

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ
М.В.ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Долбня Дарья Илларионовна

**ВОЗДЕЙСТВИЕ НАНОСЕКУНДНОГО
ОБЪЕМНОГО РАЗРЯДА НА
НЕСТАЦИОНАРНОЕ
ВЫСОКОСКОРОСТНОЕ ТЕЧЕНИЕ В
КАНАЛЕ**

Специальность 1.3.17 —

«Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных
состояний вещества»

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2023

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

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Знаменская Ирина Александровна

Официальные оппоненты: **Смирнов Николай Николаевич**,
доктор физико-математических наук, профессор,
МГУ имени М.В.Ломоносова, механико-математический факультет,
профессор

Азарова Ольга Алексеевна,
доктор физико-математических наук,
Федеральный исследовательский центр "Информатика и управление" РАН,
ведущий научный сотрудник,

Фирсов Александр Александрович,
кандидат физико-математических наук,
Объединенный институт высоких температур
РАН,
старший научный сотрудник

Защита состоится «21» сентября 2023 г. в 17:00 часов на заседании диссертационного совета МГУ 013.3 Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу: 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, физический факультет.

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В.Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/013.3/2580>.

Автореферат разослан «___» _____ 2023 г..

Ученый секретарь

диссертационного совета

МГУ 013.3, к.ф.-м.н., доцент

И.А. Малышкина

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования определяется важностью изучения с практической точки зрения возможности энергетического воздействия на различные высокоскоростные потоки газа. Наиболее эффективным и одной из наиболее перспективных способом реализации импульсного энергоклада высокой мощности являются импульсные электрические разряды. Одним из важных прикладных достоинств воздействия плазмы на поток - его быстрое действие: при субмикросекундной длительности тока разряда есть возможность контроля короткоживущих плазменных образований, т.к. основные плазменные неустойчивости не успевают развиться. Плазменное воздействие эффективно в широком диапазоне скоростей газодинамических течений и имеет большое значение для решения практических вопросов, связанных с созданием новых методов управления обтеканием летательных аппаратов, а именно - влияние на зону ламинарно-турбулентного перехода, влияние на зоны отрыва, воздействие на газодинамические структуры и управление конфигурациями ударных волн, а также способствует оптимизации воспламенения и сгорания топлива в камерах внутреннего сгорания.

Цель работы заключается в экспериментальном исследовании взаимодействия импульсного объемного (комбинированного) разряда с нестационарным течением, реализующимся в прямоугольном канале с препятствием.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Получение экспериментальных данных по эволюции скорости основного потока за плоской ударной волной с рабочими числами Маха $M_{ув} = 2,8 - 3,4$ в прямоугольном канале (ударной трубы);
2. Исследование влияния диэлектрической вставки в форме параллелепипеда, помещенной в зону плазменного листа, на перераспределение энергии наносекундного разряда в сверхзвуковом и дозвуковом потоке, а также в неподвижном газе;
3. Определение механизма и длительности воздействия объемного (комбинированного) импульсного разряда на структурированное высокоскоростное течение в канале с препятствием в интервале скоростей потока от 850 м/с до 0.

Объектом исследования являлось нестационарное газодинамическое течение в прямоугольном канале с препятствием при инициировании импульсного объемного разряда.

Научная новизна:

1. Получены экспериментальные данные по эволюции скорости основного потока за плоской ударной волной с числами Маха 2,8 и 3,2 в канале методом трассирования частиц в интервале времени до 10 мс;
2. Впервые описан и исследован эффект вытеснения плазмы импульсного разряда при наличии диэлектрической вставки на поверхности плазменного листа, что приводит к перераспределению энергии импульсного разряда;
3. Импульсный объемный разряд впервые инициирован на различных стадиях нестационарного сложного течения в прямоугольном канале с препятствием при скорости течения от 850 м/с до 200 м/с;
4. Зафиксированы режимы самолокализации - 4 режима при различных скоростях потока — плазменных каналов вблизи препятствия при однократном инициировании импульсного объемного разряда;
5. Выделен основной механизм воздействия разряда при самолокализации на элементы структуры высокоскоростного течения в канале с препятствием как ударно-волновой;
6. Определены интервалы длительности воздействия инициированных разрядом ударно-волновых конфигураций на поток в исследованном диапазоне скоростей потока - до 130 микросекунд.

Научная и практическая значимость. Научная значимость работы заключается в получении экспериментальных данных по свойствам наносекундного разряда при его инициировании на участке сложного газодинамического течения в прямоугольном канале с измененным профилем; данных о свойствах течения после разрядного воздействия.

Практическая ценность работы обуславливается возможностью использования полученных данных для применения разряда для воздействия на элементы течения при проектировании устройств; применимостью результатов по управлению параметрами разрядного энерговыклада при помощи газодинамических разрывов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Экспериментальные результаты по режимам самолокализации импульсного объемного разряда в профилированном канале в течение 10 мс в ударной трубе при скорости основного потока за ударной волной от 850 м/с до 200 м/с.
2. При наличии прямоугольной вставки в области распределенного плазменного листа происходит вытеснение плазмы, а также энергии субмикросекундного объемного и поверхностного разрядов вдоль боковых образующих вставки.
3. Локализация импульсной плазмы в прямоугольном газодинамическом профилированном канале определяется скоростью (от сверхзвукового до дозвукового потока) и соответствующей структурой нестационарного течения в момент инициирования объемного разряда; выделены 4 режима.
4. Воздействие объемного импульсного разряда на структурированное высокоскоростное течение газа осуществляется, в первую очередь, посредством образования взрывных волн от зон его локализации; воздействие длится до 120 – 130 мкс.

Методология и методы исследования.

Метод исследования - экспериментальный. Были задействованы цифровые методы визуализации и анализа нестационарных плазменно- и газодинамических процессов. Диагностический комплекс включал в себя фотокамеру для регистрации интегрального свечения электрического разряда; высокоскоростную девятикадровую камеру с наносекундным разрешением для регистрации эволюции свечения импульсного разряда; теневую схему с лазерной подсветкой и высокоскоростной регистратор - для визуализации поля течения газа. А также были задействованы, пьезодатчики давления, малоиндуктивный шунт. Использовался метод трассирования частиц в потоке, метод визуализации потока импульсных объемным разрядом.

Достоверность полученных результатов подтверждается значительным объемом приведенных в работе экспериментальных данных и высокой степенью повторяемости при одинаковых условиях проведения экспериментов.

Апробация работы. Результаты диссертации докладывались соискателем лично на следующих 16 научных конференциях и семинарах: Семинар "Магнитоплазменная аэродинамика и МГД преобразование энергии" под руководством д.ф.м.н. Битюрина В.А. (г. Москва, ОИВТ РАН, 2023); Научно-исследовательский семинар кафедры газовой и волновой динамики под руководством акад. РАН Нигматулина Р.И., проф. Смирнова Н.Н. и проф. Звягина А.В. (г. Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова, механико — математический факультет, 2023); Ломоносовские чтения «Физика» (г. Москва, МГУ имени М.В. Ломоносова, 2023); XX, XXI Международная конференция по методам аэрофизических исследований – ISMAR (г. Новосибирск, 2020, 2022); XXV, XXIX Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых — Ломоносов (г. Москва, МГУ имени М.В. Ломоносова, 2018, 2022); The 19th International Symposium on Flow Visualization (Китай, г. Шанхай, 2021); Всероссийская конференция молодых ученых — механиков YSM-2021 (г. Сочи, 2021); XVI Международная научно-техническая конференция «Оптические методы исследования потоков — ОМИП 2021», (Москва, 2021); 18th, 20th International Workshop on Magneto-Plasma Aerodynamics (г. Москва, 2019, 2021); XLVIII Международная звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу (г. Звенигород, 2021); Круглый стол Актуальные проблемы высокоскоростных потоков из серии «Диалог о настоящем и будущем» (телемост МГУ имени М.В. Ломоносова – Университет Токай, Япония, 2020); XX Международная школа — семинар «Модели и методы аэродинамики» (г. Евпатория 2020); The 15th international conference on fluid control, measurements, and visualization «FLUCOME» (Италия, Неаполь, 2019).

Также в соавторстве было представлено 12 докладов по теме диссертации.

Связь работы с государственными программами и НИР.

Работа выполнена в рамках грантов Российского Научного Фонда № 18-19-00672, 22-29-00652, 22-79-00054.

Личный вклад. Все экспериментальные данные и результаты, приведенные в диссертации, получены автором лично при научном руководстве доктора физико-математических наук, профессора Знаменской Ирины Александровны.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 16 печатных изданиях, из которых 6 статей, в рецензируемых научных журналах, индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus, RSCI: [1–6]; 10 публикации в сборниках трудов, индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus, RSCI: [7–12], и в иных сборниках трудов: [13–16].

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Полный объем диссертации 106 страниц включая 50 рисунков и 2 таблицы. Список литературы содержит 109 наименований.

Содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулирована цель данной работы, описаны решенные задачи, определяется объект исследования, даны основные положения, которые выносятся на защиту, аргументирована их научная новизна, научная и практическая значимость, описаны методология и методы исследования, апробация основных результатов и достоверность; приведено краткое содержание работы.

Первая глава посвящена анализу научных работ по взаимодействию газовых разрядов и высокоскоростных газодинамических течений. Показано, что газовые разряды позволяют значительно влиять на конфигурацию и свойства потока и газодинамические структуры, что открывает возможности для их эффективного применения в практических целях.

Различные исследования показали, что эффективное воздействие на высокоскоростной поток газа возможно на основе импульсного энергоподвода, создаваемого посредством инициирования импульсных разрядов. Среди основных факторов, влияющих на воздействие импульсного разряда на поток, выделяется ударно-волновое течение, возникающее в результате субмикросекундного энергоподвода. Тепловое воздействие разрядов, в частности, способствует оптимизации воспламенения и сгорания топлива в камерах внутреннего сгорания.

Был проведен анализ ряда работ по реализации импульсного разряда с предыонизацией в потоке с разрывами; для создания предыонизации использовалось ультрафиолетовое излучение от плазменных электродов. Преимущества пробоя через зону предыонизации заключается в однородности горения

разряда по всему объему предыонизации и однородности реализуемого разрядом энерговклада.

Обзор основных современных панорамных методов визуализации потоков показывает, что использование цифровых технологий за последние два десятилетия позволило осуществить качественный рывок в области применения традиционных методов, основанных на рефракции и трассировании. Современное цифровое оборудование позволяет производить теневую съемку высокоскоростных газодинамических течений, измерять положения и скорость распространения разрывов и возмущений в сверхзвуковых потоках. Продолжается активное развитие систем визуализации и алгоритмов обработки полученных изображений.

Вторая глава посвящена описанию экспериментальной установки со специальной разрядной секцией, где реализуется импульсный объемный разряд с ультрафиолетовой предыонизацией от плазменных листов ИОР, а также краткому изложению методов диагностики для исследования быстропротекающих плазмо- и газодинамических процессов. Определяется эволюция скорости потока за ударной волной в канале по трассерам; визуализирована мгновенная структура пограничного слоя в потоке за ударной волной вдоль кварцевой стенки канала на основе интегральной регистрации свечения ИОР.

В **разделе 2.1** приведено подробное описание экспериментальной установки УТРО - 3 (Ударная Труба - Разряд - Оптика), с разрядной секцией, где реализуется импульсный объемный разряд с предыонизацией ультрафиолетовым излучением от плазменных электродов (комбинированный разряд) ИОР протяженностью 100 мм. Сечение канала с разрядной секцией прямоугольное и составляет $24 \times 48 \text{ мм}^2$ (см. Рис. 1). Толкающий газ представляет собой гелий с примесью воздуха и находится в начальный момент времени под давлением от 4 атм до 8 атм, в зависимости от необходимого, в первую очередь, числа Маха ударной волны $M_{ув}$. Рабочий газ – воздух, заполняющий канал ударной трубы, доводится до значения давления 20 ± 3 торр (плотности $0,03 \text{ кг/м}^3$).

При достижении значительного перепада давления на диафрагме, происходит ее разрыв (математическая схема распада разрыва представлена на Рис. 1а. В эксперименте, только на расстоянии около 1 метра сложноистекающий сжатый газ формирует перед собой плоскую ударную волну УВ. Таким

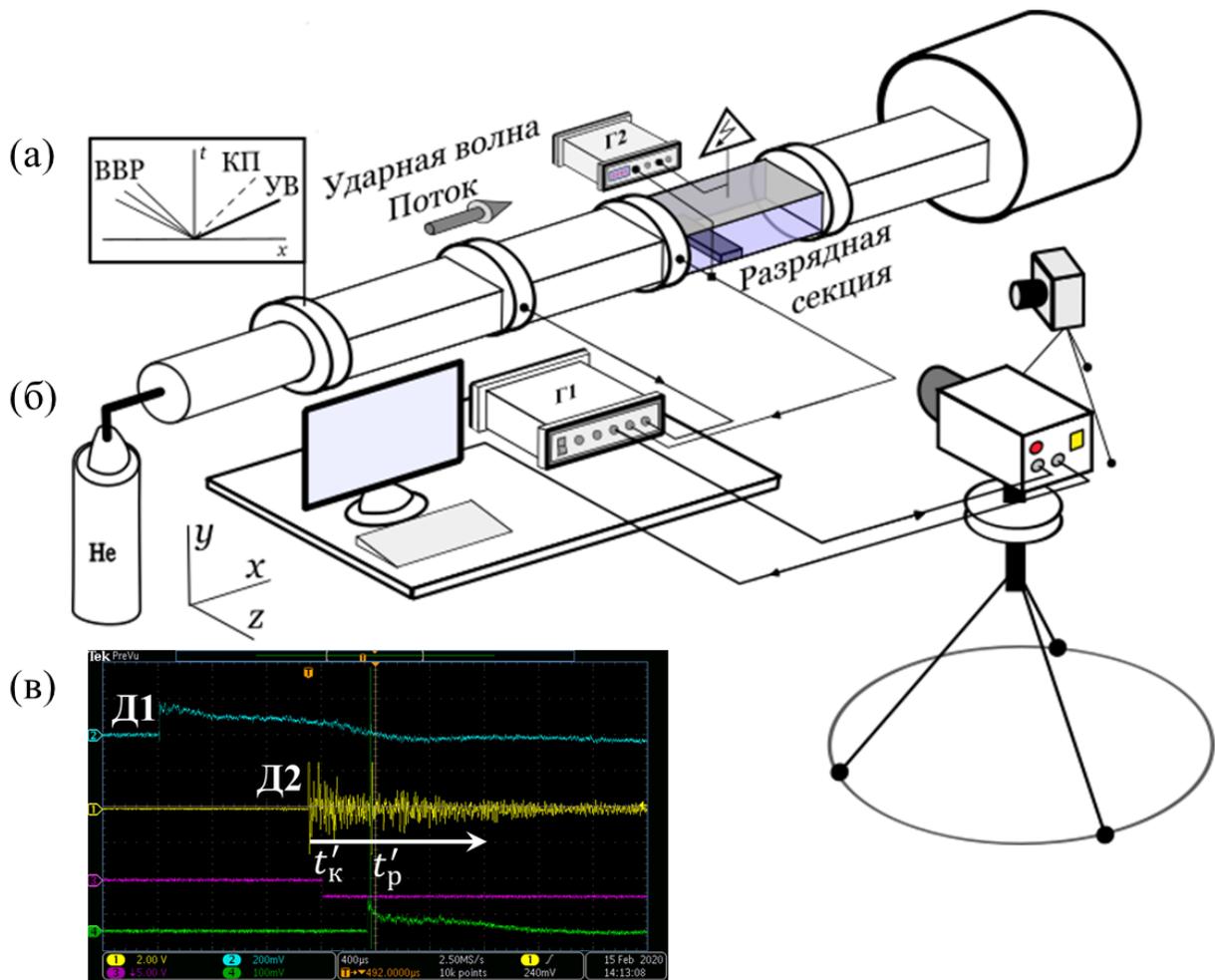


Рис. 1 — Схема распада разрыва на диафрагме (а), схема установки - ударной трубы с разрядной секцией (б) и снимок экрана осциллографа с синхронизацией сигналов (в).

образом, в установленных условиях создаются рабочие числа Маха ударной волны $M_{ув} = 2,8 - 3,4 (3,1 \pm 0,3)$.

Для определения скорости движения плоской УВ в канале были вмонтированы пьезодатчики давления. Датчики подключены к цифровому осциллографу; импульс с пьезодатчиков давления получаемый при проходе УВ позволяет рассчитать скорость движения разрыва и синхронизировать начало инициирования разряда, в частности, при его реализации в необходимой фазе газодинамического процесса, а также позволяет запустить высокоскоростную камеру - регистратор (см. Рис. 1в).

Разрядная секция, находится на расстоянии 210 см от начала движения газового потока и диафрагменной секции без изменения внутреннего сечения канала, где реализуется импульсный объемный разряд с ультрафиолетовой предыонизацией от плазменных листов ИОР.

В область инициирования наносекундного ИОР в зону плазменного листа разрядной секции, в геометрии от окна до окна, установлена диэлектрическая вставка, с целью изменения геометрического профиля прямоугольного канала. Форма препятствия - параллелепипед с размерами $6 \times 2 \times 48$ мм³.

На верхней и нижней стенках камеры на расстоянии 24 мм друг от друга располагаются плазменные электроды, представляющие собой скользящие разряды (плазменные листы) площадью 30×100 мм². Ультрафиолетовое излучение от скользящих разрядов формирует достаточно однородную предыонизацию в межэлектродном промежутке и обеспечивает высокую степень однородности энерговыделения в основной фазе разряда. Импульсное питание разряда осуществляется от конденсатора ёмкостью 2300 пФ, заряжаемого до рабочего напряжения 24 кВ и коммутируемого разрядником. Ток разряда измеряется с помощью малоиндуктивного шунта специальной конструкции, регистрирующего полный ток комбинированного разряда ИОР. Максимум тока разряда достигает значений 1,2 кА. Ток плазменных листов ориентирован ортогонально оси течения. Разряд работает в однократном режиме.

Две боковые стенки разрядной камеры представляют собой кварцевые окна (полоса пропускания 200 – 2800 нм) длиной 17 см и толщиной 15 мм. Через боковые стенки ведется панорамная визуализация течения.

В **разделе 2.2** описываются цифровые методы визуализации и анализа нестационарных плазмо- и газодинамических процессов, осуществляемых в микро- и наносекундном диапазонах. В частности, была задействована фотокамера для интегральной регистрации свечения импульсного разряда (метод визуализации разрядом); высокоскоростная девятикадровая камера с наносекундным разрешением (экспозиция/пауза – от 100/100 нс) для определения эволюции свечения наносекундного разряда; теневая высокоскоростная камера с частотой съемки 75 – 150 кГц и с соответствующим разрешением, применяемая для визуализации газодинамического поля течения.

В **разделе 2.3** приводятся данные об эволюции газодинамического течения, достигаемого в области разрядной секции, при условиях отсутствия препятствия в канале. Полученные результаты необходимы для достижения цели настоящей диссертации. В частности, приведены данные об изменении скорости течения за ударной волной с числами Маха $M_{ув} = 2,8$ и $M_{ув} = 3,2$, определенные экспериментальным путем на основе трассирования частиц

(см. Рис. 4в - для течения за ударной волной с числом Маха $M_{ув} = 3,2$). Следует отметить, что на временном промежутке от начала потока до 600 мкс, в точке наблюдения, скорость набегающего потока практически постоянна (для $M_{ув} = 3,2$, скорость составляет 820 м/с), а газодинамические параметры могут быть рассчитаны из соотношений Ренкина-Гюгонио для параметров в спутном потоке. Таким образом, для $M_{ув} = (3,1 \pm 0,3)$ плотность составляет $0,16 \pm 0,01$ кг/м³.

Представлены экспериментальные результаты визуализации пограничного слоя на кварцевой поверхности канала в потоке за ударной волной. Визуализация проводилась на основе интегральной регистрации свечения импульсного объемного разряда в однократном режиме с различной временной задержкой, отсчитываемой от момента прохода УВ. Зарегистрированы и исследованы полосчатые структуры в интервале времени 440–850 кс - в режиме перехода от ламинарного пограничного слоя к турбулентному.

Результаты второй главы опубликованы в работах [1; 6; 12].

Третья глава посвящена исследованию влияния диэлектрической вставки, помещенной в зону плазменного листа, на перераспределение плазмы наносекундного разряда в неподвижном газе: вблизи вставки наблюдаются интенсивные симметричные плазменные каналы, при этом свободный плазменный лист формировал однородное свечение по всей поверхности 100×30 мм², как если бы вставки не было. Яркость интегрального свечения плазменных каналов и длительность их свечения увеличивалась по мере увеличения плотности газа в разрядном промежутке. Наблюдаемый эффект назван эффектом «Вытеснения».

Перераспределение энергии импульсного разряда способствует генерации усиленных взрывных волн, тем самым становясь источником ударно-волнового воздействия. Получены пространственно-временные характеристики взрывных волн от неоднородного импульсного энерговыклада.

В **разделе 3.1** представлены данные о свечении импульсного разряда вблизи диэлектрического препятствия. Показано, что диэлектрическая вставка, установленная на поверхность плазменного листа вдоль протекания тока поверхностной фазы ИОР (вдоль оси z) приводит к перераспределению свечения в разрядном промежутке в рабочем диапазоне плотности неподвижного воздуха $0,03–0,20$ кг/м³. Было обнаружено, что вблизи вставки наблюдаются

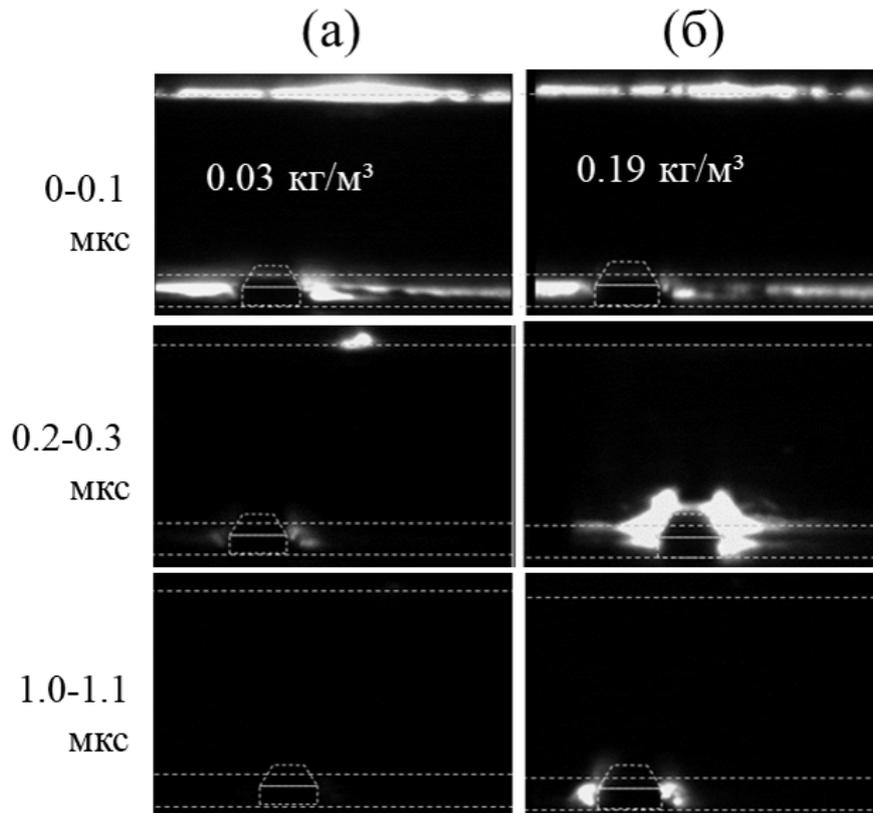


Рис. 2 — Регистрация с наносекундным разрешением (экспозиция – 100 нс, пауза – 100 нс) эволюции оптического свечения импульсного поверхностного разряда, инициированного в неподвижном газе при плотности воздуха $0,03 \text{ кг/м}^3$ (а) и $0,19 \text{ кг/м}^3$ (б).

интенсивные симметричные плазменные каналы, при этом свечение разряда свободного верхнего плазменного листа является однородным.

Данный эффект - эффект «вытеснения» реализуется как при инициировании ИОР, так и при реализации только поверхностной его фазы - поверхностного разряда. Таким образом, показано, что формирование излучения вблизи вставки при инициировании ИОР преимущественно осуществляется за счет плазменных листов (поверхностной фазы ИОР). Яркость интегрального свечения плазменных каналов и длительность их свечения увеличивалась по мере увеличения плотности газа в разрядном промежутке (см. Рис. 2).

Установлено, что явление «вытеснения» наблюдается с временной задержкой 100 – 200 нс от момента инициирования импульсного разряда (см. Рис. 2б). Разряд на свободном плазменном листе регистрируется без задержки по времени.

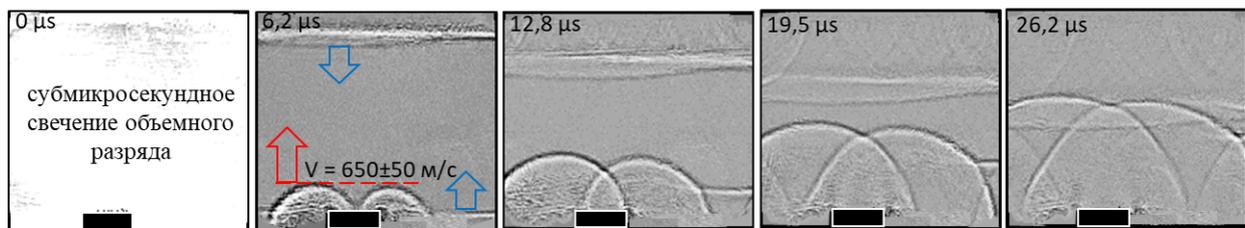


Рис. 3 — Эволюция ударно-волнового течения после инициирования ИОР в неподвижном газе при плотности $0,12 \text{ кг/м}^3$.

В разделе 3.2 приводятся пространственно-временные характеристики газодинамических возмущений, создаваемых при инициировании ИОР с диэлектрической вставкой в зоне плазменного листа: симметричные плазменные каналы становятся источниками двух симметричных полуцилиндрических взрывных волн, распространяющихся с начальной скоростью более 650 м/с (см. Рис. 3). Их движение сопровождается симметричной дифракцией на обратном уступе с последующей интерференцией, что приводит к образованию сложной ударно-волновой конфигурации, достигающей противоположной стенки разрядной камеры через $43 \pm 2 \text{ мкс}$ от момента импульсного энергоподвода $\tau = 0$. При этом от зон свободных плазменных листов распространяются квазиплоские ударные волны со значительно меньшей начальной скоростью (см. Рис. 3). Ударно-волновое воздействие с периодическим переотражением от горизонтальных стенок канала длится более 600 мкс . Движение областей, ограниченных контактной поверхностью ООКП, наблюдается $2 - 3 \text{ мс}$ и более.

Проводилось сравнение начальной скорости движения взрывной волны формируемой после инициирования ИОР с соответствующим параметром при инициировании поверхностного разряда, которое показало различие на $100 - 150 \text{ м/с}$ в пользу последнего. Данный результат объясняется с затратой энергии на объемную предыонизацию, осуществляемую плазменными листами при инициировании ИОР.

Результаты третьей главы опубликованы в работах [3; 7].

Четвертая глава посвящена экспериментальному исследованию и анализу перераспределения плазмы ИОР в потоке, формируемом за ударной волной и после ее выхода из разрядного промежутка. Выделены 4 режима локализации импульсного комбинированного разряда ИОР (см. Рис. 4а-б), реализующиеся в нестационарном потоке с плавно изменяющейся скоростью

от 850 м/с до 200 м/с (см. Рис. 4в). Инициирование импульсного разряда на разных участках газодинамического течения достигалось за счет изменения временной задержки на генераторе импульсов между сигналом, поступающим на пьезодатчик вблизи разрядной секции от прохода ударной волны, и исходящим сигналом на блок запуска, приводящего к инициированию ИОР.

В разделе 4.1 приводятся результаты инициирования разряда при движении падающей ударной волны $M_{ув} = 2,8 - 3,4$ через область с препятствием. Движение УВ через профилированную область сопровождается сначала частичным отражением, а затем дифракцией на обратном уступе. Дифракция ударной волны на обратном уступе характеризуется сложным нестационарным процессом с образованием, в частности, вихревой структуры в подветренной области. Так, при инициировании ИОР в момент дифракции $x = 8 - 14$ мм (отсчет от выступа), энергия разряда преимущественно стягивается в зону образовавшегося вихря. При дальнейшем движении УВ поле свечения перераспределяется, в частности, визуализируется тройная конфигурация с образованием ножки Маха. При достаточном отдалении $\approx 20h$ (h – высота препятствия), фронт УВ становится плоским. Затем, инициирование импульсного объемного разряда с ультрафиолетовой предыонизацией от плазменных листов ИОР осуществляется в потоке после выхода УВ из области разрядного промежутка.

Выделены 4 основных режима локализации импульсной плазмы в потоке длительностью более 10 мс (см. Рис. 4а-б). Отсчет режимов осуществляется согласно развитию течения за ударной волной – от сверхзвукового потока (режим I) к дозвуковому (режим IV) (см. Рис. 4в). Инициирование импульсного разряда на разных участках газодинамического процесса достигалось за счет изменения временной задержки между запускающим сигналом, поступающим от второго пьезодатчика давления, и моментом инициирования разряда.

Далее, в разделах 4.2 – 4.5 следует подробное описание каждого режима.

В разделе 4.2 приводится описание газодинамического поля течения, реализуемого в режиме I, характеризующееся определенными структурными элементами - косой скачок, зона отрыва, наблюдаемыми при интегральной

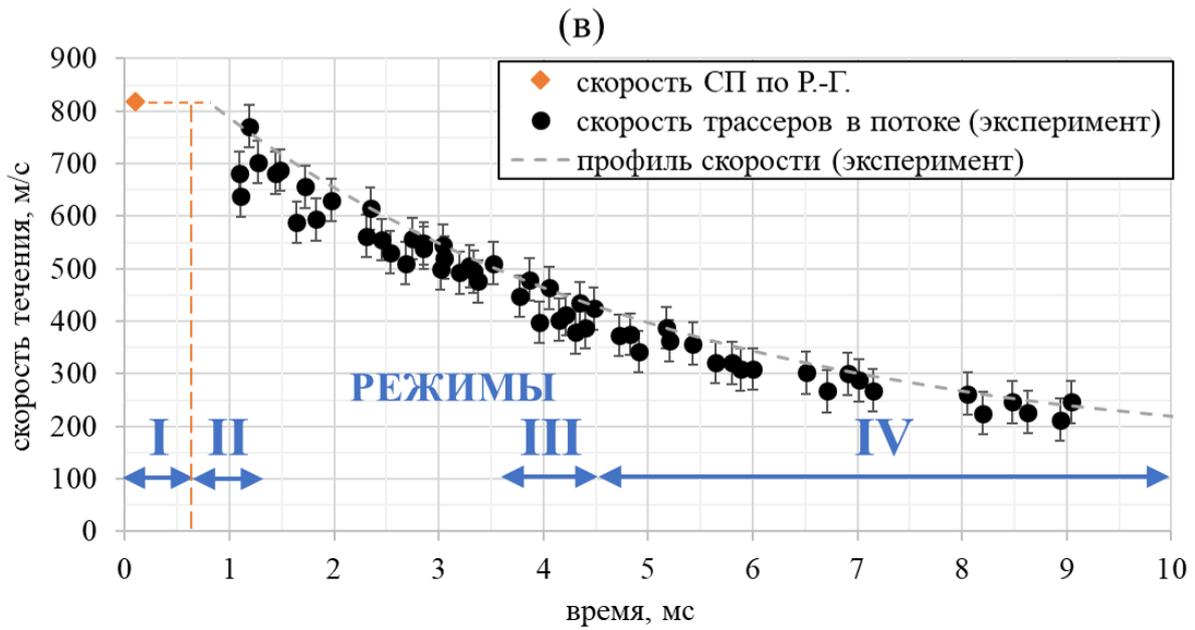
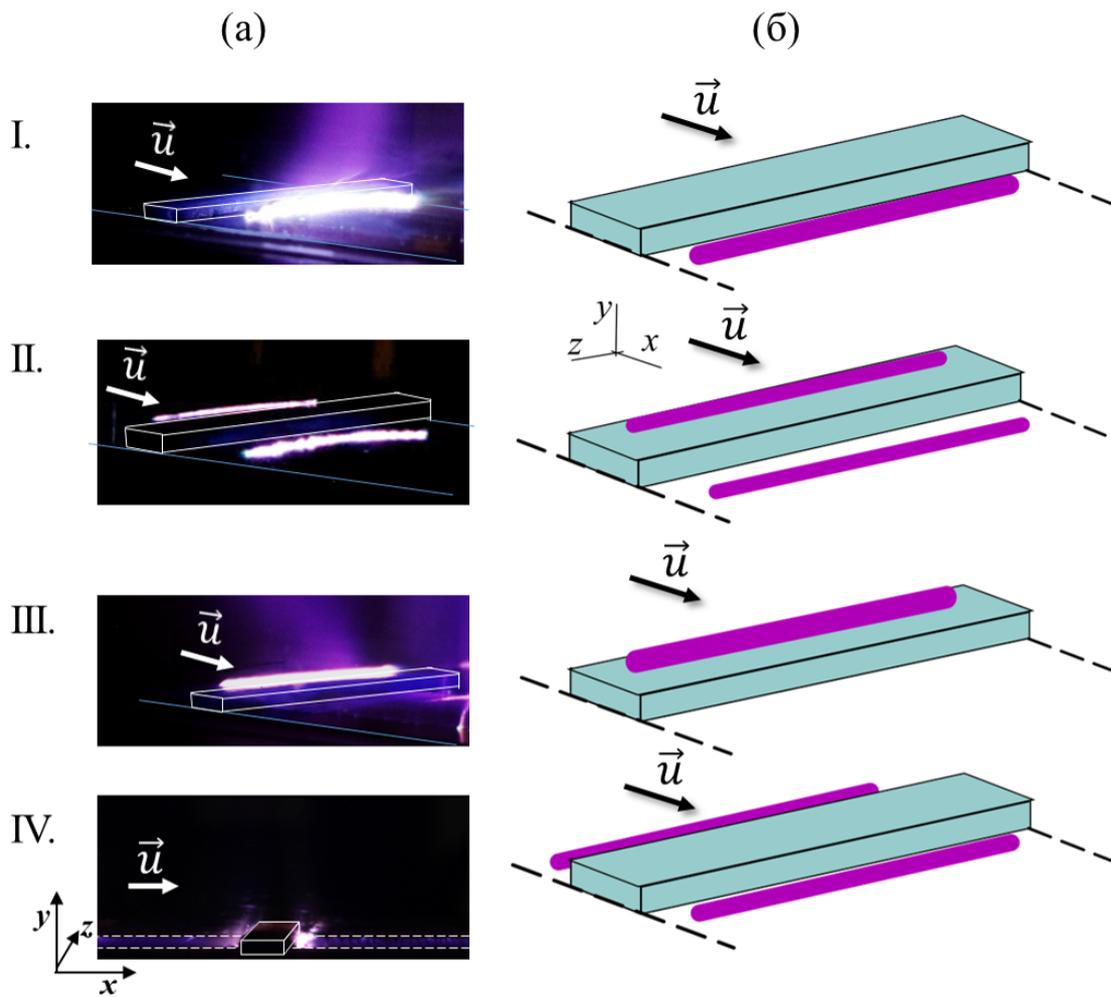


Рис. 4 — Режимы (распределение) разрядного свечения по времени в потоке за ударной волной.

регистрации свечения ИОР при обтекании препятствия набегающим сверхзвуковым воздушным потоком постоянной скорости - спутным потоком (см. Рис. 5).

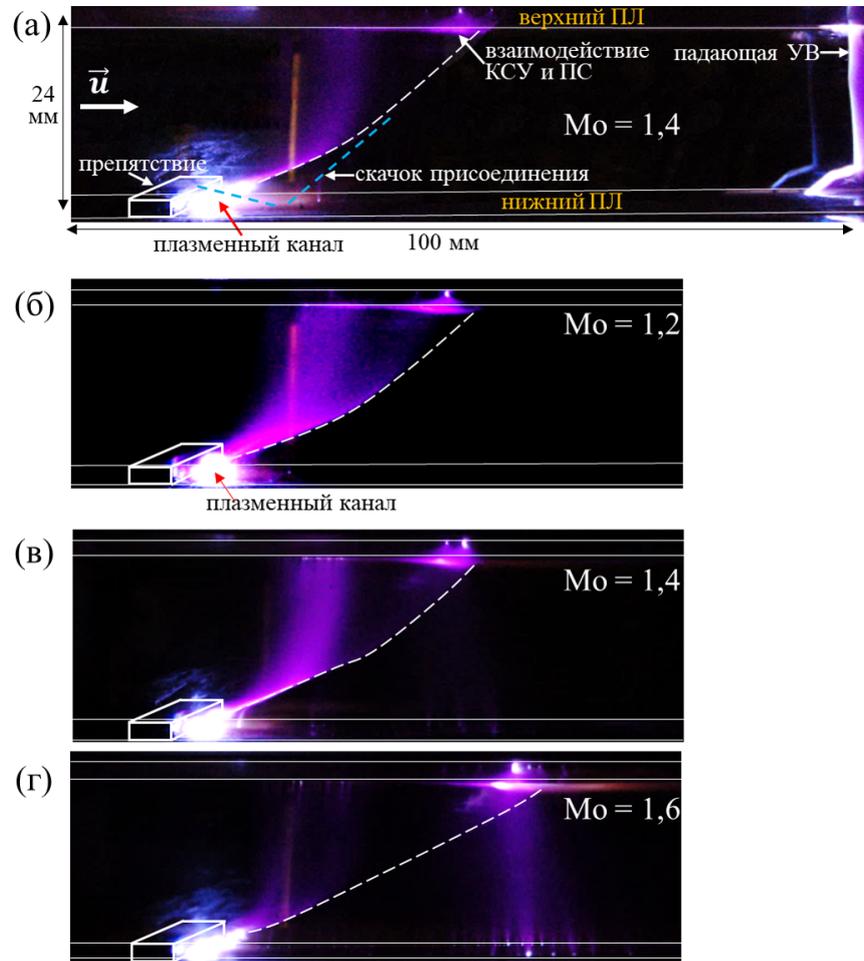


Рис. 5 — Свечение ИОР в режиме I сверхзвукового течения ($t = 100 - 600$ мкс после прохода УВ через выступ) в момент выхода УВ $Mo = 1,4$ из разрядного промежутка $x = 100$ мм (а), в потоке на расстоянии УВ от препятствия $x = 110 - 140$ мм при $Mo = 1,2$ (б), $Mo = 1,4$ (в), $Mo = 1,6$ (г).

В широком временном диапазоне t от 100 мкс до 550 ± 50 мкс интегральная регистрация свечения ИОР показала слабоизменяющееся поле излучения плазмы (для рабочего числа Маха УВ $M_{UV} = 3,1 \pm 0,3$ или $u = 700 - 850$ м/с). Характерной чертой для сверхзвукового режима I является локализация импульсного разряда в виде одиночного плазменного канала в зоне отрыва - за препятствием; часть энергии объемного разряда перераспределяется в области пространственных скачков (см. Рис. 5).

В **разделе 4.3** показано, что изменение поля обтекания влечет за собой перераспределение ИОР, что способствует реализации второго режима (см. Рис. 4 - II). Режиму II соответствует формирование двух плазменных каналов локализованных в подветренной области и на передней кромке препятствия, визуализируя, тем самым, отрывной тип течения в двух зонах вокруг препятствия. Характерная самолокализация наблюдается на временном промежутке $t = 600 - 1300$ мкс, когда набегающий поток является трансзвуковым с определенным набором ударно-волновых структур.

Режим II ассоциирован с началом контактного перехода, для которого характерно плавное изменение воздушной пробки на толкающий газ - воздушно-гелиевую смесь.

В **разделе 4.4** определяются условия для реализации третьего режима (см. Рис. 4 - III). Перестроение режима обтекания, ввиду начала движения через разрядный промежуток цуга псевдоскачков навстречу потоку, приводит к характерному свечению наносекундной плазмы как в объеме, так и на поверхности.

При режиме III реализуется трансзвуковое поле течения ($u \approx 350 - 450$ м/с), сопровождающееся сформированной областью пониженной плотности на верхней передней кромке с косым скачком уплотнения, возникающим вследствие присоединения потока. Разряд формируется в одиночный плазменный канал с наветренной стороны над препятствием, локализация которого совпадает с положением зоны отрыва. Режим наблюдается на временном промежутке $t = 3,6 - 4,5$ мс от момента прохода УВ.

В **разделе 4.5** определяются условия для реализации четвертого режима самолокализации ИОР (см. Рис. 4 - IV). Определено, что режим IV осуществляется в дозвуковом потоке, скорость которого составляет менее 350 м/с. Режиму обтекания, при котором характерен режим IV, соответствует неоднородное поле течения со значительными пограничными слоями без каких-либо особых газодинамических структур.

Интегральная регистрация свечения показала формирование двух симметричных плазменных каналов вдоль диэлектрической вставки наподобие тем, которые реализуются при инициировании разряда в неподвижной среде (см. Главу 3, раздел 1 настоящей диссертации), при этом объемная фаза разряда переходит к стягиванию в вертикальный плазменный канал, ввиду

наличия сильной неоднородности в потоке и достаточно высоком значении давления $\approx 130 - 150$ торр [17].

Результаты четвертой главы опубликованы в работах [2; 4; 8; 10; 11; 13; 14; 16].

Пятая глава посвящена исследованию воздействия самолокализованного импульсного объемного разряда с УФ-предыонизацией от плазменных листов ИОР на высокоскоростное газодинамическое течение. Воздействие на структурированное высокоскоростное течение осуществляется в первую очередь, посредством образования взрывных волн от зон локализации ИОР, инициированного на определенных участках газодинамического процесса в профилированной части канала разрядной секции. Определены пространственно-временные характеристики ударно-волнового воздействия для каждого режима.

В **разделе 5.1** рассмотрено воздействие ИОР во время прохода ударной волны через профилированную область разрядного промежутка.

Показано, что при инициировании ИОР в момент, когда ударная волна находится над препятствием, частично отраженная от выступа УВ и взрывные волны из зоны вытеснения вносят значительные возмущения в поток и существенным образом влияют на картину распада разрыва на фронте УВ. Инициирование ИОР на разных стадиях движения падающей ударной волны через разрядный промежуток в канале постоянного сечения уже было рассмотрено ранее, например, [18].

Было обнаружено, что каждому из четырех режимов, соответствует определенная ударно-волновая структура течения, отличающаяся пространственно-временными характеристиками (см. Рис. 6). Далее, в разделах 5.2 – 5.5 следует подробное описание каждого режима.

В **разделе 5.2** представлены характеристики ударно-волнового течения, формируемого в режиме I. Однократное вложение энергии за уступом, реализуемое в сверхзвуковом режиме обтекания, обеспечивает формирование одиночной вытянутой взрывной волны (см. Рис. 6 - I).

Представлен набор теневых снимков по эволюции движения взрывной волны и ООКП, сносимых из зоны локализации разряда. Начальная скорость движения фронта взрывной волны в вертикальном направлении достигает (850 ± 50) м/с, на горизонтальную – накладывается скорость потока. Ударно-

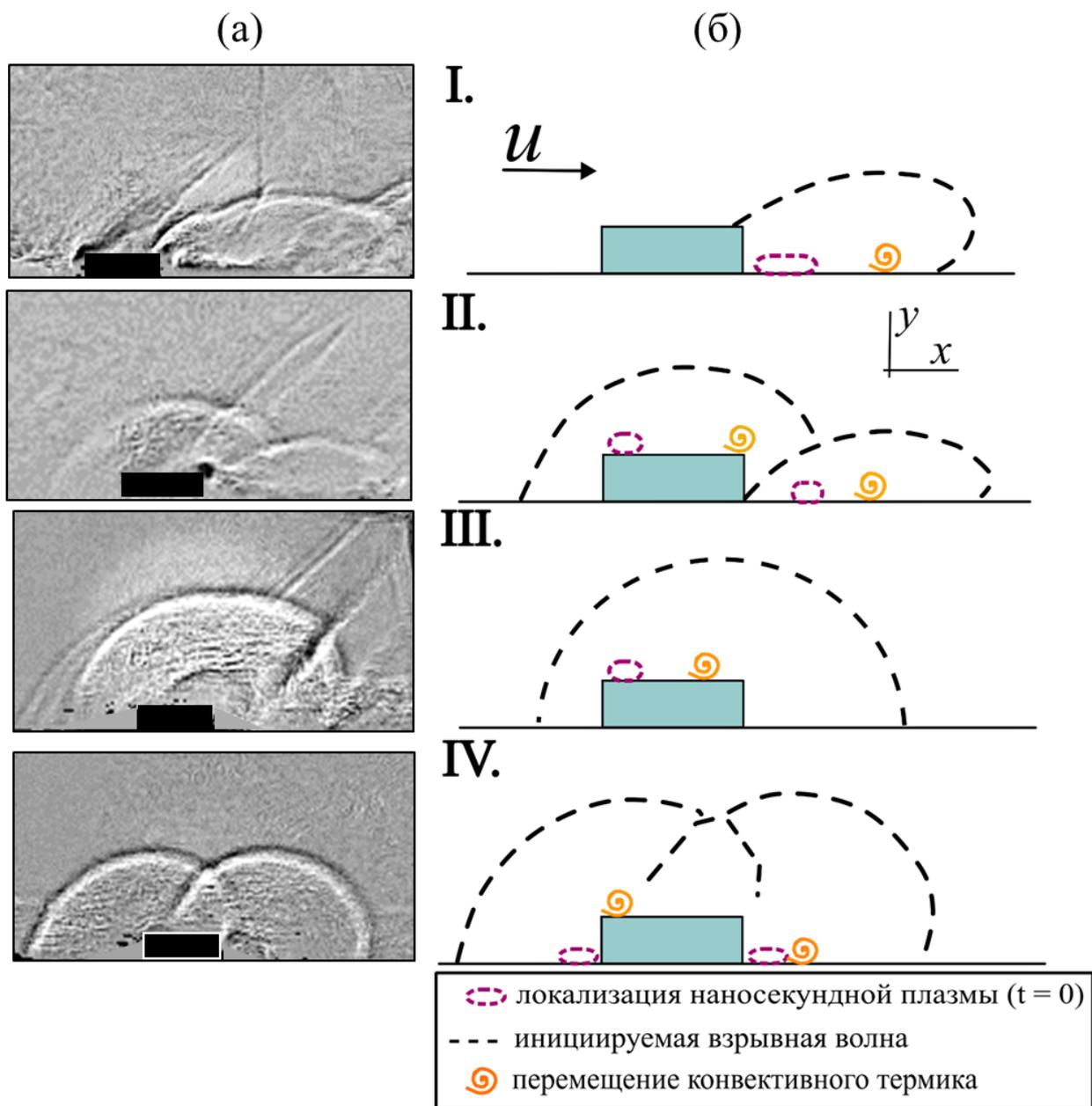


Рис. 6 — Локализации наносекундного объемного разряда с соответствующим ударно-волновым возмущением в потоке за ударной волной.

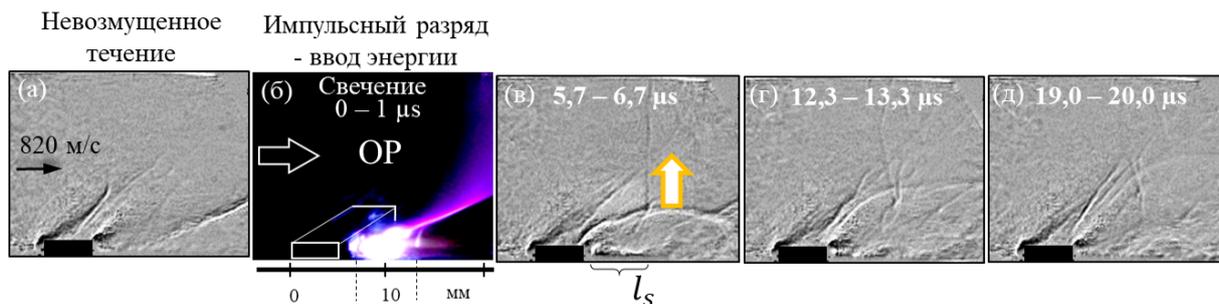


Рис. 7 — Воздействие ИОР на сверхзвуковое течение (I режим).

волновое воздействие наблюдается в течение 20 – 30 мкс (см. Рис. 7). Затем обтекание восстанавливается.

В **разделе 5.3** приводятся результаты исследований взрывных волн, реализующихся в режиме II самолокализации импульсного разряда в потоке (см. Рис. 6 - II). Режим II характеризуется парой взрывных волн, начальная скорость движения в вертикальном направлении для наиболее сильной волны достигает (1100 ± 100) м/с. От зоны локализации разряда наблюдаются области, ограниченные контактной поверхностью ООКП.

Ударно-волновое воздействие на течение осуществляется в течение 30 – 40 мкс после импульсного инициирования ИОР с последующим восстановлением режима обтекания.

В **разделе 5.4** описывается ударно-волновое воздействие на течение, осуществляемое в трансзвуковом режиме III: наносекундный энерговклад над передней кромкой выступа, приводит к возникновению взрывной волны по форме близкой к цилиндрической в потоке (см. Рис. 6 - III).

Одновременно с этим, создаются условия для распада разрыва на косом скачке: в момент времени $\tau = 0$ (момент импульсной объемной ионизации) косой скачок становится плоской границей раздела двух сред «плазма - газ», что приводит к распаду на два скачка параллельных исходному и контактную поверхность, на которой развивается сдвиговая неустойчивость по типу Кельвина-Гельмгольца. Сформированная крупномасштабная ООКП движется по потоку и, догоняя эту контактную поверхность, вовлекается с ней в совместное движение.

Начальная скорость движения взрывной волны достигает (1200 ± 50) м/с. Ударно-волновое воздействие длится 50 – 70 мкс. Воздействие на цуг псевдоскачков, двигающегося по каналу навстречу потоку, в данном режиме может продолжаться значительно дольше и достигает 160 – 200 мкс (см. Рис. 9в).

В **разделе 5.5** описывается ударно-волнового воздействие на поток, реализовывающийся в режиме IV самолокализации ИОР, которое формируется в дозвуковом течении. Инициирование разряда приводит к стабильной ударно-волновой конфигурации сравнимой с картиной, наблюдаемой при формировании течения в неподвижном газе. Из областей вблизи вставки распространяются взрывные волны с начальной вертикальной скоростью

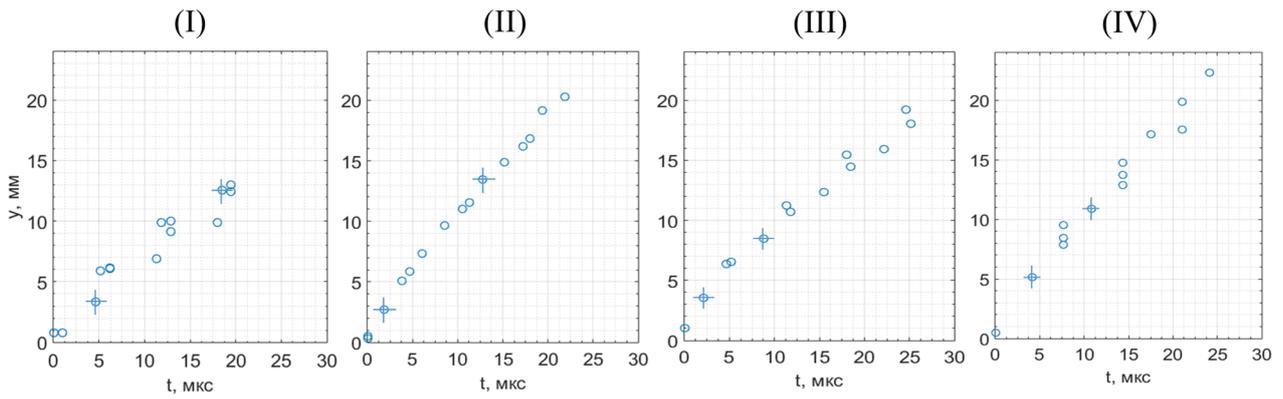


Рис. 8 — Эволюция движения взрывной ударной волны, соответствующая I режиму (а), II режиму (б), III режиму (в) и IV режиму (г).

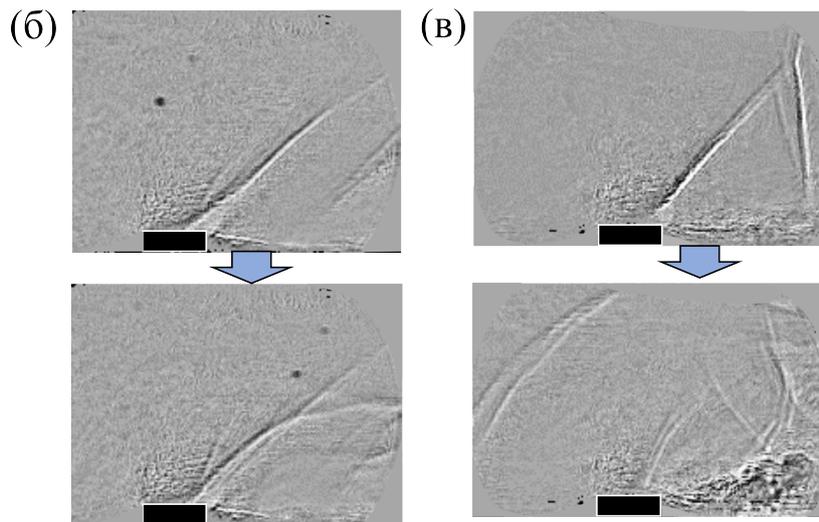
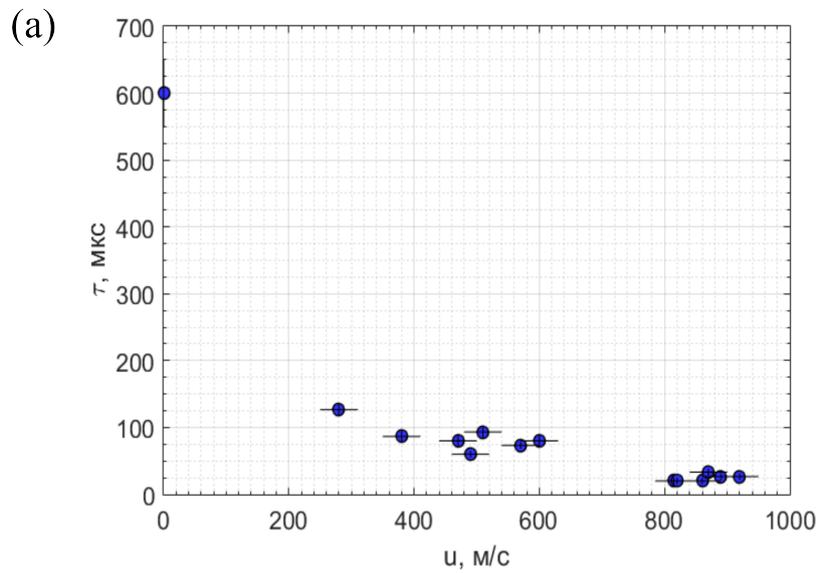


Рис. 9 — Влияние скорости потока на восстановление течения после иницирования ИОР - зависимость (а); теневые кадры воздействия на КСУ (б) и псевдоскачок (в).

(1100 ± 100) м/с (см. Рис. 6 - IV): два симметричных плазменных канала приводят к возникновению двух асимметричных взрывных волн. Визуализирован дрейф ООКП с наветренной стороны; ООКП с подветренной стороны является малоподвижным.

В **разделе 5.6** даются обобщенные данные о воздействии ИОР наносекундной длительности, представленные в разделах 5.2 – 5.5. Приведены данные об эволюции движения взрывной волны для каждого режима в отдельности (см. Рис. 8).

По мере снижения скорости потока от 850 м/с до 200 м/с, длительность, в первую очередь, ударно-волнового воздействия возрастает от 20 мкс до 130 мкс. Показано, что верхняя граница по длительности воздействия (130 мкс) реализуется при минимальной тестовой скорости потока $u = 200$ м/с, достигаемой к 10 мс после начала течения (см. Рис. 9).

Показано, что импульсный объемный разряд с ультрафиолетовой пре-дыонизацией от плазменных листов ИОР за счет ударно-волнового механизма воздействия способен вносить значительные возмущения, воздействуя на структуру и параметры потока, в частности,

- на косой скачок в сверхзвуковом поле течения (см. Рис. 9б),
- на псевдоскачки (Рис. 9в),
- реализовывать условия для распада разрыва на косом скачке.

Результаты пятой главы опубликованы в работах [1; 2; 13; 15].

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертации, которые заключаются в следующем:

1. Впервые описан и исследован эффект вытеснения плазмы импульсного разряда, что приводит к перераспределению энергии импульсного разряда (генерации усиленных взрывных волн); Определено, что основную роль при эффекте вытеснения играет поверхностная фаза комбинированного разряда. Установлено, что явление вытеснения наблюдается с временной задержкой около 100 – 200 нс после инициирования импульсного разряда.
2. При измеренной скорости основного потока от 850 м/с до 200 м/с получены экспериментальные данные по самолокализации импульсного объемного разряда в потоке в профилированном канале ударной трубы в течение 10 мс.

3. Обнаружены и исследованы 4 различных режима самолокализации комбинированного разряда – реализации сильноточных плазменных каналов вблизи препятствия при однократном иницировании разряда при различных скоростях и конфигурациях потока.
4. Показано, что импульсная объемная ионизация за счет ударно-волнового механизма воздействия способна вносить значительные возмущения, воздействуя на структуру и параметры потока, в частности,
 - на косой скачок в сверхзвуковом поле течения,
 - на псевдоскачки,
 - реализовывать условия для распада разрыва на косом скачке.
5. Приведены количественные данные по движению взрывной волны для каждого из четырех режимов самолокализации импульсного разряда в потоке. Показано, что скорость взрывной волны может достигать 1200 м/с.
6. Определены времена воздействия иницированных разрядом ударно-волновых конфигураций на поток в исследованном диапазоне скоростей потока – до 120 – 130 микросекунд.

Публикации автора 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:

1. *Долбня, Д. И., Знаменская И. А., Луцкий А. Е., Сысоев Н. Н.* Формирование ударно-волнового течения при локализации наносекундных разрядов в нестационарном потоке в канале с препятствием // Известия РАН. Механика жидкости и газа. – 2023. – т. 58, 1. – с. 144–150. – In English: *Dolbnya D.I., Znamenskaya I. A., Lutsky A. E., Sysoev N. N.* Formation of shock-wave flow after localization of nanosecond discharge in non-stationary flow in channel with obstacle // Fluid Dynamics. – 2023. – т.

58. – с. 145–151. IF=0.67 (WoS), вклад автора –0.25. — DOI: [10.1134/S0015462822601917](https://doi.org/10.1134/S0015462822601917).
2. *Znamenskaya I. A., Dolbnya, D. I., Ivanov I. E. Kuli-zade T. A., Sysoev N. N.* Pulse volume discharge behind shock wave in channel flow with obstacle // *Acta Astronautica*. — 2022. — т. 195. — 493–501. IF=2.95 (WoS), вклад автора –0.2. — DOI: [10.1016/j.actaastro.2022.03.031](https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.03.031).
 3. *Tatarenkova (Dolbnya) D. I., Koroteeva E. Y., Kuli-zade T. A. Karnozova E. A., Znamenskaya I. A., Sysoev N. N.* Pulsed discharge-induced high-speed flow near a dielectric ledge // *Experiments in Fluids*. — 2021. — т. 62, № 7. — 151. IF=2.8 (WoS), вклад автора –0.17. — DOI: [10.1007/s00348-021-03253-0](https://doi.org/10.1007/s00348-021-03253-0).
 4. *Знаменская И. А., Дорощенко И. А., Сысоев Н. Н. Татаренкова (Долбня) Д. И.* Результаты количественного анализа высокоскоростной теневой съемки течений в ударной трубе при помощи машинного зрения и обучения // *Доклады Российской Академии Наук*. — 2021. — т. 66, 4. — с. 93–96. — In English: *Znamenskaya I. A., Doroshchenko I. A., Sysoev N. N., Tatarenkova (Dolbnya) D. I.* Results of quantitative analysis of high-speed shadowgraphy of shock tube flows using machine vision and machine learning // *Doklady Physics*. — 2021. — Т. 66, 4. С. 93–96. IF=0.72 (WoS), вклад автора –0.25. — DOI: [10.1134/S1028335821040066](https://doi.org/10.1134/S1028335821040066).
 5. *Знаменская И. А., Татаренкова (Долбня) Д. И., Кулизаде Т. А.* Наносекундная ионизация области обтекания прямоугольного уступа высокоскоростным потоком // *Письма в Журнал технической физики*. — 2020. — т. 46, 1. — с. 5–7. — In English: *Znamenskaya I. A., Tatarenkova (Dolbnya) D. I., Kulizade T. A.* Nanosecond ionization of an area of flowing around a rectangular ledge by a high-speed flow // *Technical Physics Letters*. — 2020. Т. 46, 1. с. 1–3. IF=0.64 (WoS), вклад автора –0.33. — DOI: [10.1134/S1063785020010149](https://doi.org/10.1134/S1063785020010149).
 6. *Дорощенко И. А., Знаменская И. А., Кули-заде Т. А. Татаренкова (Долбня) Д. И.* Характеристики турбулентного пограничного слоя на стеклянной поверхности канала за ударной волной // *Известия РАН. Механика жидкости и газа*. — 2020. — т. 55, 5. — с. 592–596. — In English: *Doroshchenko I. A., Znamenskaya I. A., Kuli-zade T.A., Tatarenkova*

(Dolbnya) D. I. Characteristics of the turbulent boundary layer on a glass surface of a channel behind a shock wave // Fluid Dynamics. – 2020. —Т. 55, 5. С. 592–596. IF=0.67 (WoS), вклад автора –0.25. — DOI: [10.1134/S0015462820050043](https://doi.org/10.1134/S0015462820050043).

Публикации в сборниках трудов, индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus, RSCI:

7. *Znamenskaya I., Tatarenkova (Dolbnya) D., Mursenkova I. Kuli-Zade T., Karnozova E.* Extrusion of a nanosecond surface discharge plasma near a dielectric ledge // Journal of Physics: Conference Series. — 2021. — т. 2100, № 1. — 012010. SJR=0.21 (Scopus). — DOI: [10.1088/1742-6596/2100/1/012010](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2100/1/012010).
8. *Tatarenkova (Dolbnya) D., Znamenskaya I., Kuli-zade T. Ivanov I.* Nanosecond discharges in a non-stationary flow around an obstacle // Journal of Physics: Conference Series. — 2020. — т. 1698, № 1. — 012002. SJR=0.21 (Scopus). — DOI: [10.1088/1742-6596/1698/1/012002](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1698/1/012002).
9. *Znamenskaya I., Doroshchenko I., Tatarenkova (Dolbnya) D.* Edge Detection and Machine Learning Approach to Identify Flow Structures on Schlieren and Shadowgraph Images // Proceedings of the 30th International Conference on Computer Graphics and Machine Vision (GraphiCon 2020). Part 2. — 2020. — paper15–1–paper15–14. SJR=0.23 (Scopus). — DOI: [10.51130/graphicon-2020-2-3-15](https://doi.org/10.51130/graphicon-2020-2-3-15).
10. *Znamenskaya I. A., Tatarenkova (Dolbnya) D. I., Ivanov I. E.* Localization of a combined pulse discharge within a gas with a rectangular obstacle on the channel wall // Journal of Physics: Conference Series. — 2019. — т. 1359, № 1. — 012121. SJR=0.21 (Scopus). — DOI: [10.1088/1742-6596/1359/1/012121](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1359/1/012121).
11. *Tatarenkova (Dolbnya) D., Znamenskaya I., Kuli-zade T.* Nanosecond volume discharge in the flow with diffracting shock wave in the rectangular channel // Journal of Physics: Conference Series. — 2019. — т. 1394, № 1. — 012017. SJR=0.21 (Scopus). — DOI: [10.1088/1742-6596/1394/1/012017](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1394/1/012017).

12. *Znamenskaya I. A., Koroteeva E. Y., Timokhin M. Y. Mursenkova I. V., Glazyrin F. N., Tatarenkova (Dolbnya) D. I.* Experimental investigation of the flow dynamics and boundary layer in a shock tube with discharge section based on digital panoramic methods // AIP Conference Proceedings. — 2018. — т. 2027. — 030161. SJR=0.19 (Scopus). — DOI: [10.1063/1.5065255](https://doi.org/10.1063/1.5065255).

Статьи в иных сборниках трудов:

13. *Долбня Д. И., Знаменская И. А., Кули-заде Т. А. Луцкий А. Е.* Импульсная ионизация сверхзвукового течения в профилированном канале // Материалы XIV Международной конференции по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли. — 2022.
14. *Знаменская И. А., Луцкий А. Е., Долбня Д. И.* Визуализация высокоскоростной теневой съемкой, импульсным разрядом и численным моделированием сверхзвукового течения в канале с препятствием // 29-я Международная конференция по компьютерной графике и машинному зрению. — 2022.
15. *Долбня, Д. И., Знаменская И. А., Луцкий А. Е.* Ударно-волновые процессы при самолокализации импульсного разряда в отрывные зоны сверхзвукового течения в канале с уступом // XXVI Всероссийский семинар с международным участием по струйным, отрывным и нестационарным течениям. — 2022.
16. *Знаменская И. А., Татаренкова (Долбня) Д. И., Кули-заде Т. А.* Объемная импульсная ионизация потока с косым скачком уплотнения в канале // Proceedings of the 19th Workshop on Magneto-Plasma Aerodynamics Ed. V.A. Bityurin. — 2019.

Список литературы

17. *Znamenskaya I., Mursenkova I., Doroshchenko I. Ivanov I.* Flow analysis of a shock wave at pulse ionization: Riemann problem implementation // *Physics of Fluids*. — 2019. — нояб. — т. 31, № 11. — с. 116101. — DOI: [10.1063/1.5125884](https://doi.org/10.1063/1.5125884).
18. *Znamenskaya I. A., Koroteev D. A., Lutsky A. E.* Discontinuity breakdown on shock wave interaction with nanosecond discharge // *Phys. Fluids*. — 2008. — май. — т. 20, № 5. — с. 056101. — DOI: [10.1063/1.2908010](https://doi.org/10.1063/1.2908010).