно, что основной вклад в излучение разряда в неподвижном воздухе вносит вторая положительная система азота. Длительность тока разряда в неподвижном воздухе составляет около 400 нс. Основная часть энерговклада приходится на первый полупериод тока, то есть происходит в течение 120-150 нс.



а)



б)

Рис. 4. а) Спектры излучения объемного разряда: 1, 2 – при взаимодействии с ударными волнами – M=3.19, x= - 9 мм (1), M=3.26, x= - 13 мм (2) при давлении перед фронтом 20 торр; 3 – в неподвижном воздухе при давлении 20 торр. Показаны линии излучения атомов водорода (H_α, H_β, H_γ) и кислорода (O_I), атомов (N_I) и атомарных ионов (N_{II}) азота. б) Зависимость времени затухания свечения объемного разряда от давления в неподвижном воздухе при напряжениях 20-30 кВ.

В присутствии ударной волны эксперименты по регистрации свечения проводились при числах Маха ударных волн M=3.00-5.00, давлениях 3–30 торр, напряжении 25-30 кВ. Положение фронта ударной волны задавалось в пределах $-20 \le x \le 20$ мм. Когда ударная волна находится внутри разрядного промежутка, свечение разряда локализуется перед фронтом ударной волны, в области низкого давления, т.е. повышенного значения приведенной напряженности электрического поля (рис. 5 б-в). Когда ударная волна находится вблизи конца разрядного промежутка, свечение разряда также сосредоточено в области фронта (рис. 5 г). Когда ударная волна находится за пределами разрядного объема, свечение комбинированного объемного разряда видоизменяется: свечение поверхностных разрядов приобретает П-образную конфигурацию, содержащую фронт ударной волны, а свечение объемной части разряда сосредоточено в узкой области вблизи фронта (рис. 5 д). При $x > 13$ мм разряд инициируется в спутном потоке за ударной волной, не взаимодействуя с фронтом ударной волны (рис. 5 е).

При инициировании разряда в присутствии ударной волны при $-20 \leq x \leq 13$ мм длительность тока разряда составляет около 600 нс, полная длительность свечения плазменной области могла превышать 2 мкс (рис. 6 а). Временные зависимости интенсивности свечения разряда при взаимодействии с ударной волной имели два максимума и две области затухания свечения (рис. 6 а). Времена затухания свечения составляли 150-450 нс на первом интервале и 600-1000 нс на втором. Различие двух времен затухания указывает на различие кинетических процессов на разных временных интервалах при взаимодействии разряда с ударной волной.

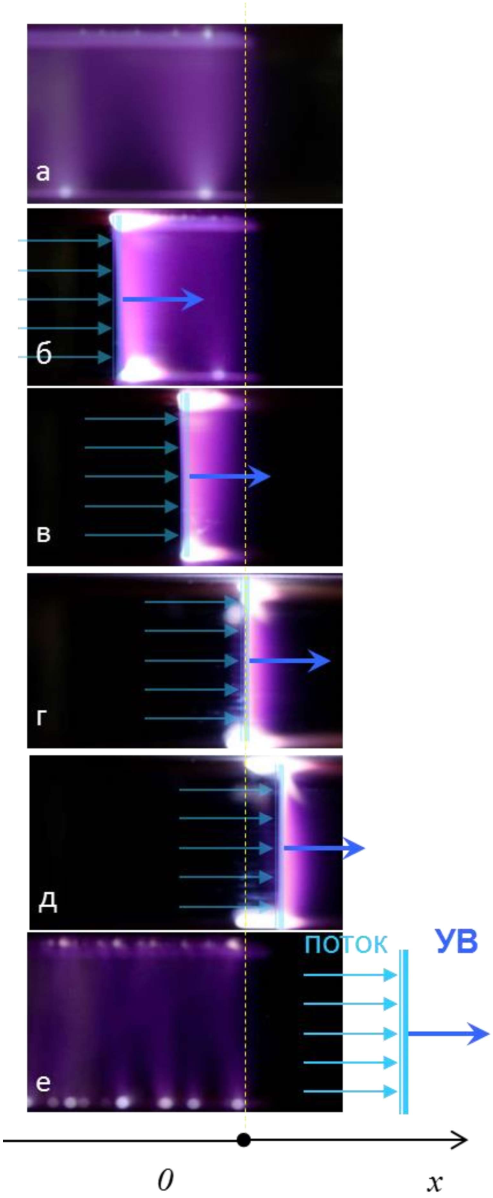
Зависимость максимума тока разряда от положения фронта ударной волны относительно края разрядного объема в момент инициирования разряда (рис. 6 б) показывает, что чем дальше фронт ударной волны выходит за пределы разрядного промежутка, тем сильнее уменьшается максимум тока разряда.

Для определения причины длительного послесвечения после взаимодействия комбинированного объемного разряда с ударной волной была проведена оценка характерных времен протекания реакций, которые вносят основной вклад в излучение. Анализ полученных экспериментальных результатов показал, что в течение 5 мкс после завершения тока разряда в основном проходят реакции тушения состояния $C^3\Pi_u$, соответствующие излучению второй положительной системы азота. Динамика излучения в послеразрядный период может быть связана с заселением состояний $C^3\Pi_u$ и $B^3\Pi_g$, которые образуются при столкновениях молекул азота в метастабильном состоянии $A^3\Sigma_u^+$ в реакциях (1-3) [1].

$$N_2 (A^3\Sigma_u^+) + N_2 (A^3\Sigma_u^+) \rightarrow N_2 (C^3\Pi_u, v_c=0\text{-}4) + N_2 (X^1\Sigma_g^+, v=0) \qquad (1)$$

$$N_2 (A^3\Sigma_u^+) + N_2 (B^3\Pi_g) \rightarrow N_2 (C^3\Pi_u, v_c=0\text{-}4) + N_2 (X^1\Sigma_g^+, v=0) \qquad (2)$$

$$N_2 (A^3\Sigma_u^+) + N_2 (A^3\Sigma_u^+) \rightarrow N_2 (B^3\Pi_g) + N_2 (X^1\Sigma_g^+) \qquad (3)$$



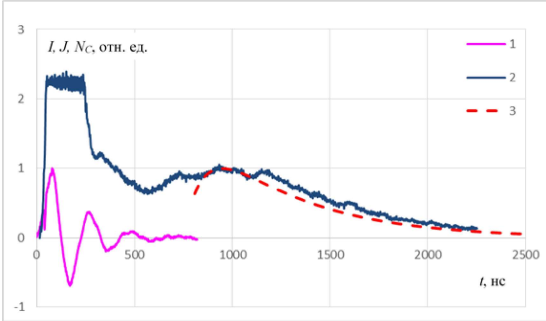


Рис. 6 а. Ток объемного разряда (1), интенсивность излучения вблизи фронта ударной волны (2), концентрация состояния N_2 $C^3\Pi_u$ (3, расчет) при взаимодействии с фронтом ударной волны. Число Маха ударной волны 3.20, давление перед фронтом 20 торр, *x*= -5 мм.

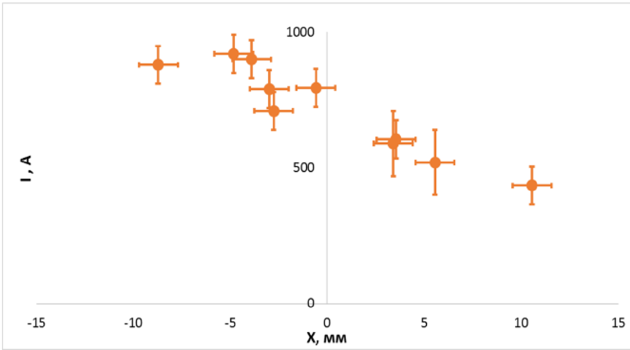


Рис. 5. Свечение объемного разряда: а) в неподвижном воздухе, б-д) с фронтом ударной волны, е) в потоке за ударной волной.

Рис. 6 б. Зависимость максимума тока разряда от положения фронта ударной волны. Напряжение 25 кВ. Числа Маха ударных волн 3.10-3.50.

На основе оценок характерных времен протекания процессов оценок сделан вывод о преимущественном заселении излучающего состояния азота в результате реакции (1). В итоге рассматривалось следующее уравнение:

$$\frac{dN_C}{dt} = -AN_C + K_2 N_A^2 \qquad (4)$$

В правой части уравнения (4) первое и второе слагаемые включают реакции тушения и заселения состояния $C^3\Pi_u$. Характерные длительности этих процессов составляют около 40 нс и 1000 нс соответственно, определяя излучение разряда на временном интервале до 5 мкс. На основе уравнения (4) был проведен расчет зависимости концентрации состояния $C^3\Pi_u$ азота от времени (рис. 6 а). В качестве начального условия в плазменной области задавалась временная зависимость концентрации молекул азота в состоянии $A^3\Sigma_u^+$ [2]. Учитывалось, что концентрация молекул азота в этом состоянии повышается в результате ударного сжатия при прохождении ударной волны по плазменной области. Видно хорошее соответствие расчетной зависимости и динамики излучения после разряда (рис. 6 а), когда в течение 200 нс после окончания тока разряда наблюдается возрастание интенсивности излучения, а затем ее спад с характерным временем около 600 нс. Ток I (t) на рисунке нормирован на максимум; интенсивность свечения J (t) и расчетная зависимость N_C (t) – на максимальное значение после окончания разряда. Так как интенсивность излучения пропорциональна концентрации молекул в состоянии $C^3\Pi_u$, то расчетная зависимость достаточно хорошо описывает экспериментальную динамику свечения в области фронта ударной волны. Без учета взаимодействия плазменной области с ударной волной расчет дает монотонный спад заселенности излучающего состояния после окончания разряда.

В главе 4 описаны результаты исследования импульсного поверхностного скользящего разряда в неподвижном воздухе при давлениях 2-185 торр, напряжении 25 кВ и при взаимодействии с плоской ударной волной при различных положениях фронта ударной волны относительно разрядной области.

Импульсный скользящий поверхностный разряд развивается в тонком газовом слое вблизи поверхности диэлектрика при подаче импульсного напряжения на систему электродов специальной конфигурации (рис. 2). Спектр излучения поверхностного скользящего разряда в основном определяют полосы второй положительной системы азота. При инициировании разряда в неподвижном воздухе основной энерговклад в газ происходит в течение первого полупериода тока разряда, как показала обработка осциллограмм тока, зарегистрированных при разных напряжениях и давлениях воздуха.

Анализ девятикадровых изображений и разверток показал, что свечение поверхностного скользящего разряда в неподвижном воздухе определяется диффузным свечением и свечением ярких каналов (рис. 7). Диффузное свечение хорошо наблюдается при давлении до 90 торр, а при более высоких давлениях преобладает излучение ярких каналов. Пульсации свечения ярких каналов (рис. 7 а) коррелируют с осцилляциями тока разряда (рис. 7 б). Полная длительность диффузного свечения разряда не превышает 200 нс, длительность свечения ярких каналов может превышать 2500 нс. По разверткам свечения разряда в неподвижном воздухе определялись времена затухания диффузного свечения и излучения ярких каналов разряда при различных давлениях (рис. 8), связанные со временем жизни возбужденных молекул в плазме.

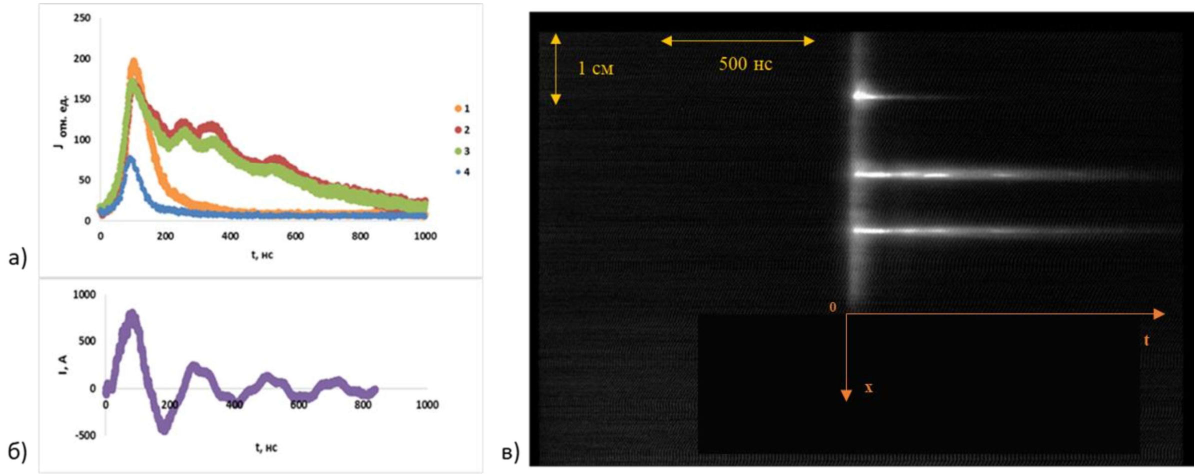


Рис. 7. а) Временные зависимости интенсивности свечения ярких (1-3) и диффузных (4) каналов поверхностного скользящего разряда; б) ток разряда; в) развертка свечения. Давление 25 торр, напряжение 25 кВ.

Время затухания диффузного излучения при давлении до 60 Торр близко к времени жизни излучающего состояния азота $C^3\Pi_u$ (~ 40 нс), с ростом давления время затухания увеличивается до 100 нс (рис. 8). Времена затухания излучения ярких каналов разной интенсивности выше и лежат в пределах 100-350 нс, определяясь заселением состояния $C^3\Pi_u$ при столкновениях молекул азота в метастабильном состоянии $A^3\Sigma_u^+$ в реакциях (1-3).

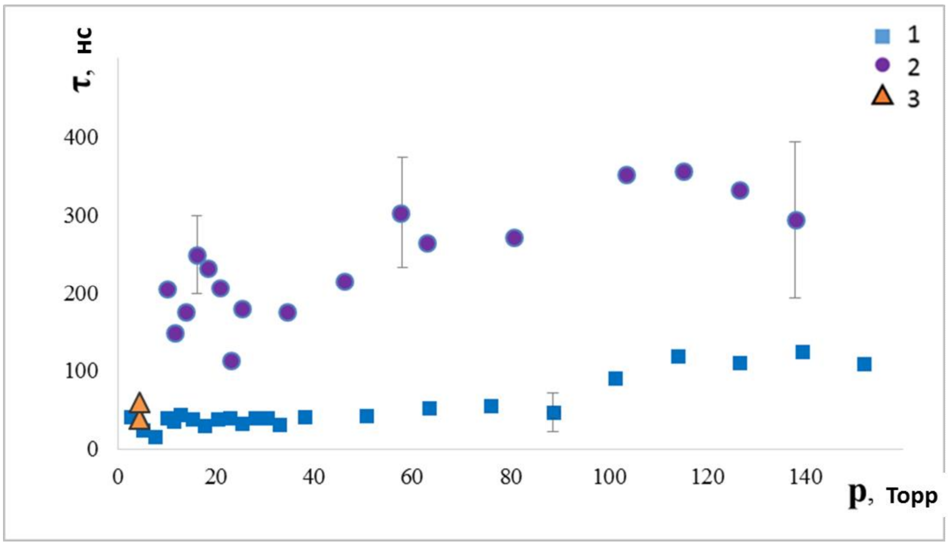


Рис. 8. Времена затухания свечения диффузных (1) и ярких (2) каналов поверхностного скользящего разряда в зависимости от давления воздуха; время спада заселенности состояния $N_2(C^3\Pi_u)$ в ближнем послесвечении наносекундного объемного разряда при давлении воздуха 4,6 торр (3) [2].

Эксперименты по исследованию взаимодействия поверхностных скользящих разрядов с ударной волной проводились при числах Маха ударных волн 2.80-3.45, давлении 10-30 торр перед фронтом ударной волны, напряжении 25 кВ. Проведенное исследование показало, что геометрия протекания тока наносекундного поверхностного скользящего разряда, пространственно-временные характеристики излучения зависят от характера взаимодействия разряда с фронтом ударной волны.

Обнаружено, что осциллограммы тока слабо зависят от положения фронта ударной волны, когда он находится внутри разрядной области в момент инициирования разряда. При расположении фронта ударной волны за пределами разрядной области в момент инициирования разряда при $0 \le x \le 14$ мм максимум тока уменьшается, а длительность первого полупериода увеличивается. Это связано с тем, что в этом случае ток поверхностных разрядов протекает по П-образным каналам, охватывающим фронт ударной волны. Из-за этого эффективная длина проводника увеличивается, а максимум тока разряда уменьшается. На рис. 9 показана зависимость максимума тока разряда и длительность первого полупериода от положения ударной волны относительно разрядного промежутка. При x > 14 мм ток поверхностных скользящих разрядов протекает в спутном потоке; разряды не взаимодействуют с фронтом исходной ударной волны.

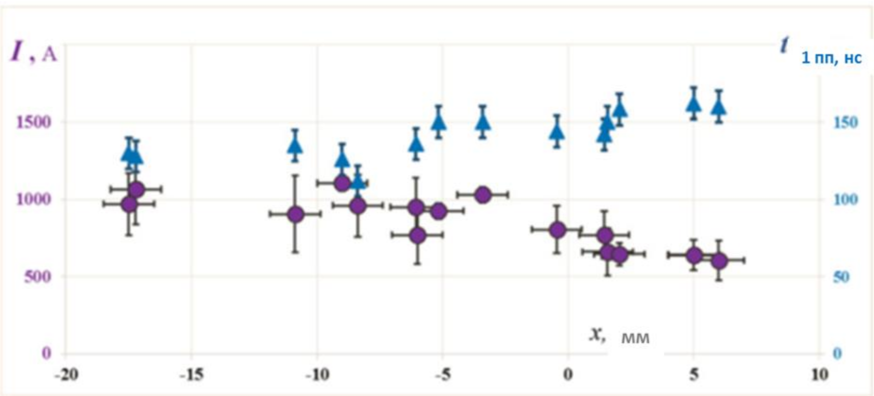


Рис. 9. Зависимость максимального поверхностного скользящего тока разряда и длительности первого полупериода тока от положения фронта ударной волны. Число Маха ударной волны 3.10, напряжение 25 кВ.

Регистрация свечения поверхностных скользящих разрядов с наносекундным разрешением показала характерные особенности пространственно-временного распределения свечения при взаимодействии с фронтом плоской ударной волны. На рис. 10 показаны фотоизображения и девятикадровые изображения свечения разряда при расположении ударной волны на конце разрядной области и за ее пределами в момент инициирования разряда. В первом случае ток поверхностного разряда проходит по плоскости фронта ударной волны (рис. 10 а, б). Свечение поверхностного разряда сосредоточено в виде одиночного канала вблизи фронта ударной волны, что отчетливо видно на фотоизображении (рис. 10 б). На 1-3 кадрах девятикадровой серии изображений (рис. 10 а) наблюдается изменение свечения канала, связанное с осцилляциями тока разряда. На 4-9 кадрах видно постепенное затухание свечения канала, полная длительность которого превышает 2,5 мкс.

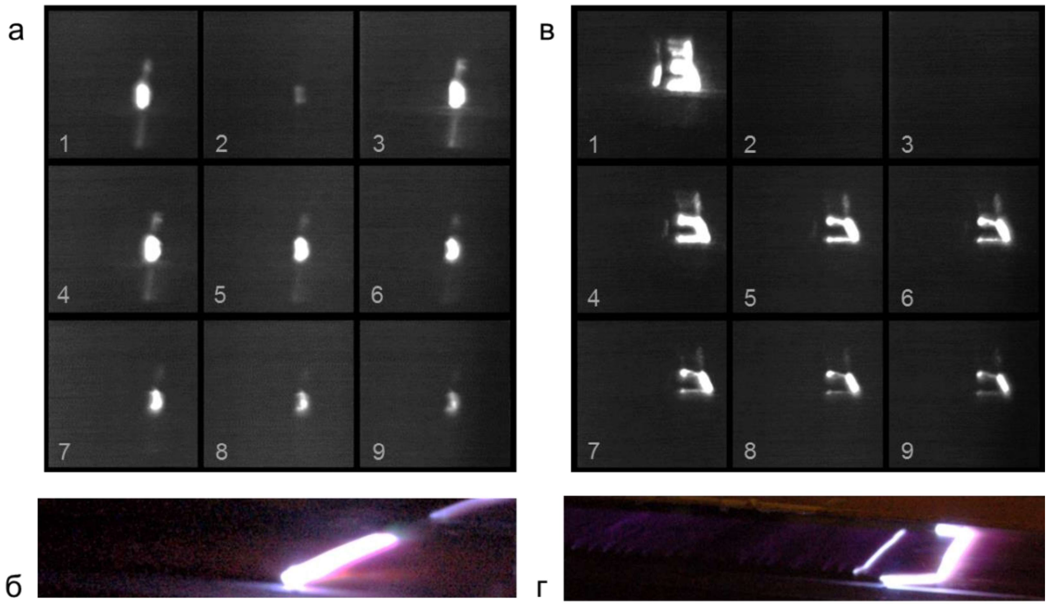


Рис. 10. Девятикадровые изображения (а, в) и фотоизображения (б, г) поверхностного скользящего разряда в присутствии ударной волны. Число Маха ударной волны 3.10, давление перед фронтом 17 торр, экспозиция/пауза – 100/200 нс. Положение ударной волны: x ~ 0 мм (а, б), x = 10 мм (в, г).

При расположении фронта ударной волны вне разрядной области в момент инициирования разряда (рис. 10 в, г) ток поверхностного скользящего разряда проходит по ярко выраженному П-образному каналу. На 1-3 кадрах девятикадровой серии изображений (рис. 10 в) интенсивность свечения изменяется из-за с осцилляций тока, на 4-9 кадрах видно постепенное затухание излучения канала; длительность свечения превышает 2,5 мкс.

Эксперименты показали, что длительность излучения поверхностного скользящего разряда, взаимодействующего с фронтом ударной волны, значительно больше длительности свечения каналов разряда в неподвижном воздухе, и зависит от исходного положения плоской ударной волны в разрядной области. Динамика излучения характеризуется тем, что после прекращения тока разряда наблюдается нарастание интенсивности излучения в течение 200-300 нс, а затем постепенное затухание (рис. 11 *а* (3)). Время затухания излучения разряда, взаимодействующего с ударной волной, определяется числом Маха ударной волны и начальным положением фронта и может достигать 2500 нс. Подобные особенности излучения наблюдались при взаимодействии объемного разряда с ударной волной. Следовательно, в случае взаимодействия плазменной области с плоской ударной волной динамику свечения нужно рассматривать с учетом движения газодинамических разрывов, образовавшихся после инициирования разряда. При импульсном энерговкладе происходят распады газодинамических разрывов на границах плазма-воздух. В результате распада разрыва на фронте исходной ударной волны образуются контактная поверхность и две ударные волны, одна из которых движется по области рекомбинирующей и релаксирующей плазмы, сжимая ее и создавая зону с повышенной концентрацией молекул азота в возбужденных состояниях.

Было проведено моделирование зависимости заселенности состояния N_2 ($C^3\Pi_u$) от времени при движении плоской ударной волны по приповерхностной плазменной области в соответствии с реакциями (1-3) после прекращения тока разряда. В качестве начального условия в области движения ударной волны задавалась временная зависимость концентрации молекул азота в состоянии $A^3\Sigma_u^+$ [2]. При повышенной после прохождения ударной волны концентрации молекул азота в этом состоянии повышается заселенность излучающего состояния $C^3\Pi_u$, что приводит к продолжительному послесвечению узкой области вблизи фронта ударной волны. Полученная модельная зависимость (рис. 11 *а* (4)) хорошо коррелирует с экспериментальной зависимостью интенсивности излучения поверхностного скользящего разряда в присутствии плоской ударной волны (рис. 11 *а* (3)). Таким образом, наблюдаемая динамика излучения разряда, взаимодействующего с фронтом ударной волны, определяется динамикой заселенности состояния $C^3\Pi_u$ молекулярного азота при ударном сжатии области релаксирующего газа в условиях проведенных экспериментов.

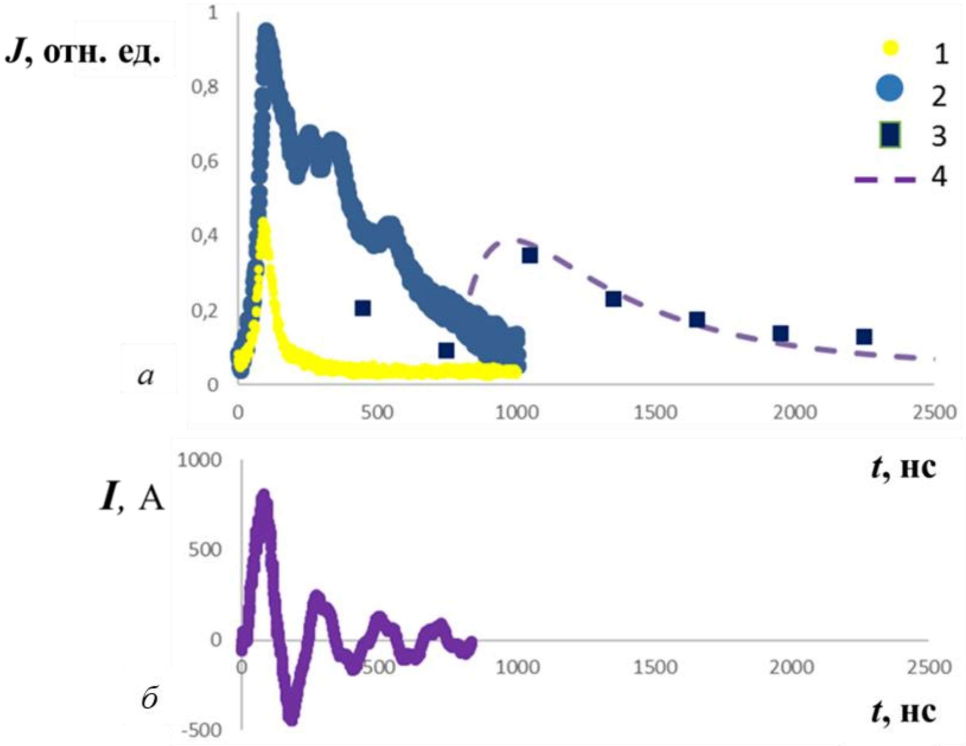


Рис. 11. Временные зависимости: *а* – интенсивности свечения диффузного (1) и яркого (2) каналов разряда в неподвижном воздухе при давлении 25 торр; интенсивности свечения разряда, взаимодействующего с фронтом ударной волны (3); заселенности состояния N_2 ($C^3\Pi_u$) (4), расчет; *б* – тока разряда в неподвижном воздухе при давлении 25 торр.

В главе 5 приведены результаты исследования газодинамического поля течения после взаимодействия наносекундных сильноточных поверхностного скользящего и комбинированного объемного разрядов с фронтом плоской ударной волны на основе высокоскоростной теневой съемки. При наносекундной длительности разрядов происходит быстрое изменение состояния газа, в том числе быстрый нагрев в области энерговклада, что приводит к распаду газодинамических разрывов на границах газ-плазма [3] (рис. 12 а). Для осуществления плазменного воздействия на высокоскоростные потоки необходимо определить характер формирования и движения газодинамических разрывов после разряда.

Теневая визуализация и анализ поля течения проводились в течение ~100 мкс после взаимодействия разрядов с плоской ударной волной, находящейся внутри разрядного объема и вне его. Соответственно положение фронта ударной волны внутри разрядного объема соответствовало $x \leq 0$, а за пределами разрядного объема $x > 0$.

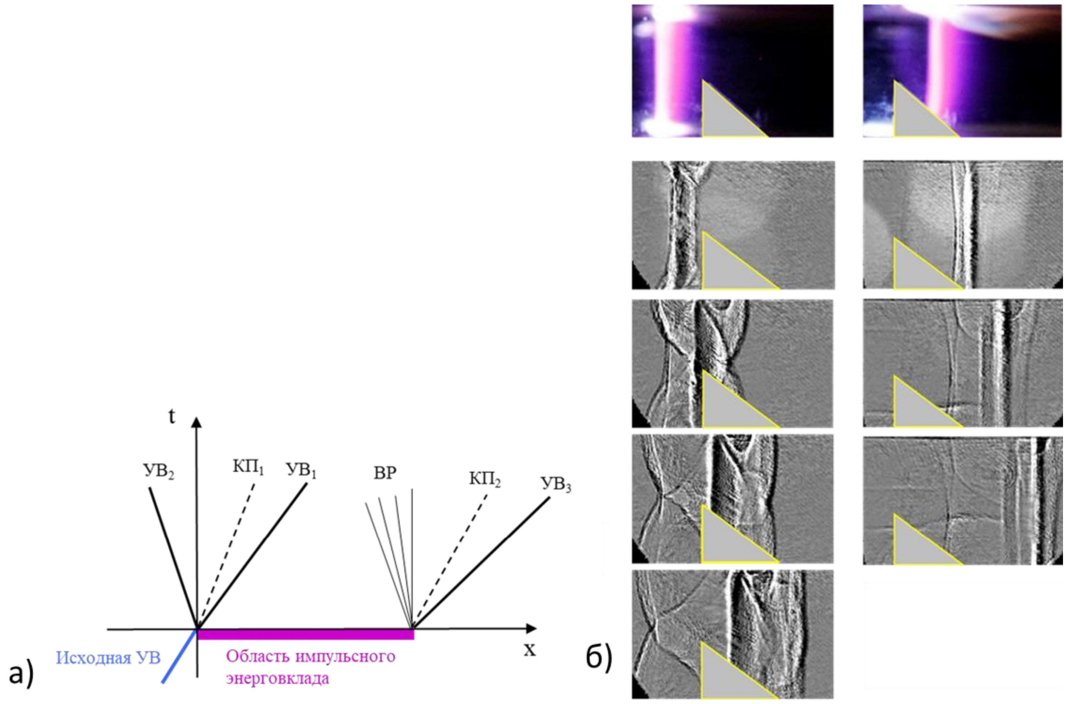


Рис. 12. а) *Xt*-диаграмма движения разрывов после импульсного энерговклада перед фронтом ударной волны; б) изображения свечения разряда (верхний ряд) и теневые изображения поля течения при x= -7 мм (слева) и при x= 8 мм (справа). Маркер показывает край разрядного объема. Исходная ударная волна движется слева направо. Время между кадрами 6.7 мкс.

Поле течения после взаимодействия комбинированного объемного разряда исследовалось при числах Маха плоских ударных волн 1.90-3.50 при $-30 \leq x \leq 20$ мм. В зависимости от положения плоской ударной волны ток объемного разряда может протекать перед фронтом (по области низкой плотности) и по фронту ударной волны (рис. 5). Объемный энерговклад в газ в первом случае реализуется перед фронтом ударной волны, во втором – в узкой области вблизи фронта. Ток поверхностных скользящих разрядов, кроме того, может протекать по П-образным каналам, включающим фронт исходной ударной волны (рис. 10 в, г).

Высокоскоростное теневое зондирование показало особенности формирования и движения ударно-волновых конфигураций после разряда при разных начальных условиях. На рис. 12 б слева показаны свечение разряда и последовательность теневых изображений после взаимодействия ударной волны с числом Маха 2.17 с областью объемного разряда. При распаде исходной плоской ударной волны в плоскости симметрии течения на границе спутный поток-плазма образуются две ударные волны $УВ_1$, $УВ_2$ и контактная поверхность $КП_1$, а на границе плазма-неподвижный воздух образуются ударная волна $УВ_3$, контактная поверхность $КП_2$ и волна разрежения ВР (рис. 12 а). Образовавшаяся ударно-волновая конфигурация сосредоточена в узкой области. Поверхностные разряды на верхней и нижней стенках инициируют ударные волны, движущиеся в поперечном направлении к фронту исходной ударной волны и влияющие на структуру течения в целом. Ударно-волновая конфигурация изменяется с течением времени в результате движения и взаимодействия всех волн друг с другом. Ударная волна $УВ_1$ движется вправо по области релаксирующей газоразрядной плазмы, сжимая ее, что приводит, согласно проведенным исследованиям, к длительному послесвечению разрядной области. Ударная волна $УВ_2$ может двигаться влево или вправо в зависимости от числа Маха исходной ударной волны. При x= 8 мм, числе Маха исходной ударной волны 2.27 (рис. 12 б справа) объемный энерговклад реализуется в узкой области шириной около 1 мм, близкой к плоской. От нее движутся в обе стороны ударные волны и контактные поверхности. Ударные волны от П-образных каналов поверхностных разрядов воздействуют на образовавшуюся конфигурацию разрывов слева, и фронты ударной волны $УВ_1$ и контактной поверхности $КП_1$ практически не искажаются и остаются плоскими. Ударная волна $УВ_1$ взаимодействует с узкой плазменной областью около 1 мкс, затем движется в неподвижном воздухе за пределами разрядного объема. Из Xt- диаграмм движения разрывов определено, что скорость движения ударной волны $УВ_1$ выше скорости исходной ударной волны.

Визуализация поля течения после взаимодействия поверхностных скользящих разрядов с ударной волной проводилась в экспериментах при числах Маха исходных ударных волн 2.60-3.60. При поверхностном энерговкладе также возникают условия распада разрыва на фронте ударной волны в пристеночной области. Теневые исследования показали формирование сложной ударно-волновой конфигурации, содержащей ударные волны и контактные поверхности после инициирования поверхностных разрядов с фронтом плоской ударной волны в разрядной области (рис. 13-15). Удельный энерговклад в приповерхностные области больше, чем при инициировании комбинированного объемного разряда. На теневых изображениях рис. 13 видно, как фронт плоской ударной волны взаимодействует с идущими навстречу друг другу возмущениями от верхнего и нижнего поверхностных скользящих разрядов. На рис. 13 б-г видно, что они распространяются симметрично и взаимодействуют друг с другом через 5-7 мкс после инициирования разряда. На рис. 13 б искажены пристеночные области фронта исходной ударной волны, далее модифицирован весь фронт. Вблизи фронта ударной волны у верхней и нижней стенок видны более масштабные вихри, чем образующиеся в случае инициирования комбинированного объемного разряда (см. рис. 12 б). На рис. 14 и 15 в потоке за ударной волной наблюдаются идущие навстречу друг другу ударные волны от П-образных разрядных каналов, которые влияют на формирующуюся ударно-волновую конфигурацию слева.

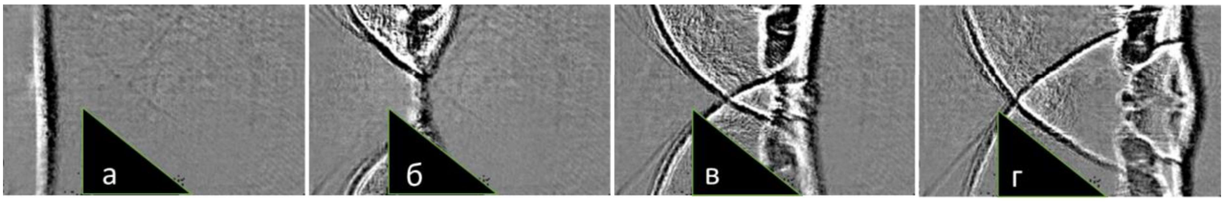


Рис. 13. Последовательность теневых изображений поля течения после поверхностных скользящих разрядов при x = 0 мм, числе Маха исходной ударной волны 3.03. Время между кадрами 6.7 мкс.

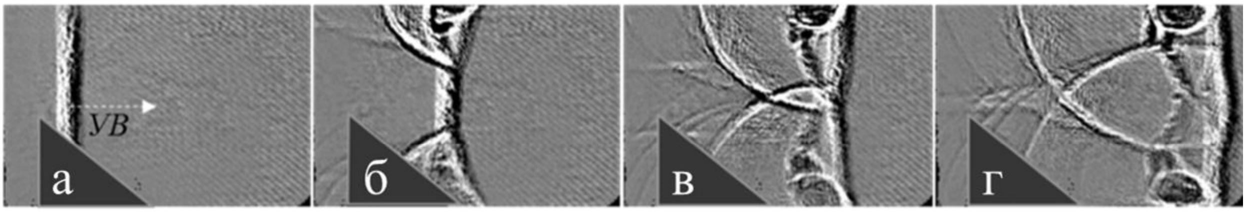


Рис. 14. Последовательность теневых изображений поля течения после поверхностных скользящих разрядов при x = 4 мм, числе Маха исходной ударной волны 3.00. Время между кадрами 6.7 мкс.

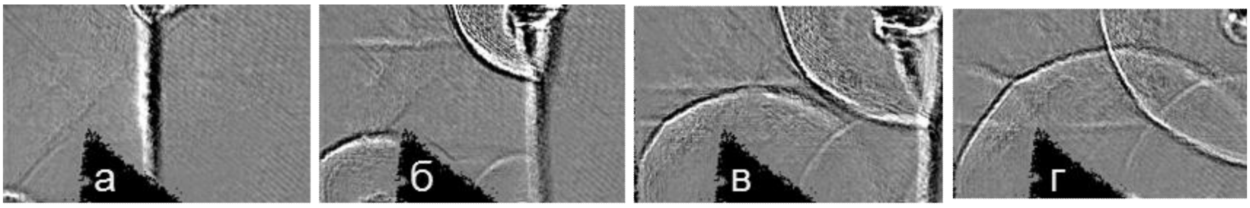


Рис. 15. Последовательность теневых изображений поля течения после поверхностных скользящих разрядов при x=7 мм, числе Маха исходной ударной волны 3.09. Время между кадрами 6.7 мкс.

Таким образом, экспериментально показано, что при инициировании сильноточных наносекундных разрядов в неоднородных потоках с фронтом ударной волны в разрядной камере ударной трубы происходит пространственное перераспределение тока разрядов. Распады разрывов вблизи фронта исходной ударной волны после разрядов проходят различным образом, в зависимости от числа Маха и положения фронта ударной волны в момент инициирования разряда. Это приводит к распространению набора возмущений, влияющих на структуру течения в канале. Разряды такого типа могут быть эффективным источником энерговложения в газ вблизи скачков уплотнения, приводя к нестационарному воздействию на течение продолжительностью, значительно превышающей длительность разряда.

В **заключении** кратко сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы:

1. Впервые экспериментально зарегистрировано с наносекундным разрешением пространственно-временное распределение излучения наносекундных сильноточных разрядов в воздухе – комбинированного

объёмного и поверхностного скользящего – при их взаимодействии с плоскими ударными волнами с числами Маха 1.90-5.00, находящимися внутри разрядного объема и за его пределами: получены девятикадровые изображения и развертки свечения с одновременной регистрацией спектров излучения и тока разрядов.

2. Экспериментально установлено, что при инициировании комбинированного объёмного и поверхностных скользящих разрядов с ударной волной вне разрядной области происходит пространственное перераспределение тока разрядов: ток поверхностных разрядов протекает по П-образным каналам, содержащим фронт ударной волны, а ток объемного разряда сосредоточен в области низкой плотности вблизи фронта ударной волны. Для комбинированного объёмного и поверхностных скользящих разрядов определены положения фронта, при которых разряды инициируются в спутном потоке за ударной волной.

3. Установлена зависимость тока комбинированного объёмного и поверхностных скользящих разрядов от положения фронта ударной волны относительно разрядного промежутка в момент инициирования разряда.

4. Впервые исследована динамика свечения комбинированного объёмного и поверхностных скользящих разрядов при взаимодействии с ударной волной: обнаружено нарастание излучения в течение ~200-300 нс после разряда с последующим затуханием с характерным временем 600-2500 нс.

5. На основе экспериментальных временных зависимостей интенсивности излучения разрядов и рассмотрения столкновительно-излучательных процессов в воздухе проведено моделирование временных зависимостей заселенности состояния $C^3\Pi_u$ молекулярного азота в послеразрядный период с учетом ударного сжатия области газоразрядной плазмы. Показано хорошее соответствие расчетов и экспериментальных временных зависимостей интенсивности излучения наносекундных сильноточных разрядов при их взаимодействии с ударными волнами с числами Маха 1.90-5.00.

6. Впервые получены последовательности изображений поля течения с частотой 150000 к/с после комбинированного объёмного и поверхностных скользящих разрядов, взаимодействующих с ударной волной, находящейся за пределами разрядной области, на основе высокоскоростной теневой регистрации. Определен характер формирующихся газодинамических разрывов при различных начальных условиях и установлена зависимость результирующих ударно-волновых конфигураций от начального положения фронта ударной волны в момент инициирования разрядов.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Основные публикации по теме диссертации:

Статьи в рецензируемых научных изданиях, индексируемые в базах данных Web of Science и Scopus:

1. Mursenkova I.V., Kuznetsov A.Yu, Sazonov A.S. Unsteady interaction of nanosecond surface sliding discharge with plane shock wave. Applied Physics

Letters, том 115, № 11, с. 114102-1-114102-4, 2019. Импакт-фактор: 3.597 (Q1) (вклад 0.3).

2. Кузнецов А.Ю., Мурсенкова И.В., Уланов П.Ю. Динамика излучения наносекундного поверхностного скользящего разряда в потоке с ударной волной. ПЖТФ, том 45, № 24, с. 48-51 2019. Импакт-фактор: 0.942 (вклад 0.3). Dynamics of Radiation from Nanosecond Surface Sliding Discharge in Airflow with Shock Waves, Technical Physics Letters, том 45, № 12, с. 1266-1269. Импакт-фактор: 0.791 (вклад 0.3).

3. Znamenskaya I., Kuznetsov A., Mursenkova I., Doroschenko I. Discontinuities dynamics after the interaction of a plane shock wave with pulse volume discharge. Journal of Physics: Conference Series, том 1112, с. 012006-1-012006-6, 2018. Импакт-фактор: 0.54 (вклад 0.25).

4. Дорощенко И.А., Знаменская И.А., Кузнецов А.Ю., Мурсенкова И.В., Сысоев Н.Н. Исследование плазмодинамических процессов наносекундного диапазона при формировании ударных волн от импульсных разрядов. ЖТФ, № 5, с. 684-691, 2018. Импакт-фактор: 1.018 (вклад 0.2). Nanosecond-Range Processes in the Formation of Shock Waves from Pulsed Discharges, Technical Physics, том 63, № 5, с. 662-669. Импакт-фактор: 0.603 (вклад 0.2).

Статьи в других изданиях:

5. Кузнецов А.Ю., Мурсенкова И.В. Особенности излучения объемного наносекундного разряда в воздухе при взаимодействии с плоской ударной волной. Прикладная физика, № 5, с. 16-21, 2016. Импакт-фактор: 0.137 (РИНЦ) (вклад 0.5).

Статьи в сборниках:

1. Mursenkova I., Kuznetsov A., Ulanov P. Radiation of the sliding surface discharge interacting with the shock wave. Proceedings of XXXIV ICPIG & ICRP-10 (E-Book) Japan, с. PO18AM-034-1-2, 2019.

2. Mursenkova I., Kuznetsov A., Sazonov A., Znamenskaya I. The influence of high-speed airflow on characteristics of nanosecond sliding surface discharge. Proceedings of the XXII International Conference on Gas Discharges and their Applications, том 1, с. 279-282, 2018.

3. Знаменская И.А., Наумов Д.С., Дорощенко И.А., Кузнецов А.Ю., Луцкий А.Е. Цифровые технологии в анализе теневых изображений газоплазменных потоков. Graphicon 2018. Труды 28-й Международной конференции по компьютерной графике и машинному зрению, с. 131-133.

4. Мурсенкова И.В., Кузнецов А.Ю., Сазонов А.С. Экспериментальное исследование влияния импульсных скользящих разрядов на течение с ударной волной в канале. Материалы XII Международной конференции по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (NPNJ’2018), Россия, том 1, с. 278-280, 2018.

5. Kuznetsov A., Mursenkova I. Investigating the Nanosecond Combined Volume Discharge in Motionless Air and in Airflow with Shock Wave. Proceedings of the 25th Annual Conference of Doctoral Students – WDS 2016, Чехия. с. 103-107, 2016.

6. Doroschenko I., Ivanov I., Kuznetsov A., Mursenkova I., Znamenskaya I. Cylindrical shock waves investigation, produced by pulse discharge. 10 Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing (PSFVIP-10), Italy, с. 151_PSFVIP10.pdf 5-1-5-5, 2015.

<u>Тезисы докладов</u>:

1. Мурсенкова И.В., Уланов П.Ю., Кузнецов А. Ю., Ляо Ю. Параметры плазмы наносекундного поверхностного скользящего разряда в сверхзвуковом потоке воздуха. Сб. тез. докл. XLVIII Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС (Звенигород, 15-19 марта 2021 г.).

2. Мурсенкова И.В., Кузнецов А.Ю. Излучение наносекундных разрядов в сверхзвуковых потоках воздуха с ударными волнами, Всероссийская (с международным участием) конференция «Физика низкотемпературной плазмы» ФНТП-2020, Казань, с. 21-22, 2020.

3. Мурсенкова И.В., Кузнецов А.Ю., Ляо Ю., Сазонов А.С., Уланов П.Ю. Развитие наносекундного поверхностного скользящего разряда в сверхзвуковых потоках воздуха с градиентами плотности, Тез. докл. XLVII Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС, Москва, с. 193-193, 2020.

4. Мурсенкова И.В., Кузнецов А.Ю., Сазонов А.С., Уланов П.Ю. Излучение импульсного поверхностного скользящего разряда в сверхзвуковом потоке с ударной волной, Сб. тез. докл. XLVI Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС, Москва, с. 225-225, 2019.

5. Кузнецов А.Ю., Мурсенкова И.В., Знаменская И.А. Исследование поверхностного скользящего разряда в потоке с ударной волной, Ломоносовские чтения - 2019. Секция физики, Москва, с. 263-267, 2019.

6. Знаменская И.А., Мурсенкова И.В., Ляо Ю., Кузнецов А.Ю., Сысоев Н.Н. Исследование течения в пограничном слое канала за препятствием при импульсной ионизации плазменным листом, Тез. докл. XIX Всероссийской школы-семинара «Современные проблемы аэрогидродинамики», издательство МГУ (Москва), с. 51-51, 2019.

7. Znamenskaya I., Kuznetsov A., Mursenkova I., Doroschenko I. The motion of gas-dynamic discontinuities after the interaction of a plane shock wave with pulse discharge, Proceedings of the 17th Workshop on Magneto-Plasma Aerodynamics, JIHT RAS Moscow, с. 32-37, 2018.

8. Kuznetsov A., Mursenkova I., Znamenskaya I. Decay of radiation of the sliding surface discharge and the combined volume discharge, Proceedings of the XXXIII INTERNATIONAL CONFERENCE ON PHENOMENA IN IONIZED

GASES, Instituto de Plasmas e Fusao Nuclear, Instituto Superior Tecnico, Universidade de Lisboa Lisboa, Portugal, с. 139-139, 2017.

9. Знаменская И.А., Сысоев Н.Н., Мурсенкова И.В., Дорощенко И.А., Кузнецов А.Ю. Исследование плазмодинамических процессов наносекундного диапазона при формировании ударных волн от импульсных разрядов в сборнике Ломоносовские чтения - 2017. Секция физики, Физический факультет МГУ Москва, с. 259-262, 2017.

10. Кузнецов А.Ю. Особенности излучения наносекундного объёмного разряда при взаимодействии с плоской ударной волной, XXIII Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам «Ломоносов—2016». Секция «Физика», Физический факультет МГУ Москва, том 2, 2016.

11. Doroschenko I., Ivanov I.E., Kuznetsov A.Yu, Mursenkova I., Znamenskaya I. Cylindrical shock waves investigation, produced by pulse discharge, Abstracts of the 10 Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing (PSFVIP-10), University of Naples Federico II, Italy, с. 22-22, 2015.

12. Дорощенко И.А., Кузнецов А.Ю. Динамика ударных волн инициированных наносекундным локализованным разрядом, Сборник тезисов докладов XXII Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых "Ломоносов-2015", секция "Физика", 2015.

13. Дорощенко И.А., Знаменская И.А., Кузнецов А.Ю., Кули-заде Т.А., Минасянц Н.Д., Мурсенкова И.В., Наумов Д.С., Остапенко И.Ю. Динамика излучения импульсного объемного разряда в присутствии плоской ударной волны, Тезисы докладов XLI Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС, ЗАО НТЦ "ПЛАЗМАИОФАН" Москва, с. 311, 2014.

Список цитируемой литературы:

1. Лебедев Ю. А., Шахатов В. А. Диагностика неравновесной азотной плазмы по излучению второй положительной системы азота. Физика плазмы. 2006, Т. 32. № 1, с. 58-74.

2. Mintoussov E.I., Pendleton S.J., Gerbault F.G., Popov N.A., Starikovskaia S.M. Fast gas heating in nitrogen-oxygen discharge plasma: II. Energy exchange in the afterglow of a volume nanosecond discharge at moderate pressures. Phys. D: Appl. Phys. 2011. V.44, 285202.

3. Знаменская И. А., Луцкий А. Е. Исследование эволюции и взаимодействия разрывов течения в канале под действием импульсного вложения энергии. Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. М., 2005. 21 с.