

На правах рукописи

ОРЛОВ Денис Михайлович

**НЕСТАЦИОНАРНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛОСКОЙ
УДАРНОЙ ВОЛНЫ С ОБЛАСТЬЮ НАНОСЕКУНДНОГО
РАСПРЕДЕЛЕННОГО СИЛЬНОТОЧНОГО
СКОЛЬЗЯЩЕГО РАЗРЯДА**

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2010

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

Научный руководитель	доктор физико-математических наук, профессор Знаменская Ирина Александровна
Официальные оппоненты	доктор физико-математических наук, профессор Голуб Виктор Владимирович кандидат физико-математических наук, Попов Николай Александрович
Ведущая организация	Институт нефтехимического синтеза им. А.В.Топчиева РАН

Защита состоится 19 мая 2010 года в 16:30 на заседании диссертационного совета Д 501.002.01 в Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, МГУ, физический факультет, аудитория ЮФА.

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

Автореферат разослан 15 апреля 2010 года

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

Т.В. Лаптинская

1 **Общая характеристика работы**

Актуальность работы.

Интенсивно проводимые в последние годы исследования в области взаимодействий ударных волн с плазмой различных типов разрядов, влияния возникающих неоднородностей и слабых возмущений на распространение газодинамических разрывов имели конечную прикладную цель – коррекцию режимов обтекания. Для обеспечения безопасного и эффективного полета на высоких скоростях необходимо максимально исследовать возможность контроля сверхзвукового потока. В зависимости от стадии полета реализуется либо нестационарный, либо стационарный, установившийся, режим течения. Нестационарное течение характеризуется изменением во времени параметров газа и положений разрывов, что затрудняет управление потоком и ведет к необходимости корректировки степени воздействия на поток. В случае импульсного локального воздействия приходится изменять не только интенсивность воздействия, но и точку воздействия.

Проводимый в диссертации анализ газодинамического аспекта воздействия импульсного разряда на поток с ударной волной позволяет также оценить некоторые параметры плазмы и более глубоко понять протекающие в ней физико-химические процессы.

Постановка задачи. В данной работе решается фундаментальная задача плазменной газодинамики о нестационарном взаимодействии газодинамического разрыва (ударной волны) с приповерхностной областью поперечного импульсного сильноточного скользящего распределенного разряда. Решается самосогласованная задача взаимного воздействия двух объектов исследования – ударной волны и импульсного разряда.

Цель диссертационной работы - экспериментально исследовать нестационарный процесс взаимодействия высокоскоростного потока

воздуха с плоской ударной волной с приповерхностной протяженной областью газа, созданной импульсным скользящим сильноточным поперечным разрядом. На пути к данной цели необходимо было решить две взаимосвязанные задачи: исследовать воздействие на высокоскоростной поток газа с ударной волной импульсного источника энерговклада на основе поверхностного разряда; исследовать влияние течения с ударной волной на развитие разряда, и по анализу газодинамических полей течения оценить параметры приповерхностного слоя газа, образованного разрядом при различных условиях и на различных временных стадиях после его инициирования.

При решении этих задач необходимо было:

- наладить системы синхронизации и диагностики разряда и потока газа;
- провести исследование пространственно-временных характеристик излучения разряда при различных начальных условиях, связанных с положением ударной волны в разрядном промежутке, ее числом Маха и начальным давлением в рабочей секции;
- провести исследование полей течения после разрядного воздействия на поток с ударной волной;
- разработать методику оценки параметров возбужденной разрядом области газа (температуры и доли разрядной энергии, идущей на нагрев газа за время разряда).

Научная новизна. Как следует из обзора литературы по нестационарному взаимодействию ударных волн с возмущениями, наносекундные поверхностные распределенные разряды не рассматривались ранее с точки зрения изучения их взаимодействия с высокоскоростными потоками газа с газодинамическими разрывами. В результате работы были получены следующие результаты, характеризующие ее научную новизну:

- обнаружены особенности локализации разряда при нахождении фронта падающей ударной волны в межэлектродной области: самолокализация плазмы перед фронтом ударной волны, неоднородность области локализации, а также выход разряда из межэлектродной области в виде П-образной конфигурации;
- на основе этих эффектов показана возможность управления параметрами разрядного энерговклада, а следовательно, и течением, при нахождении ударной волны в разрядной области;
- по анализу полей течения были оценены параметры приповерхностного слоя газа, образованного разрядом при различных условиях и на различных временных стадиях после его инициирования.

Научная ценность работы заключается в получении экспериментальных данных по параметрам нестационарной неравновесной высокотемпературной области газа, образованной импульсным скользящим разрядом на различных временных стадиях после прекращения тока разряда; оценке энергии идущей на возбуждение поступательных степеней свободы молекул за времена протекания тока разряда в зависимости от объёма области локализации плазмы, ограниченной газодинамическим разрывом; детальном исследовании свойств течения после разрядного воздействия; получении систематических экспериментальных данных по динамике течения, на основе которых возможна верификация численных моделей и методов расчёта газодинамических течений с энергоподводом.

Практическая ценность работы. Результаты работы могут быть использованы в качестве рекомендаций для проектирования эффективного плазменного актуатора, устройства для управления параметрами течения, и при создании летательных аппаратов нового поколения.

Основные положения, выносимые автором на защиту:

- экспериментальное моделирование двумерного процесса взаимодействия ударной волны с поверхностным импульсным энергокладом;
- метод управления поверхностным разрядом при помощи ударной волны (на основе эффекта самолокализации разряда);
- зависимость пространственно-временных характеристик плазмы импульсного поверхностного скользящего разряда от начального давления и от протяженности области его локализации, ограниченной ударной волной;
- результаты исследования динамики взаимодействия ударной волны с областью импульсного поверхностного разряда при различных ее протяженностях и временах после его инициирования;
- методика определения энергии, идущей на нагрев газа за время разряда, на основе сравнения экспериментальной динамики взаимодействия ударной волны с областью энергоклада с численными расчетами;
- оценка температур газа в области разряда на различных временах после его инициирования по анализу ударно-волновых конфигураций течения вблизи поверхности.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на международных и российских конференциях, симпозиумах и семинарах, в том числе: на XVI International Symposium on Transport Phenomena (Prague, 2005); на XXXIII и XXXV Звенигородских конференциях по физике плазмы и УТС (Звенигород, 2006, 2008); на XIII Международной конференции Ломоносов-2006 (Москва, 2006); на VI Международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях (Санкт-Петербург, 2006); на 12th International Symposium on Flow Visualization (Goettingen, 2006); на 7th и 8th International Workshop on Magnetoplasma Aerodynamics (Moscow, 2007, 2009); на 26th

(Goettingen, 2007) и 27th International Symposium on Shock Waves (St. Petersburg, 2009); на XV школе-семинаре «Современные проблемы аэрогидродинамики» (Сочи, 2007); на International conference on the methods of aerophysical research (Novosibirsk, 2008); на Третьей школе-семинаре по Магнитоплазменной Аэродинамике (Москва, 2008); на 13th International Symposium on Flow Visualization and 12th French Congress on Visualization in Fluid Mechanics (Nice, 2008); на XVII International Conference on Gas Discharges and their Applications (Cardiff, 2008); на Девятой Международной школе-семинаре "Модели и методы аэродинамики" (Евпатория, 2009); на X Юбилейной Международной научно-технической конференции «Оптические методы исследования потоков» (Москва, 2009); на 22nd International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive System (Minsk, 2009), на научной конференции Ломоносовские чтения – 2010 (Москва, 2010); на семинаре "Получение, исследование и применение низкотемпературной плазмы" имени профессора Л.С. Полака в Институте нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН (ИНХС РАН) и на научных семинарах кафедры молекулярной физики физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы (193 ссылки). Объем диссертации составляет 195 страниц. Работа содержит 81 рисунок.

2 Содержание диссертации

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

Первая глава посвящена анализу работ по исследованиям нестационарного взаимодействия ударных волн с возмущениями (в т.ч. с разрядами). Показано, что на сегодняшний день подробно исследованы последствия всевозможных механических возмущений стационарных и

нестационарных высокоскоростных потоков газа. Для контроля течения и ослабления газодинамических разрывов использование искусственно созданных газодинамических возмущений (например, подвод энергии при помощи газовых разрядов) представляется в значительной степени результативным. В главе также приводится обзор публикаций по исследованию различных типов поверхностных разрядов.

В первом параграфе 1.1 проведен анализ работ по исследованию нестационарного взаимодействия ударных волн с механическими возмущениями потока. В течение последних десятилетий выполнен большой объем экспериментальных и теоретических работ по исследованию отражения ударных волн от поверхностей, их дифракции на различных препятствиях. На сегодняшний день довольно полно исследованы последствия всевозможных механических возмущений, путем изменения граничных условий, стационарного и нестационарного потоков газа.

Во втором параграфе 1.2 проанализированы работы, посвященные исследованию взаимодействия ударных волн с газодинамическими возмущениями (ударными волнами, контактными поверхностями, вихрями и т.д.). При взаимодействии ударных волн с газодинамическими возмущениями происходит изменение параметров среды, формирование новых разрывов и поверхностей. Другими словами, при взаимодействии газодинамических возмущений происходит рождение новых более сложных по структуре возмущений. С точки зрения защиты сооружений и летательных аппаратов от ударно-волнового воздействия и для ослабления разрывов использование управляемых газодинамических возмущений представляется в значительной степени эффективным.

В параграфе 1.3 описываются энергетические методы воздействия на ударную волну: формирование теплового слоя и использование газовых разрядов. В зависимости от способа подвода энергии, можно локально нагревать газ, тем самым, воздействуя на поток, и создавать другие

возмущения (вихри, ударные волны, струи). Одним из наиболее распространенных способов подвода энергии в поток газа является использование электрических актуаторов, устройств на базе различных электрических разрядов. Опираясь на результаты обширных исследований по воздействию плазмы газовых разрядов на сверхзвуковой поток газа, можно с уверенностью утверждать, что результирующим механизмом, ведущим к появлению различных особенностей в поведении разрывов, является нагрев среды. Нагрев среды, совместно с возможными другими «нетермическими» эффектами, такими как, «ионный ветер», ионно-акустические волны, электронная теплопроводность, возникновение двойного электрического слоя, ведет к значительной перестройке течения и может быть использован для контроля высокоскоростных потоков газа.

В параграфе показано, что наиболее эффективным является импульсный или импульсно-периодический режим подвода энергии в среду (импульсные разряды). Он сочетает в себе как ударно-волновое, так и тепловое воздействие на течение. Основываясь на концепции локального и импульсно-периодического воздействия энерговклада на сверхзвуковой поток газа, многие разряды представляются невыгодными для создания на их основе устройств управления течением. Импульсный поверхностный скользящий разряд напротив весьма перспективен для использования в реальных условиях благодаря своим пространственно-временным и энергетическим характеристикам.

Вторая глава посвящена описанию экспериментальной установки, позволяющей моделировать и исследовать взаимодействия поверхностного разряда с ударной волной, и диагностического комплекса.

В параграфе 2.1 описана экспериментальная установка, представляющая собой ударную трубу со встроенной в нее разрядной секцией. Сечение канала камеры низкого давления и разрядной секции 24×48 мм². Рабочим газом служил воздух при давлениях 5-100 Торр. В канале с ударной волной на верхней и нижней стенках реализован

импульсный поперечный поверхностный разряд – квазинепрерывная система параллельных каналов, скользящих по диэлектрику («плазменный лист»). Две другие стенки представляли собой плоскопараллельные кварцевые стекла, через которые осуществлялась оптическая диагностика процессов в разрядной камере. Рабочее напряжение на разрядном промежутке – 24 кВ, ток – $\sim 1-2$ кА. Длительность разряда ~ 200 нс, что значительно меньше характерных газодинамических времен. Схема синхронизации позволяет инициировать разряд при различном положении падающей ударной волны в разрядной области. Числа Маха ударной волны $M=1.7\div 4$.

Во втором параграфе 2.2 описаны параметры скользящего поверхностного разряда, который выделяется из других типов разрядов особыми пространственно-временными и энергетическими свойствами и с газодинамической точки зрения может представлять интерес за счет достаточно большой мощности. Благодаря высоким значениям напряжения и электрического тока в широком диапазоне рабочих давлений достигаются большие плотности энерговложения в течение очень короткого промежутка времени.

Третий параграф 2.3 посвящен описанию методов исследования и диагностического оборудования. Пространственно-временные характеристики «плазменного листа» при его инициировании в потоке с ударной волной исследовались с помощью цифровых фотоаппаратов и стробируемой камеры с наносекундным затвором. Для исследования взаимодействия газодинамических возмущений, образующихся при реализации импульсного разряда, с падающей ударной волной использовался прямой теневой метод. Созданы однокадровая и двухкадровая оптические теневые системы зондирования течения.

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

Третья глава посвящена исследованию пространственно-временных характеристик излучения плазмы скользящего разряда в потоке воздуха с плоской ударной волной.

В первом параграфе 3.1 исследована пространственная структура свечения разряда в воздухе в присутствии ударной волны в разрядной области при давлениях $5 \div 100$ Торр и числах Маха $M=1.7 \div 4$. Обнаружен эффект самолокализации плазмы в области пониженного давления перед фронтом ударной волны в широком диапазоне параметра X , положения ударной волны внутри разрядной области ($X=0 \div 10$ см до ее конца). Благодаря этому эффекту, параметр X также характеризует протяженность области локализации разряда (Рис. 1). Была обнаружена неоднородность области самолокализации плазмы – помимо протяженного диффузного плазменного слоя, со случайно распределенными в нем яркими каналами, вблизи фронта ударной волны формируется узкая, но более интенсивно излучающая, область плазмы. Эффект самолокализации разряда в присутствии ударной волны может быть использован для автоматического энергоподвода в соответствующую область перед фронтом волны с учетом динамики ударно-волновых структур.

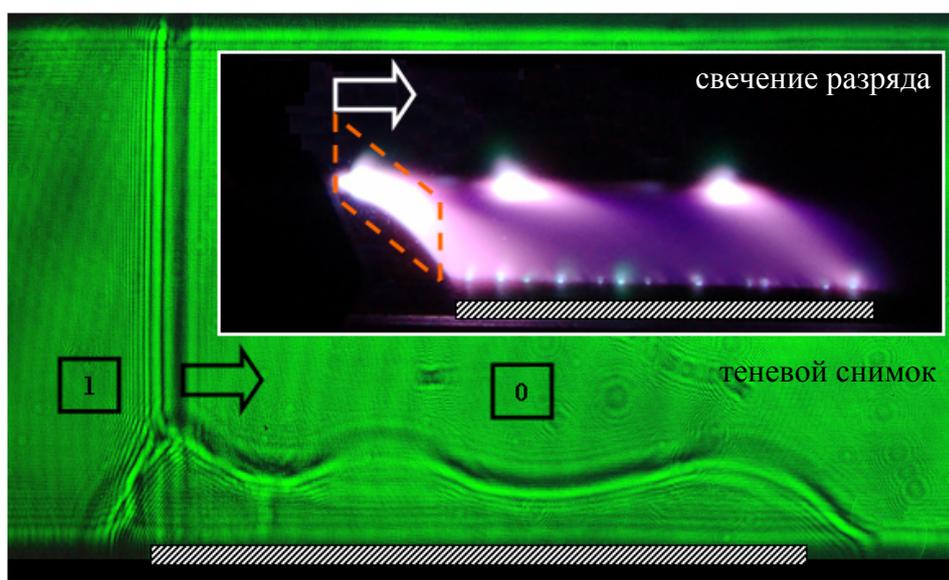


Рис. 1. Эффект самолокализации разряда. Стрелкой показано направление распространения ударной волны. 1 и 0 – области за и перед фронтом падающей ударной волны, соответственно. Заштрихованная область – область инициирования разряда (X). $M=2$; $X=3$ см; $\tau=2.7$ мкс (после разряда).

Во втором параграфе 3.2 проведены исследования размеров структурированной области плазмы, локализованной перед фронтом падающей ударной волны в зависимости от общей протяженности области разряда (X), ограниченной фронтом падающей ударной волны, и начального давления (P_0). Определены толщины и протяженности диффузного плазменного слоя и узкой яркой области вблизи фронта ударной волны. Размеры плазмы определялись по изображениям интегрального собственного свечения поверхностного разряда. Были получены зависимости толщин плазменного листа (диффузного плазменного слоя и узкой яркой области вблизи фронта ударной волны) от начального давления и параметра X . Толщина диффузного слоя менялась только с давлением (от 0.5 до 0.7 мм) и не зависела от размеров области локализации разряда (X). Толщина узкой яркой области вблизи фронта ударной волны, как и ее протяженность (b_I), возрастали с уменьшением X (толщина росла от 1 до 2 мм, а протяженность от 1 до 6 мм). При $X=1$ см протяженность яркой области достигала максимума (~6 мм) и оставалась неизменной вплоть до инициирования разряда на момент выхода ударной волны из разрядной области (Рис. 2). Протяженность диффузного слоя, со случайно распределенными в нем яркими каналами, соответствовала

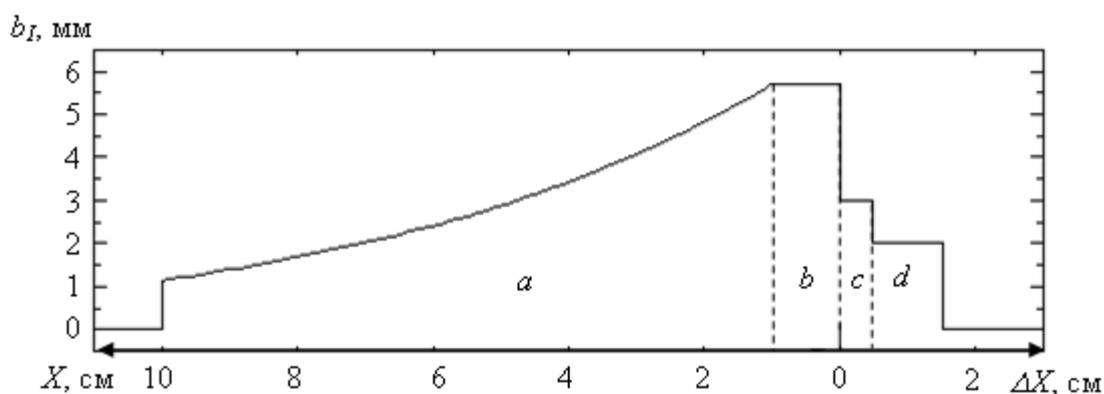


Рис. 2. Зависимость протяженности яркой области на фронте ударной волны (УВ) от ее положения относительно конца разрядного промежутка. a — область существования структурированного энерговклада. b — область существования только яркой области вблизи фронта УВ. c — область существования П-образной конфигурации. d — область существования и П-образной конфигурации, и энерговклада в поток.

разнице между общей протяженностью области локализации разряда (X) и протяженностью яркой области (b_l). Минимальная протяженность области локализации плазмы соответствовала – 0.6 см. Таким образом, была определена структура и построена геометрическая модель развития поверхностного скользящего разряда в зависимости от положения ударной волны внутри разрядной области (X) и начального давления (P_0).

В параграфе 3.3 исследовались структура и размеры разряда при его инициировании в момент выхода ударной волны из разрядной области на некоторое расстояние ΔX . В случае такого инициирования разряда, обнаружен эффект выхода разряда из межэлектродной области перед ударной волной. При этом возникала П-образная конфигурация, при которой разряд стягивался в тонкий канал соответствующей формы и по-прежнему преимущественно локализовался перед фронтом ударной волны (Рис. 3). При определенных условиях регистрировался переход от режима локализации разряда в виде П-образной конфигурации к режиму инициирования распределенного разряда также и в потоке за волной (в зоне высокого давления). Проведено исследование зависимости размеров (диаметра) узкой яркой области, расположенной на фронте ударной волны, от координаты выхода ΔX . Обнаружено два варианта существования П-образной конфигурации в зависимости от диаметра яркого канала на

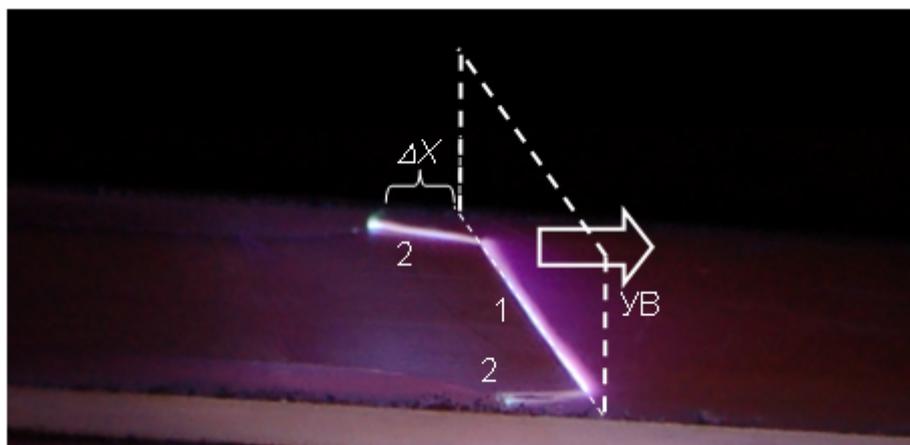


Рис. 3. Эффект выхода разряда из межэлектродного промежутка (снимок свечения). УВ – ударная волна; 1 – элемент канала тока, распространяющийся вдоль фронта УВ; 2 – параллельные потоку каналы тока; ΔX – координата УВ вне разрядного промежутка.

фронте волны. На Рис. 2. представлен результат анализа структуры свечения разряда в зависимости от параметров X и ΔX в исследуемом диапазоне давлений. На графике также буквами обозначены различные режимы локализации разряда.

В четвертом параграфе 3.4 предложен критерий смены режима локализации разряда, основанный на сопоставлении напряжений пробоя яркого канала тока, расположенного на фронте ударной волны, при той или иной его форме (прямая или П конфигурация).

В пятом параграфе 3.5 для оценки воздействия на разряд положения фронта ударной волны проводилось исследование интенсивности свечения плазмы при различных значениях размеров области локализации разряда (X). В приближении малого изменения энергетической эффективности G_C возбуждения электронным ударом состояния $N_2(C^3\Pi_u)$ второй положительной системы азота по сравнению с изменением энерговклада проведены оценки объемного энерговклада в газ (средняя плотность энергии увеличивается более чем в 2.5 раза при уменьшении X). Показано, что плотность энерговклада может быть охарактеризована средней интегральной интенсивностью свечения плазмы разряда.

В шестом параграфе 3.6 исследовались временные характеристики свечения разряда в случае нахождения ударной волны внутри разрядной области. Установлено, что длительность основного свечения плазмы в потоке с ударной волной в диапазоне длин волн 340-800 нм не превышает 200-700 нс в зависимости от размеров области локализации разряда (X). Т. о., время свечения плазмы разряда мало по сравнению с характерными газодинамическими временами. Это позволяет ассоциировать распределение свечения импульсного скользящего поверхностного разряда с распределением энерговклада.

Четвертая глава посвящена экспериментальным теневым исследованиям газодинамического взаимодействия падающей ударной волны с областью энерговклада на основе импульсного поверхностного

разряда при различных условиях его инициирования (X , P_0 и времени после разряда τ).

В первом параграфе 4.1 исследована динамика сверхзвукового нестационарного процесса взаимодействия плоской ударной волны с областью поверхностного импульсного энерговклада при давлениях $20 \div 100$ Торр, числах Маха $M=1.7 \div 3.2$ и при разных размерах области локализации энерговклада (X). Регистрация возмущений проводилась теневым методом. Были получены теневые изображения различных стадий взаимодействия для времен $\tau=1 \div 50$ мкс после разряда. Показано, что после взаимодействия с областью двойного разряда возникает близкое к двумерному течение, имеющее плоскость симметрии. Проанализированы и расшифрованы возникающие при таком взаимодействии газодинамические конфигурации. При инициировании разряда возникают ударные волны, вызванные быстрым введением энергии в ограниченную область пространства. Эволюция ударной волны после воздействия локализованного энерговклада определяется взаимодействием ударных волн: падающей и образованной энерговкладом, а также распространением по нестационарной приповерхностной нагретой области (Рис. 4). Обнаружено возникновение неустойчивости поверхности тангенциального разрыва (Рис. 5). Время возникновения неустойчивости зависело от начального давления и протяженности области локализации разряда.

Во втором параграфе 4.2 исследована динамика взаимодействия ударных волн с областью энерговклада на больших временах после разряда ($\tau > 30$ мкс), когда волны, образованные быстрым введением энергии в среду, затухают, а взаимодействие сводится к распространению ударной волны по нестационарной неравновесной высокотемпературной области газа вблизи нижней стенки канала (релаксирующей областью). В этом случае все исследования проводились при фиксированной протяженности области локализации плазмы, соответствующей инициированию плазмы в неподвижном воздухе ($X=10$ см). При

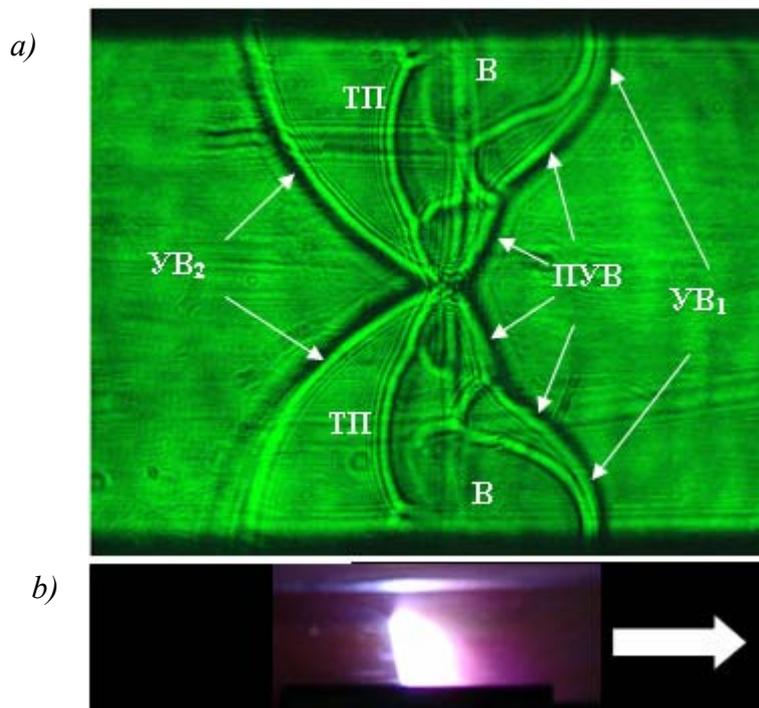


Рис. 4. Конфигурация течения при симметричном энерговкладе. *a* - теневой снимок: $P_0=25$ Торр; $M=2.5$; $X=1$ см; $\tau=8.8$ мкс. *b* - снимок свечения. Стрелкой показано направление распространения падающей ударной волны. УВ₁ – ударные волны (УВ), образованные энерговкладом и распространяющиеся в неподвижном газе. УВ₂ – УВ, образованные энерговкладом и распространяющиеся в потоке за падающей УВ. ПУВ – падающая УВ. ТП – поверхность тангенциального разрыва. В – вихри и ограничивающие их контактные поверхности.

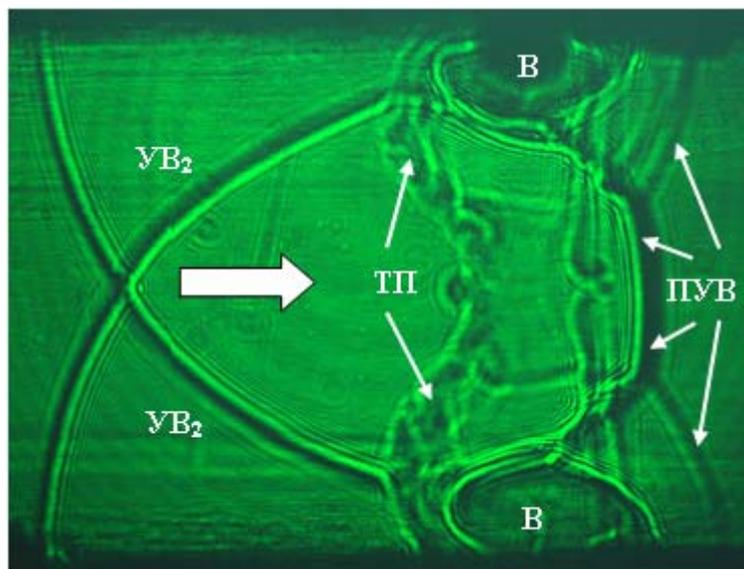


Рис. 5. Неустойчивость поверхности тангенциального разрыва. Теневой снимок - $X=1.8$ см; $M=2.4$; $P_0=75$ Торр; $\tau=24$ мкс. Стрелкой показано направление распространения падающей ударной волны.

взаимодействию ударной волны с такой «релаксирующей областью» было экспериментально обнаружено возникновение сложной ударно-волновой конфигурации с предвестником, которая росла неограниченно с выходом

на автомоделный режим (с сохранением конфигурации и с квазипостоянной скоростью роста, Рис. 6а). Скорость роста предвестника падает с увеличением времени между инициированием разряда и началом взаимодействия, но слабо изменяется в течение самого взаимодействия. Анализ данных (по скорости роста предвестника) показал, что характерное время исчезновения эффекта – 300 мкс. На основе анализа клиновидной конфигурации в различные моменты времени после разряда была оценена температура газа (Рис. 6б).

Пятая глава посвящена разработке и тестированию модели, описывающей энерговыдел в пристеночный слой газа при различных размерах области локализации разряда (X) и начальных давлениях воздуха (P_0), ведущий к нагреву газа и формированию газодинамических возмущений.

Анализ характерных времен разряда (времени протекания тока и времени свечения) позволяет использовать при разработке модели энерговыдела концепцию мгновенного вложения энергии в среду, приводящего к возникновению ударных волн. Возникающие при

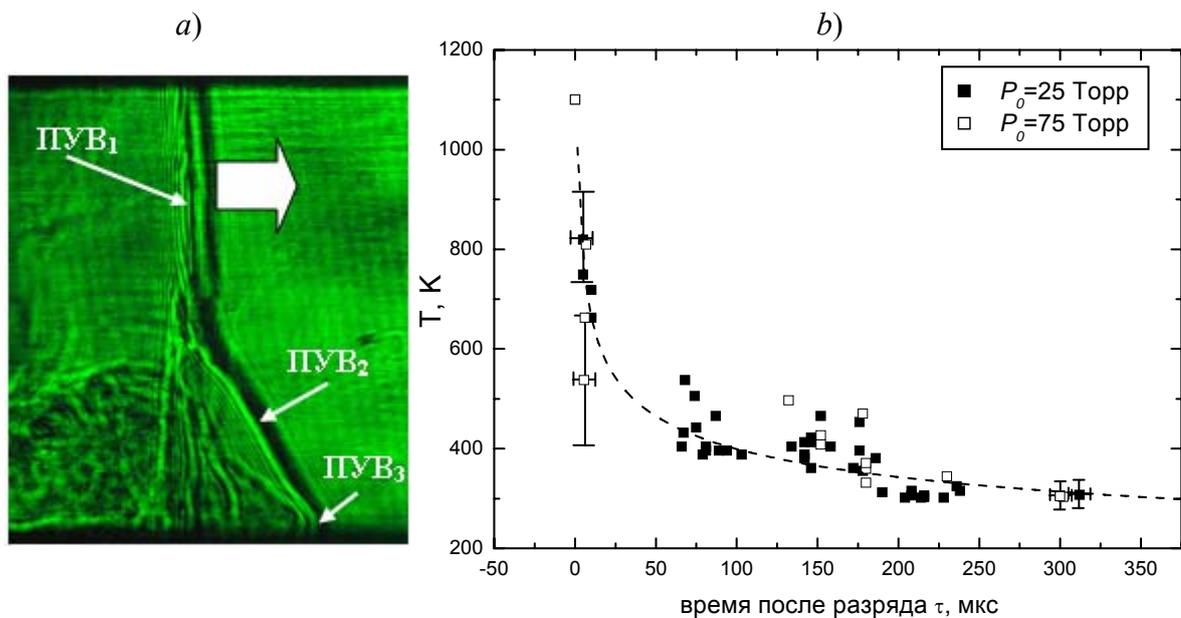


Рис. 6. *a* – конфигурация с предвестником (теневого снимок: $P_0=75 \text{ Torr}$, $M=2.5$, $\tau=155 \text{ мкс}$). *b* - зависимость поступательной температуры газа в релаксирующей области (РО) от времени после разряда τ . ПУВ₁ – невозмущенная УВ; ПУВ₂ – косая УВ; ПУВ₃ – предвестник (УВ в РО).

взаимодействии падающей ударной волны с ударными волнами от энерговогоклада газодинамические конфигурации течения определяются интенсивностью и распределением энерговоголожения, которые зависят от параметров X и P_0 . Анализ динамики движения газодинамических возмущений от плазменных листов с учетом их взаимодействия с падающей ударной волной позволяет оценить параметры области энерговогопровода в начальный момент времени ($\tau=0$).

Первый параграф 5.1 посвящен описанию численной модели. При моделировании использовалась система двумерных нестационарных уравнений Навье-Стокса с учетом вязкости и теплопроводности*. Начальные условия для моделирования брались из эксперимента и соответствовали выбранной модели энерговогоклада. Разработаны две модели энерговогоклада: модель однородного мгновенного энерговогоклада (МОМЭ) и модель неоднородного мгновенного энерговогоклада (МНОМЭ). На основе сравнения теневых изображений с результатами двумерного численного моделирования с использованием модели мгновенного энерговогоклада исследованы плотность энерговогоклада, температура и коэффициент K (доля всей, запасенной в конденсаторе электрической энергии, которая преобразуется в тепло за время менее 1 мкс).

Во втором параграфе 5.2 представлены результаты оценки плотности энерговогоклада, температуры и коэффициента K в рамках модели однородного энерговогоклада (МОМЭ). Для различных значений X и P_0 было получено совпадение экспериментальных и расчетных полей течения в приближении: $K=\text{const}=30\pm 10\%$. При этом объемная плотность энерговогоклада зависела только от размеров области локализации разряда: $q[\text{Дж}/\text{см}^3]=K(CU^2/2)/V=0.47/X[\text{см}]$. А удельный энерговогоклад на частицу зависел также и от плотности газа: $\xi = q/n \sim q/\rho$ (Рис. 7). На основе численного моделирования также была произведена более точная

* Разработка алгоритма программы выполнена доцентом МГУ им. М.В.Ломоносова Ивановым И.Э и ст.н.с. ИПМех РАН Крюковым И.А.

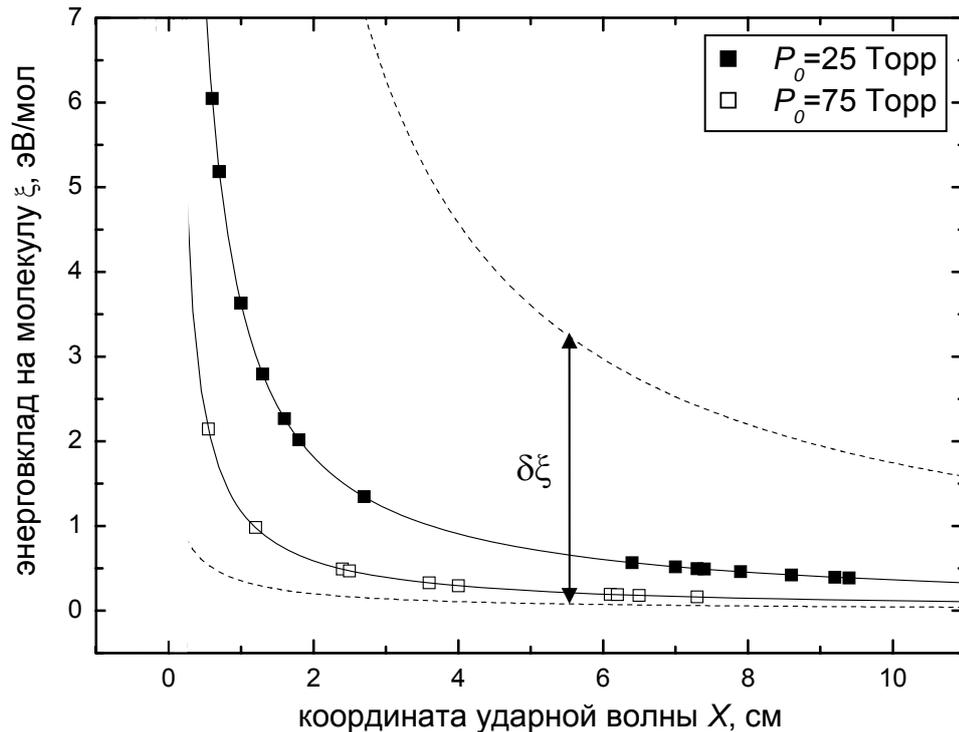


Рис. 7. Зависимость удельного энерговклада на молекулу от X и P_0 по модели однородного энерговклада (МОМЭ). $\delta\xi$ – погрешность модели.

расшифровка газодинамических конфигураций взаимодействия разряда с падающей ударной волной. Показаны недостатки модели, связанные с ее слабой чувствительностью к зависимости коэффициента K от X и P_0 , завышенными значениями температуры.

В третьем параграфе 5.3 показано, исходя из данных эксперимента, что зона энерговклада перед ударной волной структурирована в соответствии с неоднородностью свечения разряда, и следует использовать уточненную модель - неоднородного подвода энергии. Показано преимущество модели МНОМЭ над моделью МОМЭ. На основе модели МНОМЭ получены зависимости плотности энерговклада (q), температуры (T) и полной энергии для разных элементов «плазменного листа» от протяженности области локализации разряда (X) и начального давления (P_0):

$$q_l = \begin{cases} (200 \pm 100) \text{ кДж} / \text{м}^3 & \text{при } P_0 = 25 \text{ Torr} \\ (600 \pm 300) \text{ кДж} / \text{м}^3 & \text{при } P_0 = 75 \text{ Torr} \end{cases}$$

$$q_{II} = \begin{cases} (163 * \exp(-0.17 * X[\text{см}]) - 17) \text{ кДж/м}^3 & \text{при } P_0 = 25 \text{ Торр} \\ (497 * \exp(-0.14 * X[\text{см}]) - 69) \text{ кДж/м}^3 & \text{при } P_0 = 75 \text{ Торр} \end{cases}$$

$$T_I = (8500 \pm 3500) \text{ К} \quad \text{при } P_0 = 25 \div 75 \text{ Торр}$$

$$T_{II} = (5840 * \exp(-0.17 * X[\text{см}]) - 370) \text{ К} \quad \text{при } P_0 = 25 \div 75 \text{ Торр.}$$

где q_I и T_I – плотность энерговклада и температура в яркой области на фронте ударной волны; q_{II} и T_{II} – плотность энерговклада и температура в диффузном слое с равномерно распределенными в нем яркими каналами. Зависимость удельного энерговклада от параметров эксперимента представлена на Рис. 8.

При уменьшении зоны энерговклада модели МНОМЭ и МОМЭ дают близкие значения K , т.к. зона энерговклада не структурирована. Адекватность оценки параметров области разряда по модели МНОМЭ подтверждена при сравнении экспериментальных теневых изображений

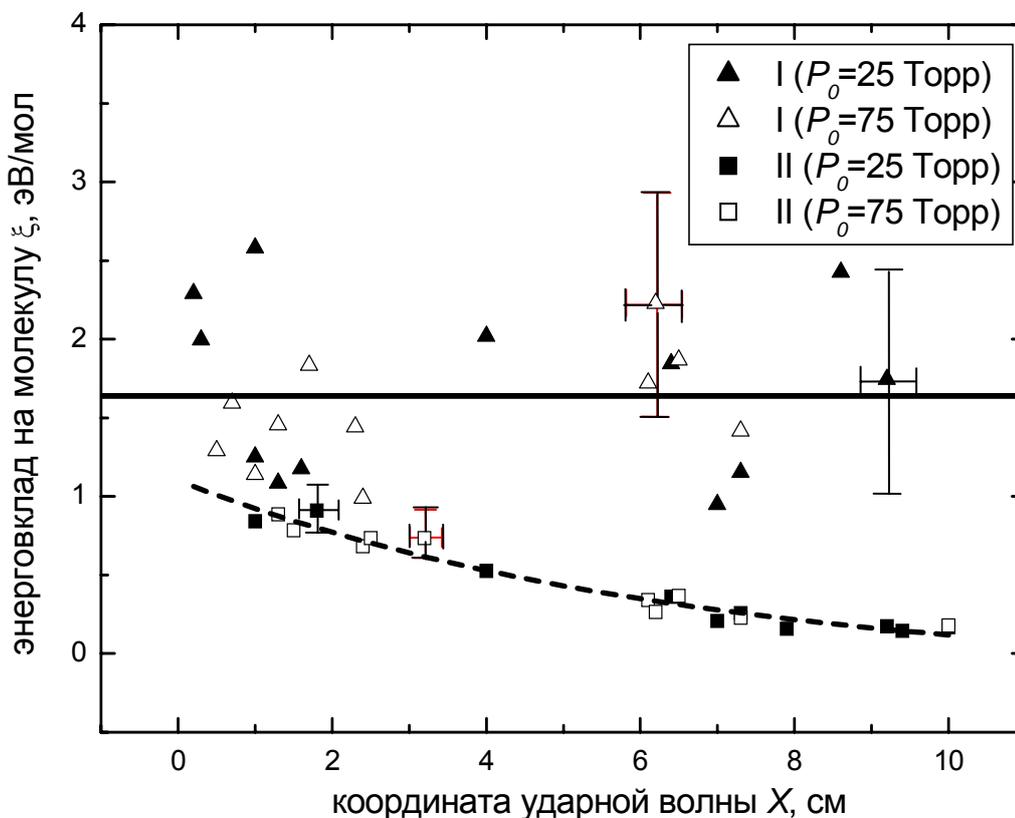


Рис. 8. Зависимости удельного энерговклада на молекулу в области диффузного слоя (II) и в узкой яркой области вблизи фронта ударной волны (I) от параметра X и начального давления P_0 . Линии – аппроксимационные кривые.

структуры течения с результатами численного расчёта параметров течения в условиях эксперимента (Рис. 9). В целом, по всей структурируемой области энерговклада происходит увеличение доли энергии (K) в 1.5-2 раза при уменьшении области энерговыведения в 2-3 раза (Рис. 10).

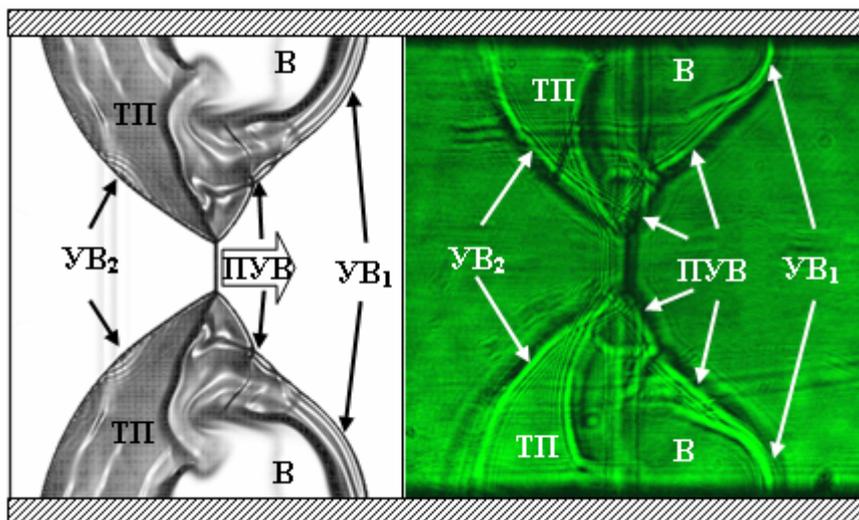


Рис. 9. Сравнение экспериментальных и расчетных полей течения. Справа – теневой снимок. Слева – численный градиент плотности. $P_0=25$ Торр; $X=1$ см; $M=2.5$; $\tau=7.2$ мкс.

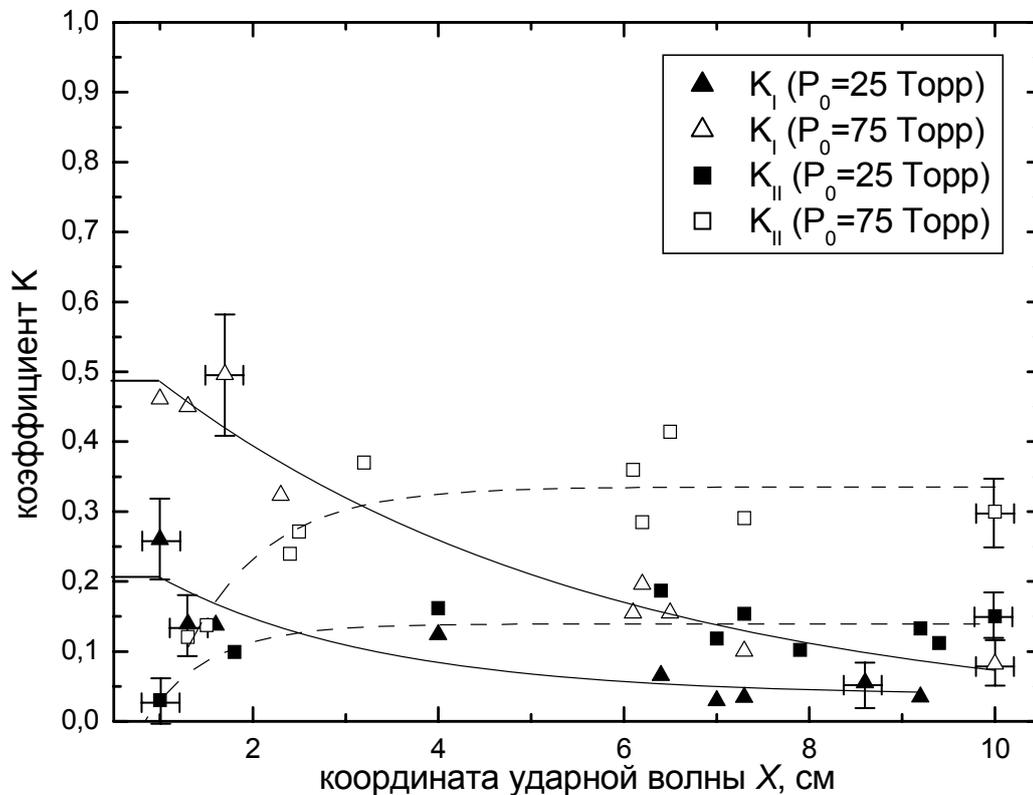


Рис. 10. Зависимость суммарного коэффициента K по всей области энерговклада от параметра X и начального давления P_0 . Линии – аппроксимационные кривые.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы.

3 Основные результаты и выводы

1. Экспериментально исследован нестационарный процесс взаимодействия высокоскоростного потока воздуха с плоской ударной волной с областью, созданной импульсным скользящим сильноточным поперечным приповерхностным разрядом типа «плазменный лист» при начальных давлениях $P_0=5\div 100$ Торр и числах Маха ударной волны $M=1.7\div 4$.
2. Обнаружен эффект самолокализации плазмы разряда в области пониженного давления перед фронтом ударной волны. Минимальная протяженность области локализации плазмы – $X=0.6$ см. Показана возможность управления разрядом, параметрами энерговклада и положением скачка при помощи эффекта самолокализации разряда в потоке с ударной волной.
3. Обнаружен эффект выхода разряда из межэлектродного промежутка (П-образная конфигурация) в случае его инициирования после выхода ударной волны из области электродов. Предложен критерий смены режима локализации разряда. Показана и изучена структурируемость энерговклада при самолокализации разряда в области перед фронтом ударной волны. Установлено, что длительность оптического свечения плазмы в потоке с ударной волной не превышает 200-700 нс.
4. Впервые получены и исследованы теневые изображения различных стадий сверхзвукового нестационарного процесса взаимодействия плоской ударной волны с областями энерговклада на двух противоположных стенках канала ($M=1.7\div 3.2$; $P_0=20\div 100$ Торр) для времен 1-50 мкс после разряда. Показано, что после взаимодействия возникает близкое к двумерному течение, имеющее плоскость симметрии. Экспериментально зарегистрировано возникновение

неустойчивости поверхности тангенциального разрыва на поздних стадиях взаимодействия.

5. Экспериментально смоделировано и исследовано взаимодействие ударной волны с неравновесной приповерхностной областью релаксирующего газа через 30-500 мкс после разряда. На основе анализа эволюции возникающей клиновидной ударно-волновой конфигурации с предвестником в различные моменты времени после разряда была оценена температура газа: от $T=1100\text{K}$ до $T=300\text{K}$ за время 300 мкс.
6. На основе сравнения теневых изображений с результатами двумерных численных расчетов с использованием модели мгновенного энерговыделения исследован коэффициент K плотности энерговыделения (доля разрядной энергии, идущей на нагрев газа). Показано, что происходит увеличение доли энергии (K) в 1.5-2 раза до 2-3 эВ на частицу при уменьшении области энерговыделения в 2-3 раза.

4 Публикации

Результаты работы представлены в следующих основных публикациях:

статьи в журналах из списка ВАК:

1. Знаменская И.А., Мурсенкова И.В., Орлов Д.М., Сысоев Н.Н. Локализация импульсного энерговыделения при инициировании поперечного поверхностного разряда в потоке с ударной волной // Письма в ЖТФ, 2007, Т. 33, В. 13, С. 72-77.
2. Аульченко С.М., Замураев В.П., Знаменская И.А., Калинина А.П., Орлов Д.М., Сысоев Н.Н. О возможности управления трансзвуковым обтеканием профилей с помощью подвода энергии на основе наносекундного разряда типа «плазменный лист» // ЖТФ, 2009, Т. 79, В. 3, С. 17-27.
3. Знаменская И.А., Иванов И.Э., Орлов Д.М., Сысоев Н.Н. Импульсное воздействие на ударную волну при самолокализации сильноточного поверхностного разряда перед ее фронтом // Доклады Академии Наук, 2009, Т. 425, № 2, С. 174-177.

4. Ivanov I., Kryukov I., Orlov D., Znamenskaya I. Investigations of shock wave interaction with nanosecond surface discharge // *Experiments in Fluids*, 2010, Vol. 48, Is. 4, P. 607-613 (Online 2009).

тезисы докладов:

1. Znamenskaya I., Orlov D., Ivanov I. Non-stationary shock wave interaction with surface nanosecond discharges in the channel. The Sixteenth International Symposium on Transport Phenomena (ISTP-16). August, 2005, Prague, Czech Republic, Book of Abstracts, P. 203.
2. Знаменская И.А., Латфуллин Д.Ф., Мурсенкова И.В., Орлов Д.М. Распределенный поверхностный разряд в сверхзвуковом потоке воздуха. XXXIII Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС. 13-17 февраля, 2006, Звенигород, Россия, Тезисы докладов, С. 289.
3. Знаменская И.А., Иванов И.Э., Орлов Д.М. Исследование взаимодействия импульсного поверхностного разряда с плоской ударной волной. XIII Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам «Ломоносов-2006». 14 апреля, 2006, Москва, Россия, Тезисы докладов, Т. 1, С. 163-166.
4. Знаменская И.А., Иванов И.Э., Мурсенкова И.В., Орлов Д.М. Исследование взаимодействия плоской ударной волны с импульсным поверхностным разрядом. VI Международная Конференция по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ-2006). 26 июня -1 июля, 2006, Санкт-Петербург, Россия, Материалы конференции, С. 188-190.
5. Latfullin D., Lutsky A., Mursenkova I., Orlov D., Sysoev N. and Znamenskaya I. Use of shock waves shadowgraphy and schlieren for surface energy release analysis. 12th International Symposium on Flow Visualization (ISFV). September 10-14, 2006, Goettingen, Germany, CD Rom Proceedings ISBN 0-9533991-8-4, CD.77.
6. Zamuraev V.P., Kalinina A.P., Aulchenko S.M., Znamenskaja I.A., Orlov D.M. Transonic Wing Airfoil Flow Control by Local Energy Supply Using Nanosecond Discharge (Plasma Sheet). The 7th International Workshop on Magnetoplasma Aerodynamics. April 17-19, 2007, Moscow, Russia, Book of Proceedings, P. 55-60.
7. Znamenskaya I.A., Koroteev D.A., Orlov D.M., Mursenkova I.V., Lutskiy A.E., Ivanov I.E. Shock wave interaction with nanosecond transversal discharges in shock tube channel. 26th International Symposium on Shock Waves. July 15-20, 2007, Goettingen, Germany, Book of Abstracts, P. 7.
8. Знаменская И.А., Орлов Д.М. Взаимодействие ударной волны с локализованной областью плазмы наносекундного поверхностного

сильноточного разряда. XV школа-семинар «Современные проблемы аэрогидродинамики». 5-15 сентября, 2007, Сочи, Россия, Тезисы докладов, С. 50.

9. Знаменская И.А., Коротеев Д.А., Костюков С.А., Кули-заде Т.А., Латфуллин Д.Ф., Мурсенкова И.В., Орлов Д.М., Сысоев Н.Н. Исследование свечения плазмы наносекундных разрядов с высоким временным разрешением. XXXV Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС. 11–15 февраля, 2008, Звенигород, Россия, Тезисы докладов, С. 339.
10. Zamuraev V.P., Znamenskaja I.A., Kalinina A.P., Aulchenko S.M., Orlov D.M. Transonic and supersonic flow control by local energy supply based on nanosecond surface discharge» International conference on the methods of aerophysical research (ICMAR 2008). june 30 – july 6, 2008, Novosibirsk, Russia, Book of Abstracts, Part II, P. 208-209.
11. Аульченко С.М., Замураев В.П., Знаменская И.А., Калинина А.П., Орлов Д.М., Сысоев Н.Н. Наносекундный разряд «плазменный лист» при трансзвуковом обтекании профиля. Третья школа-семинар по Магнитоплазменной Аэродинамике, 8-10 апреля, 2008, Москва, Россия, Доклады школы-семинара, С. 200-209.
12. Ivanov Igor, Krukov Igor, Orlov Denis, Znamenskaya Irina. Shadowgraphy of shock wave interaction with nanosecond surface discharge. 13th International Symposium on Flow Visualization (ISFV13) and 12th French Congress on Visualization in Fluid Mechanics (FLUVISU12). July 1-4, 2008, Nice, France, CD Rom Proceedings, 156-080418.pdf.
13. Znamenskaya I.A., Orlov D.M., Ivanov I.E. Planar surface discharge in flow with shock wave. XVII International Conference on Gas Discharges and their Applications. September 7-12, 2008, Cardiff, UK, Book of Proceedings, P. 605-608.
14. Орлов Д.М. Импульсное воздействие на ударную волну при самолокализации сильноточного поверхностного разряда // Журнал «Физическое образование в вузах», Приложение «Труды конференции – конкурса молодых физиков», 2009, Т. 15, № 1, П37.
15. Знаменская И.А., Иванов И.Э., Орлов Д.М. Движение ударной волны по неравновесному приповерхностному слою газа. Девятая Международная школа-семинар «Модели и методы аэродинамики». 4-13 июня, 2009, Евпатория, Украина, Материалы школы-семинара, С. 89-90.
16. Znamenskaya I., Orlov D., Ivanov I., Krukov I. Shock Wave Interaction with Pulse Surface Energy Deposition Area. 27th International Symposium on Shock Waves. July 19-24, 2009, St. Petersburg, Russia, Book of Proceedings, P. 298.

17. Знаменская И.А., Иванов И.Э., Орлов Д.М., Крюков И.А. Теневые исследования разрывного двумерного течения при самолокализации сильноточного поверхностного разряда. X Юбилейная Международная научно-техническая конференция «Оптические методы исследования потоков». 23-26 июня, 2009, Москва, Россия, Труды конференции, С. 194.
18. Znamenskaya I.A., Karacuba A.S., Orlov D.M., Sysoev N.N. Shock wave propagation along the uniform pulse ionized surface area. The 8th International Workshop on Magnetoplasma Aerodynamics. March 31-April 02, 2009, Moscow, Russia, Book of Proceedings, P. 132.
19. Znamenskaya I.A., Orlov D.M., Penyazkov O.G., Khramtsov P.P., Chernik M.Yu. Boundary layer control using surface discharges. 22nd International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive System (ICDERS 2009). July 27-31, 2009, Minsk, Belarus, CD Rom Proceedings, P. 128.
20. I.A. Znamenskaya, D.M. Orlov, I.E. Ivanov, I.A. Kryukov, T.A. Kuli-zade. Experimental and CFD Analysis of Flow with Shock Wave and Surface Energy Deposition. The 7th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing (PSFVIP-7), November 16-19, 2009, Kaohsiung, Taiwan, Book of Proceedings, Paper 019, P.1-6.