

На правах рукописи

КОРОТЕЕВ Дмитрий Анатольевич

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НАНОСЕКУНДНОГО ОБЪЕМНОГО РАЗРЯДА С
ГАЗОДИНАМИЧЕСКИМИ РАЗРЫВАМИ**

Специальность 01.04.17 – химическая физика,
в том числе физика горения и взрыва

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва - 2008

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

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

Официальные оппоненты: кандидат физико-математических наук, ведущий
научный сотрудник

Георгиевский Павел Юрьевич

доктор физико-математических наук, профессор
Стариковская Светлана Михайловна

Ведущая организация: Объединенный институт высоких температур
РАН

Защита состоится 1 октября 2008 года в __:__ часов на заседании
диссертационного совета Д 501.002.01 в Московском государственном
университете им. М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, ГСП-2,
Ленинские горы, МГУ, физический факультет, аудитория _____

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

Автореферат разослан _____ 2008 года.

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

Лаптинская Т.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Актуальность проблемы взаимодействия потоков газа с плазменными образованиями обусловлена в первую очередь возможностью применения плазменных технологий для управления потоками. Активно обсуждается использование плазмы для снижения теплового воздействия набегающего потока на летательные аппараты, управления внешним и внутренним обтеканием, увеличения подъёмной силы крыла, уменьшения шумового эффекта летательных аппаратов и аэродинамических установок. Кроме того, существует ряд других важнейших научно-технических задач, решение которых невозможно без детального изучения фундаментальных закономерностей плазменной газодинамики. Среди таких задач можно выделить следующие:

- проблема возникновения ударно-волновых образований в газоразрядных лазерах, влияние ударных волн на параметры излучения;
- влияние газовых разрядов на процессы воспламенения, горения и детонации;
- проблема ослабления взрывных ударных волн.

В данной работе решается фундаментальная задача плазменной газодинамики о взаимодействии газодинамического разрыва с однородной объёмной областью наносекундной плазмы. Представлены результаты экспериментального исследования взаимодействия плоской ударной волны и зоны контактного перехода с областью короткоживущей плазмы, реализованной при инициировании на участке канала течения импульсного объёмного разряда с плазменными электродами.

Целью диссертационной работы является комплексное экспериментальное исследование процесса взаимодействия разрывного газодинамического течения с областью наносекундной ионизации, созданной поперечным объёмным

импульсным разрядом. Достижение этой цели предполагает решение ряда основных задач:

- экспериментальная реализация наносекундной ионизации области газодинамического разрыва;
- исследование пространственно-временных и спектральных характеристик плазмы наносекундного объёмного разряда, инициированного в потоке с газодинамическим разрывом;
- исследование поля течения после разрядного воздействия на поток;
- разработка и верификация методики определения доли разрядной энергии, идущей на нагрев газа за время разряда;
- оценки эффективности воздействия разряда на ударную волну в канале.

Научная новизна работы

Объёмные разряды субмикросекундной длительности, обладающие высокой степенью однородности энерговклада, не рассматривались ранее в приложении детального изучения их взаимодействия с высокоскоростными потоками газа. Этот факт обуславливает научную новизну работы, которая характеризуется следующими основными результатами:

- установлен эффект самолокализации разряда перед газодинамическим скачком;
- показана возможность управления параметрами разрядного энерговклада при помощи газодинамических скачков;
- установлено, что при локализации наносекундного разряда перед ударной волной на фронте последней возникает распад разрыва;
- проведены вычисления доли разрядной энергии, идущей на нагрев газа за время протекания тока импульсного объёмного разряда с плазменными электродами;
- показана возможность применения наносекундных объёмных разрядов для управления параметрами течения в канале.

Научная и практическая ценность работы

Научная ценность работы заключается в получении экспериментальных данных по свойствам плазмы наносекундного объёмного разряда при его инициировании на участке течения с газодинамическим разрывом; определении зависимости величины плотности разрядного энергоклада от объёма области межэлектродного пространства, ограниченной газодинамическим разрывом; детальном исследовании свойств течения после разрядного воздействия; разработке методики определения доли разрядной энергии, идущей на нагрев газа за время разряда; получении систематических экспериментальных данных по динамике разрывов, на основе которых возможна верификация численных моделей и методов расчёта газодинамических течений с энергоподводом.

Практическая ценность работы обуславливается возможностью использования полученных данных при проектировании устройств для управления параметрами потоков газа; применимостью результатов по управлению параметрами разрядного энергоклада при помощи газодинамических разрывов в приложении к газоразрядным лазерам.

Основные положения, выносимые автором на защиту

- бездиафрагменный способ реализации явления распада плоского разрыва в канале;
- способ импульсного воздействия на ударную волну в канале;
- метод управления объёмным разрядным энергокладом при помощи газодинамических разрывов;
- способ визуализации области контактного перехода;
- методика оценки и оценка доли энергии объёмного разряда субмикросекундной длительности, идущей на нагрев газа за время разряда;
- результаты исследования пространственно-временных и спектральных характеристик плазмы наносекундного объёмного разряда, инициированного в потоке с газодинамическим разрывом;

- экспериментальная зависимость плотности разрядного энерговклада от объёма области межэлектродного пространства, ограниченной газодинамическим разрывом;
- результаты исследования свойств нестационарного квазидвумерного течения после наносекундной ионизации области плоской ударной волны в канале;

Апробация работы и публикации

Основные результаты работы докладывались на следующих конференциях.

1. Ломоносовские чтения (Москва, МГУ, 2008)
2. III Школа-семинар по магнитоплазменной аэродинамике (Москва, 2008)
3. XXXIII Международная конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу (Звенигород, 2008)
4. XV Школа-семинар «Современные проблемы аэрогидродинамики» (Сочи, 2007)
5. XIII Международная конференция «Методы аэрофизических исследований» (Новосибирск, 2007)
6. XII Международная конференция Ломоносов-2005 (Москва, МГУ, 2005)
7. XII Школа-семинар «Современные проблемы аэрогидродинамики» (Сочи, 2004)

По результатам работы опубликовано 5 статей в реферируемых научных изданиях, 7 статей в трудах всероссийских и международных конференций, 7 тезисов докладов на всероссийских и международных конференциях.

Структура и объём работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы (67 ссылок). Объём диссертации составляет 106 страниц. Работа содержит 43 рисунка.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обосновывается актуальность диссертационной работы, её научная новизна и практическая ценность. Формулируются цели работы и постановка научной задачи. Излагаются основные положения, выносимые автором на защиту.

Первая глава посвящена анализу работ по исследованию взаимодействия ударных волн с плазменными образованиями. В главе также приводится обзор публикаций по разработке и исследованию свойств наносекундных объёмных разрядов. Проводится анализ методов реализации распада произвольного разрыва.

Изучение опубликованных данных по взаимодействию ударных волн с объёмными плазменными областями показало, что в большинстве работ рассматриваются относительно долгоживущие плазменные образования. Время жизни разрядной плазмы сравнимо с характерными газодинамическими временами на масштабах объекта исследования или превосходит их. В качестве основных газодинамических эффектов, наблюдаемых при распространении ударной волны по плазменной области можно выделить:

- увеличение скорости ударной волны при вхождении в плазменную область или при иницировании разряда в момент, когда волна находится в межэлектродном промежутке,
- зависимость величины изменения скорости от полярности электродов,
- увеличение толщины ударной волны в плазме,
- образование двойного электрического слоя на фронте ударной волны и плазменного предвестника перед фронтом,
- локальное увеличение температуры всех компонент в области предвестника,
- увеличение толщины ударного слоя при движении модельных объектов в плазменной области.

Анализ работ, посвященных созданию и изучению свойств наносекундных объёмных разрядов, показывает эффективность применения предыонизации для достижения однородности поля разряда и стабильности времени начала пробоя. С точки зрения высокой степени однородности области энерговклада лучшим образом себя зарекомендовали разряды с плазменными электродами.

Работы по реализации и изучению явления распада произвольного разрыва свидетельствуют о хорошей разработанности аналитических и численных методов решения задачи Римана. Экспериментальная реализация классического одномерного распада разрыва сводится к организации догонного или встречного взаимодействия ударных волн и (или) контактных поверхностей. Методы, связанные с привлечением механических перегородок, вносят сильные искажения в структуру течения особенно на ранних временных стадиях после «исчезновения» перегородки.

Во второй главе описывается экспериментальная установка и её конфигурации для исследования пространственных, временных и спектральных свойств плазмы наносекундного объёмного разряда с плазменными электродами при его инициировании в невозмущённом газе и в потоке с газодинамическим разрывом. Представлены особенности теневой схемы для изучения свойств течения после разрядного воздействия.

При проведении исследований импульсной ионизации области газодинамических разрывов использовалась комбинированная экспериментальная установка, представляющая собой ударную трубу со встроенной в канал течения разрядной камерой специальной конструкции.

Газодинамическая часть – однодиафрагменная ударная труба с прямоугольным каналом течения $24 \times 48 \text{ мм}^2$ (рис. 1). Рабочим газом является воздух, толкающим – гелий. Диапазон начальных давлений – $1 \div 150$ торр. Диапазон реализуемых чисел Маха ударной волны – $1.1 \div 4.5$. Начальное давление в секциях высокого и низкого давления контролируется при помощи манометров, скорость ударной волны – при помощи системы пьезодатчиков,

соединенных с цифровым осциллографом. Рабочая поверхность пьезодатчиков расположена заподлицо со стенками канала течения.

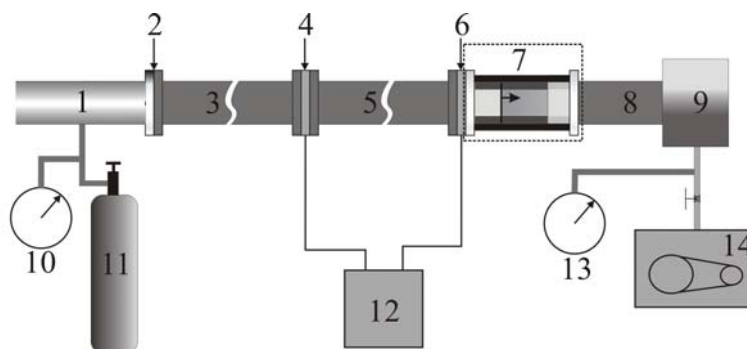


Рис. 1. Схематическое представление газодинамической части экспериментальной установки. 1 – камера высокого давления, 2 – диафрагменная секция, 3 – первое колено канала течения, 4 – текстолитовая вставка с пьезодатчиками, 5 – второе колено канала течения, 6 – текстолитовая вставка с пьезодатчиками, 7 – разрядная камера, 8 – третье колено канала течения, 9 – гасящий бак, 10 – манометр камеры высокого давления, 11 – баллон с гелием, 12 – цифровой осциллограф, 13 – вакуумметр, 14 – вакуумный насос.

В разрядной камере, встроенной в канал течения, реализуется сильноточный объемный импульсный разряд наносекундной длительности. Верхняя и нижняя стенки камеры представляют собой плазменные электроды, а боковые стенки выполнены из кварцевых стекол с широкой полосой пропускания электромагнитного излучения. Ультрафиолетовое свечение скользящих разрядов плазменных электродов обеспечивает предыонизацию области развития основного объемного разряда, что обеспечивает высокую степень однородности последнего. Наличие кварцевых стекол позволяет наблюдать за газоразрядными и газодинамическими процессами в камере с использованием соответствующих систем диагностики. Разрядная секция выполнена таким образом, что не искажает геометрии канала течения. Система синхронизации позволяет инициировать разряд в любой момент нестационарного газодинамического течения в камере.

Исследование пространственно-временных характеристик свечения плазмы разряда в покоящемся газе и в потоке с газодинамическими скачками уплотнения проводились с использованием цифровых фотоаппаратов Nikon

D50 и электронно-оптической стробируемой камеры с затворным импульсом наносекундной длительности Nanogate 2.

Исследование спектральных характеристик плазмы разряда проводилось при помощи одноканального цифрового спектрометра Avantes Avaspec 102 с оптоволоконным световодом (полоса пропускания 200÷800 нм).

Для исследования динамики и структуры газодинамических разрывов после наносекундной ионизации области ударной волны использовалась теневая схема, позволяющая проецировать мгновенное поле течения на матрицу цифрового фотоаппарата Nikon D50 при помощи пучка света, созданного импульсным лазером и оптической системой.

Третья глава посвящена описанию и анализу экспериментальных данных по исследованию пространственно-временных и спектральных свойств плазмы наносекундного объёмного разряда с плазменными электродами при его инициировании в невозмущённом газе и в потоке с газодинамическими разрывами.

В параграфе 3.1 приводятся экспериментальные данные по исследованию зависимости интенсивности свечения разряда от давления при его инициировании в неподвижном газе. Анализируются фотоизображения свечения разряда и спектры свечения в воздухе при давлениях 2÷150 торр. Показывается, что интегральная интенсивность свечения, как и интенсивность характерных линий спектра (вторая положительная система N₂), убывает с ростом давления, что вызвано увеличением скорости релаксационных процессов с увеличением частоты столкновений частиц всех сортов и уменьшением среднего удельного энерговклада, приходящегося на одну молекулу.

В параграфе 3.2 описываются эксперименты по определению времени свечения разряда, инициированного в неподвижном газе. Показывается, что при давлении 12.5 торр это время не превосходит 200 нс. С ростом давления до 75 торр время свечения уменьшается на 20%, что объясняется увеличением

частоты столкновений частиц плазмы разряда и, соответственно, ускорением релаксационных процессов.

В параграфе 3.3 приведены результаты исследования поля свечения плазмы наносекундного объёмного разряда при наличии в разрядной камере плоской ударной волны.

Отмечается, что в диапазоне чисел Маха, реализуемом в эксперименте ($1.1 \div 4.5$), время свечения разряда и время протекания тока разряда много меньше характерных газодинамических времен. Таким образом, газодинамическая структура, находящаяся в межэлектродном пространстве, практически неподвижна за время разряда.

Приводятся интегральные (по времени) фотоизображения свечения разряда при наличии в разрядной камере ударной волны (рис. 2). Очевиден факт стягивания зоны свечения в область разрядного промежутка перед ударной волной. На правом кадре рис. 2 левая чёткая граница области свечения соответствует фронту ударной волны. Такое распределение плазмы связано с тем, что параметр E/N , определяющий характеристики разряда, испытывает скачок большой интенсивности на фронте ударной волны. Эффективная проводимость воздуха в области низкого давления перед ударной волной в десятки раз превосходит проводимость за волной и разряд локализуется в области низкого давления (и плотности). Эффект локализации свечения перед ударной волной наблюдался во всём исследуемом диапазоне чисел Маха ударной волны ($M = 1.7 \div 4.5$) и для всех возможных положений фронта ударной волны в разрядном промежутке.

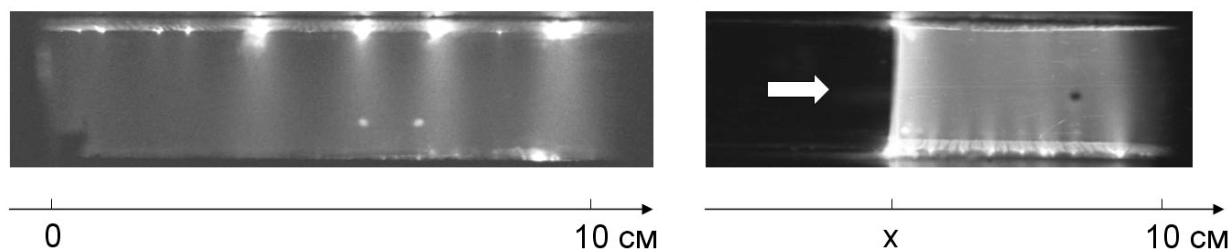


Рис. 2. Свечение разряда в невозмущенном газе (слева) и при наличии ударной волны в разрядной области (справа). Стрелка указывает направление потока.

В параграфе также приводятся экспериментальная зависимость интенсивности свечения I , усредненной по области свечения, от координаты x фронта ударной волны в разрядном промежутке на момент инициирования разряда (рис. 3а). Показывается, что в диапазоне $0 \leq x \leq 9.5$ см эта зависимость аппроксимируется функцией

$$I(x) = \frac{I_0}{1 - \frac{x}{L}}, \quad (1)$$

где I_0 – интенсивность свечения плазмы разряда в невозмущённом газе при соответствующем давлении, $L = 10$ см – длина рабочей области разрядного промежутка.

Зависимость интенсивности основных линий спектра от координаты ударной волны (рис. 3б) также аппроксимируется функцией вида (1), где в качестве I_0 выступает интенсивность соответствующей линии при инициировании разряда в невозмущённом газе.

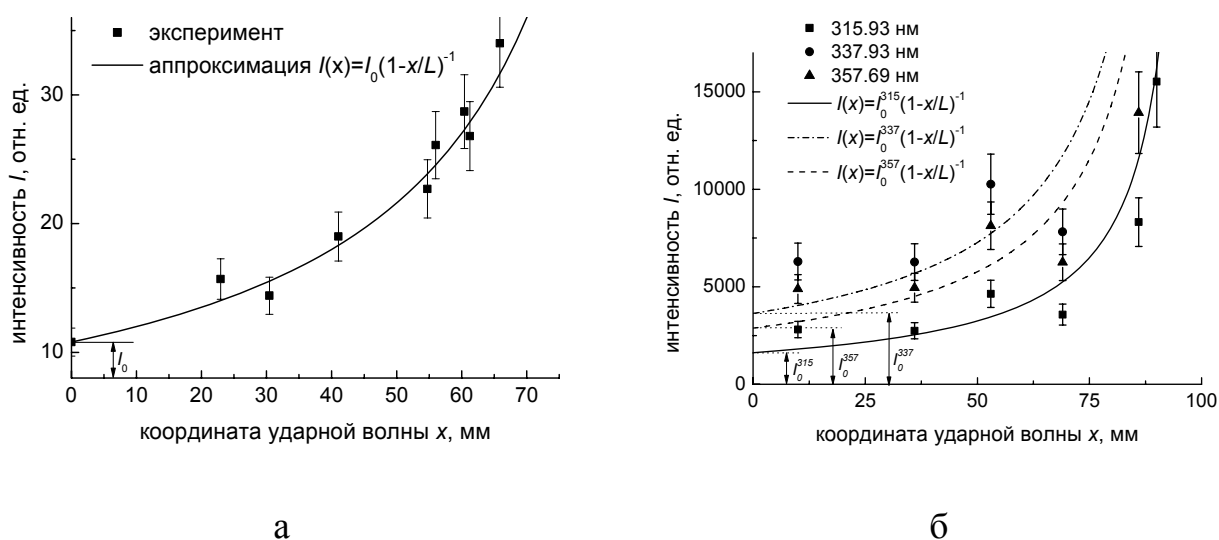


Рис. 3. Зависимость интенсивности свечения плазмы разряда (а) и интенсивности характерных линий спектра (б) от координаты ударной волны в разрядном промежутке.

С уменьшением объема области локализации в 10 раз при помощи ударной волны время свечения разряда увеличивается не более чем в 1.25 раза.

В параграфе 3.4 приводятся данные по исследованию области свечения разряда при наличии в разрядной камере области контактного перехода между

воздухом и гелием для потоков с числами Маха ударной волны не меньших 3.5. Отмечается, что свечение локализуется в зоне пониженной плотности перед контактном переходом (рис. 4а). Этот эффект также объясняется многократным уменьшением эффективной проводимости газа при переходе в область толкающего газа. В отличие от случая с ударной волной, изменение проводимости связано не только со скачком параметра E/N , но и с резким изменением потенциала ионизации на контактном переходе воздух-гелий.

Левая граница области свечения, соответствующая зоне контактного перехода, не такая чёткая и резкая как в случае с ударной волной. Толщина переходной области здесь составляет $5\div 10$ мм, что находится в соответствии и измерениями толщины области контактного перехода при помощи методов интерферометрии, рентгеноскопии и других. Координата области контактного перехода x , вычисленная по методике Майрлса с учётом настроек экспериментального оборудования, с точностью до 10 мм совпадает с координатой вышеупомянутой переходной зоны свечения. Перечисленные факты позволяют сделать вывод о том, что используемый разряд может применяться как средство визуализации основных газодинамических структур в ударных трубах.

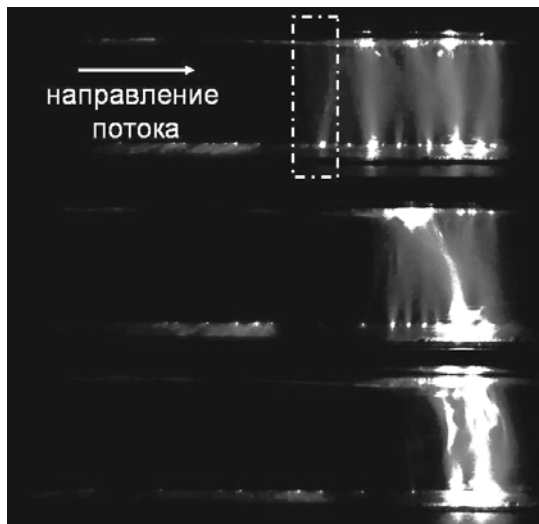
Зависимость интенсивности свечения разряда от координаты области контактного перехода в разрядной камере приведена на рис. 4б.

В параграфе 3.5 проводится сопоставление экспериментальных данных, описанных в параграфе 3.3 с результатами плазмохимического расчета параметров разряда (п. 1 в списке публикаций автора). Делается вывод о том, что зона свечения совпадает с зоной разрядного энерговклада и величина удельного разрядного энерговклада q в области разрядной камеры объёмом V , находящейся перед ударной волной, выражается формулой

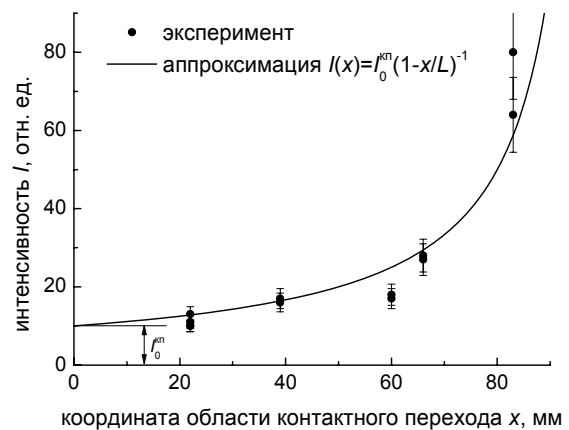
$$q = q_0 \frac{V_0}{V}, \quad (2)$$

где V_0 – полный объём разрядной камеры, q_0 – удельный энерговклад при иницировании разряда в неподвижном газе при давлении, равном давлению

перед фронтом ударной волны. Формула (2) применима в диапазоне $0.05 \cdot V_0 \leq V \leq V_0$. Показывается, что при локализации области разрядного воздействия газодинамическими разрывами величина удельного разрядного энерговклада может быть полностью охарактеризована интенсивностью свечения плазмы разряда, измеренной по интегральным фотоизображениям, интенсивностью одной из характерных полос спектра или интегральной по спектру интенсивностью свечения, т.е. $q(x) \sim I(x)$.



а



б

Рис. 4. Фотоизображения свечения плазмы разряда при различных положениях области контактного перехода воздух-гелий (отмечена штрихпунктирным контуром) в разрядной камере (а) и зависимость интенсивности свечения плазмы разряда от координаты контактного перехода (б).

В четвёртой главе представлены результаты исследования свойств газодинамического течения после разрядного воздействия.

В параграфе 4.1 приводятся данные экспериментального исследования особенностей течения после наносекундной ионизации области ударной волны на основе теневых изображений.

Анализируются процессы, проходящие в разрядной области и характерные времена этих процессов. Отмечается, что за время разряда существенно изменяется температура поступательно-вращательных степеней свободы молекул газа и его давление. При локализации разряда перед ударной

волной мгновенный (с газодинамической точки зрения) нагрев газа перед фронтом приводит к локальному (по времени) нарушению условий Ренкина-Гюгонио, что влечет за собой явление распада плоского разрыва (рис. 5). Вместо исходной ударной волны Y_0 образуются две ударные волны Y_1 , Y_2 и контактный разрыв K_1 . Y_1 распространяется по области неравновесного газа, Y_2 – навстречу спутному потоку, сформированному за исходной ударной волной.

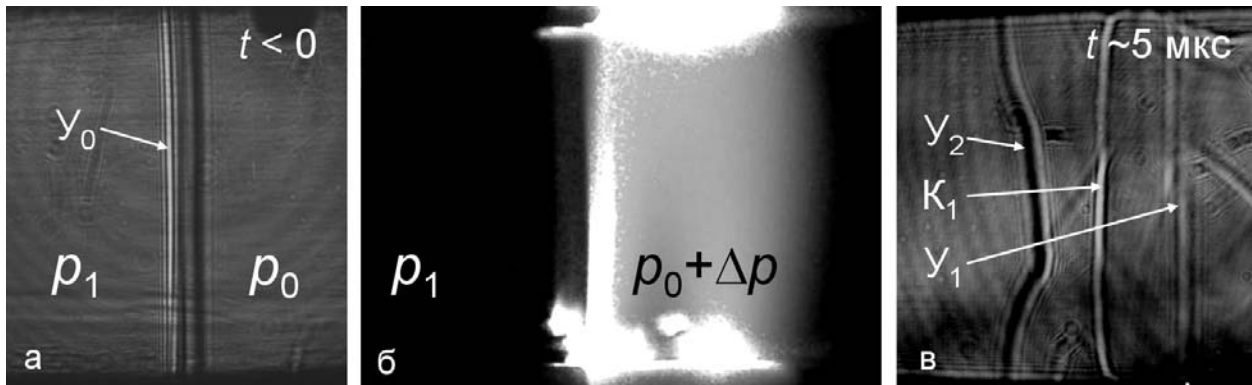


Рис. 5. Схематическое представление реализации распада разрыва. а – теньевая фотография исходной (невозмущенной) ударной волны, б – свечение разряда перед ударной волной, в – теньевая фотография структуры разрывов после разрядного воздействия.

При длине области локализации энерговклада Λ , меньшей 1 см (при величине плотности энерговклада превышающей 0.08 мДж/мм^3), также наблюдается второй распад разрыва на конце разрядного промежутка, где формируются ударная волна Y_3 , контактная поверхность K_2 и веер волн разрядки (рис. 6). Вертикальные разрывы искривлены из-за наличия поперечных возмущений $Y_{\text{п}}$, отходящих от плазменных электродов.

Анализ теньевых изображений относительно поздних стадий течения (более 25 мкс после разрядного воздействия) при $\Lambda < 1 \text{ см}$ показал присутствие в потоке неустойчивости типа Рихтмайера-Мешкова. Она формируется при догонном взаимодействии ударной волны Y_1 с искривленной контактной поверхностью K_2 . На рис. 7б неустойчивая контактная поверхность обозначена как $K_{\text{рм}}$.

В параграфе 4.2 описывается методика определения доли разрядной энергии $K_{\text{т}}$, идущей на нагрев газа за время разряда. Теньевые изображения

течения в первые микросекунды после разряда сопоставляются с аналитическим решением задачи о распаде произвольного разрыва. Вычисленное таким образом значение K_T находится в диапазоне $(25 \pm 5)\%$ при начальных давлениях $25 \div 80$ торр. При $L = 1$ см и начальном давлении 25 торр изменение поступательной температуры за время разряда достигает 900 К. Адекватность модели мгновенного энерговложения в область перед ударной волной и правильность оценок величины K_T подтверждается при сравнении экспериментальных теневых изображений с результатами расчета параметров течения в условиях эксперимента (рис. 7). Расчёт проводился ведущим научным сотрудником ИМП им М.В. Келдыша, доктором физико-математических наук А.Е. Луцким. Использовалась математическая модель нестационарных уравнений Эйлера. Численное интегрирование уравнений проводилось при помощи обобщенной разностной схемы С.К. Годунова с учётом влияния плазменных электродов на картину течения.

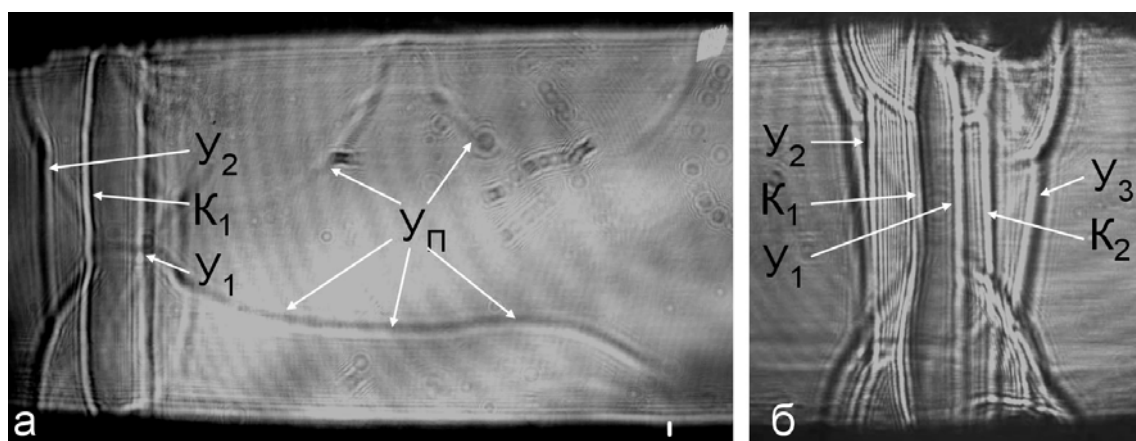


Рис. 6. Распад разрыва при различных размерах области локализации энерговклада. а – $L = 33$ мм, б – $L = 8$ мм.

В параграфе 4.3 рассматриваются характеристики проходящей ударной волны U_1 с точки зрения её механического воздействия на объекты, потенциально расположенные в области энерговклада. Отмечается, что в условиях эксперимента реализуем случай, когда скорость проходящей ударной волны в 1.5 раза превышает скорость исходной, а перепад давлений на проходящей волне может быть уменьшен в два раза по сравнению с перепадом

на исходной волне. В параграфе также приводятся аналитические зависимости скорости проходящей ударной волны и перепада давлений на её фронте от величин Λ и q для нескольких характерных случаев с начальными и граничными условиями, соответствующими экспериментальным.

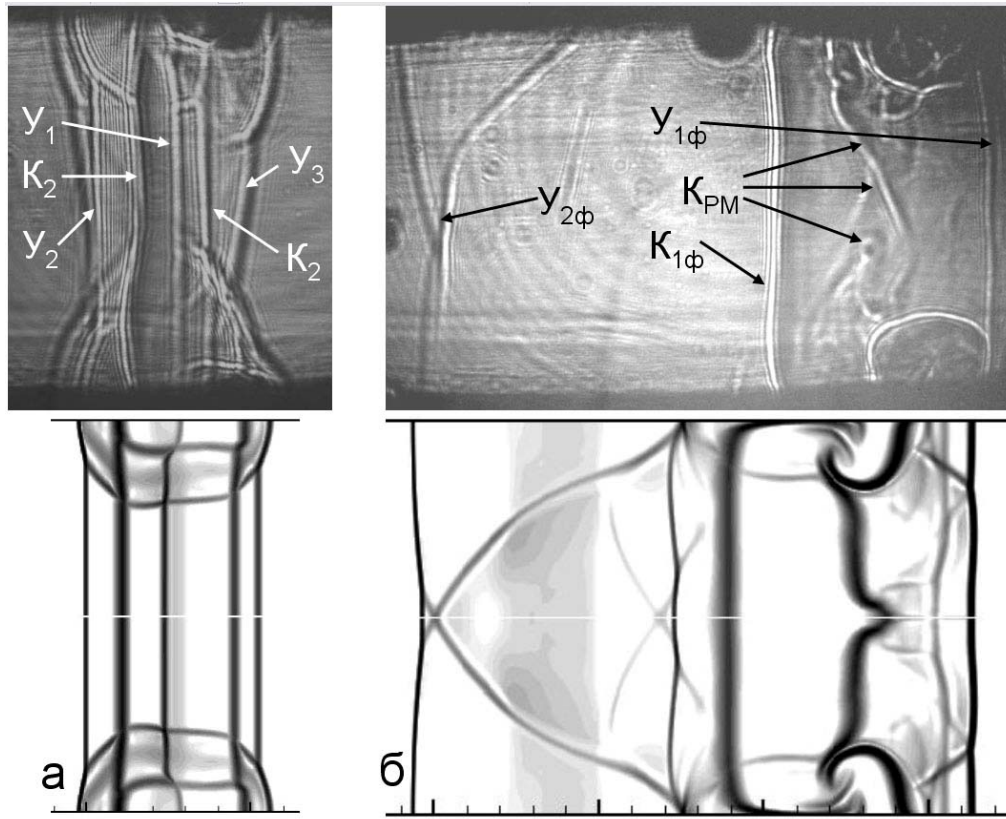


Рис. 7. Сопоставление теневых фотоизображений поля течения (сверху) и двумерного расчёта в условиях эксперимента (снизу) на стадии распада разрыва (а) и неустойчивости Рихтмайера-Мешкова (б).

В заключении сформулированы основные выводы по результатам работы:

1. Выполнено комплексное исследование нестационарного процесса взаимодействия разрывного газодинамического течения с высокооднородной неравновесной областью объёмной ионизации, созданной импульсным разрядом с предыонизацией ультрафиолетовым свечением от плазменных электродов. Проведены эксперименты по изучению влияния ударных волн с числами Маха $1.7 \div 4.5$ и областей контактного перехода на параметры объёмного разряда субмикросекундной

длительности. Экспериментально исследовались особенности течения после импульсной ионизации области плоской ударной волны.

2. Исследования пространственно-временных и спектральных характеристик плазмы наносекундного объёмного разряда, инициированного в области потока газа с плоским скачком уплотнения, показали возможность управления параметрами разрядного энергоклада при помощи эффекта самолокализации разряда в потоке с разрывами. Установлено, что величина удельного разрядного энергоклада может быть охарактеризована средней локальной интенсивностью свечения плазмы данного разряда, интенсивностью одной из характерных полос спектра или интегральной по спектру интенсивностью свечения. Показано, что используемый тип разряда может применяться для визуализации структуры течения в ударной трубе.
3. С применением теневой методики установлено, что после воздействия импульсного объёмного разряда на область потока с плоской ударной волной ($M = 1.7 \div 3.2$) в канале реализуется явление распада разрыва на границе газ-короткоживущая плазма. Возникает двумерное нестационарное разрывное течение с образованием контактной поверхности и двух ударных волн, одна из которых распространяется по области неравновесного газа.
4. Разработана методика определения доли разрядной энергии, идущей на нагрев газа непосредственно за время разряда. В условиях эксперимента эта доля составляет $(25 \pm 5)\%$ при начальных давлениях $25 \div 80$ торр. Сравнение экспериментальных теневых изображений структуры течения ($2 \div 100$ мкс после разряда) с результатами двумерных численных расчётов для условий эксперимента показало точность двумерной модели мгновенного энерговложения в область перед фронтом ударной волны. Установлено, что при локализации области энергоклада ударной волной величина повышения температуры после разрядного воздействия может достигать 900 К, что соответствует скорости нарастания температуры 5 К/нс.
5. Проанализирована возможность применения импульсных объёмных разрядов для управления параметрами разрывного течения газа.

Установлено, что при разрядном воздействии в условиях эксперимента можно добиться двукратного уменьшения интенсивности проходящей ударной волны на некотором участке канала по сравнению с интенсивностью падающей.

6. Визуализирована область контактного перехода (воздух-гелий) импульсным объемным разрядом.

Содержание диссертации отражено в следующих работах:

1. Знаменская И.А., Коротеев Д.А., Попов Н.А. Наносекундный сильноточный разряд в сверхзвуковом потоке газа // Теплофизика высоких температур. 2005. Том 43. №6. С. 820-827.
2. Знаменская И.А., Коротеев Д.А. Наносекундный объемный газовый разряд в потоке с газодинамическими разрывами // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. 2008. №1. С. 81-83.
3. Знаменская И.А., Коротеев Д.А., Луцкий А.Е. Экспериментальная реализация двумерной задачи о распаде разрыва при импульсной ионизации потока с ударной волной // Доклады академии наук. 2008. Том 420. №5. С. 619-622.
4. Znamenskaya I.A., Koroteev D.A., Lutsky A. E. Discontinuity breakdown on shock wave interaction with nanosecond discharge // Physics of Fluids. 2008. Vol. 20. P. 056101.
5. Коротеев Д.А. О воздействии плазменных образований на ударные волны // Полет. 2008. №2. С. 36-42.
6. Znamenskaya I.A., Koroteev D.A., and Popov N.A. Experimental study of shock wave interacting with plane gas-plasma boundary. // Proc. The XVI International Symposium on Transport Phenomena. Prague 2005 (CD).
7. Znamenskaya I.A., Koroteev D.A., Lutsky A.E., and Mursenkova I.V. Nanosecond ionization of flow with a flat shock wave. // Proc. XV International

- Conference on MHD Energy Conversion and VI Workshop on Magnetoplasma Aerodynamics for Aerospace Applications. Moscow 2005. Volume 2. P. 537-543.
8. Znamenskaya I.A., Koroteev D.A., and Lutsky A.E. Experimental realization and numerical study of processes arising in channel after instant energy input in the area in front of shock wave. // Proc. XIII International Conference on Methods of Aerophysical Research. Novosibirsk 2007. Volume 5. P. 239-243.
 9. Znamenskaya I.A., Koroteev D.A., Orlov D.M., Lutsky A.E., and Ivanov I.E. Nanosecond transversal discharges in shock tube channel // Proc. XXVI International Symposium on Shock Waves. Gettingen 2007 (CD).
 10. Знаменская И.А., Коротеев Д.А. Свечение плазмы импульсного объемного разряда с предыонизацией в потоке с плоской ударной волной и контактной поверхностью // Труды IX Международной научно-технической конференции «Оптические методы исследования потоков». Москва 2007. С. 208-211.
 11. Znamenskaya I.A., Koroteev D.A., Glow of nanosecond spatial discharge in shock tube flow with shock wave and contact zone // Proc. XIII International Symposium on Flow Visualization. Nice. 2008 (CD).
 12. Знаменская И.А., Коротеев Д.А., Луцкий А.Е., Воздействие сильноточного объёмного поперечного разряда на ударную волну в канале // Тезисы III Школы-семинара по магнитоплазменной аэродинамике. Москва 2008. С. 29-30.
 13. Знаменская И.А., Коротеев Д.А., Наносекундная ионизация газодинамического разрыва в канале. Тезисы научной конференции Ломоносовские чтения 2008. Секция физики. С. 218-221.
 14. Знаменская И.А., Коротеев Д.А., Костюков С.А., Кули-Заде Т.А., Латфуллин Д.Ф., Мурсенкова И.В. Исследование свечения плазмы наносекундных разрядов с высоким временным разрешением // Тезисы докладов XXXV Международной конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу. Звенигород 2008. С. 339.

15. Знаменская И.А., Коротеев Д.А. Особенности свечения плазмы объёмного наносекундного разряда при наличии в разрядной области ударной волны // Тезисы докладов конференции по радиационной плазмодинамике. Звенигород 2006. С. 198-199.
16. Знаменская И.А. Коротеев Д.А. Экспериментальное исследование ионизации течения с плоской ударной волной. Тезисы докладов XII школы-семинара «Современные проблемы аэрогидромеханики». Сочи 2004. С. 34.
17. Знаменская И.А., Коротеев Д.А., Луцкий А.Е., Мурсенкова И.В. Экспериментальное и численное исследование наносекундного энергоклада перед ударной волной в канале. Тезисы докладов XIII школы-семинара «Современные проблемы аэрогидромеханики». Сочи 2005. С. 43.
18. Коротеев Д.А. Наносекундная ионизация области перед ударной волной. Физический факультет МГУ // Тезисы докладов международной конференции «Ломоносов 2005». Секция «Физика». Том 1. Москва 2005. С. 127-129.
19. Знаменская И.А., Коротеев Д.А. Взаимодействие разрывных потоков газа в ударной трубе с наносекундным объёмным разрядом // Тезисы докладов XIII школы-семинара «Современные проблемы аэрогидромеханики». Сочи 2007. С. 49-50.