

Высокоскоростная цифровая регистрация плазмо-газодинамических процессов в сверхзвуковых течениях в канале

И.А. Знаменская¹, И.В. Мурсенкова², И.А. Дорощенко³

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова

¹ ORCID: 0000-0001-6362-9496, znamen@phys.msu.ru

² ORCID: 0000-0002-7181-4533, murs_i@physics.msu.ru

³ ORCID: 0000-0002-0488-0020, doroshenko.igor@physics.msu.ru

Аннотация

Обсуждаются результаты визуализации динамических процессов, реализующихся при локализации импульсного объемного разряда (ИОР) в прямоугольном канале с движущейся плоской ударной волной. Панорамная визуализация быстропротекающих процессов проведена с высоким временным разрешением – в наносекундном диапазоне – на основе высокоскоростной регистрации свечения разряда электронно-оптическими камерами, а также в микросекундном диапазоне – с помощью высокоскоростной теневой съемки. Получены изображения и развертки оптического свечения разряда при протекании электрического тока разряда и в режиме послесвечения. Экспозиция кадров – от 100 нс; время регистрации разверток свечения – до 10 мкс. Анализируется процесс распада газодинамического разрыва на фронте ударной волны при ее импульсной ионизации высоковольтным ИОР. Динамика возникающих при локализованном импульсном энергокладе плоских разрывов визуализирована на основе высокоскоростной теневой съемкой со скоростью съемки от 100 до 525 тысяч кадров в секунду. Проведена цифровая обработка и анализ изображений потока. Собраны и проанализированы цифровые видеофильмы процесса и построены пространственно-временные диаграммы плазмодинамических и газодинамических параметров разрывного течения вплоть до 20 микросекунд. Данные, полученные с помощью различного оборудования в нано- и микросекундном диапазонах были сопоставлены друг с другом и проанализированы. Результаты экспериментов сравниваются с результатами численного моделирования на основе уравнений нестационарной газодинамики (уравнений Эйлера) в одномерной постановке.

Ключевые слова: визуализация потоков, панорамные методы, высокоскоростная теневая съемка, ударные волны, контактные поверхности, комбинированный наносекундный разряд.

1. Введение

Взаимодействие импульсных или импульсно-периодических газовых разрядов с ударными волнами часто исследуется в связи с возможностью применения полученных результатов в плазменных актуаторах и при решении практических задач. Например, оптическими методами было показано [1], что создание газоразрядной плазмы перед обтекаемым сверхзвуковым потоком объекта, имеющим форму конуса, приводит к отдалению ударной волны от модели, что можно использовать для ослабления негативного воздействия ударной волны на окружающую среду при проектировании сверхзвуковых летательных аппаратов. При исследованиях взаимодействия неравновесной плазменной среды (газоразрядной плазмы объемных и поверхностных разрядов) с

ударными волнами (числа Маха от 2 до 7) теньевыми методами был зарегистрирован эффект уширения ударной волны, его расщепления на несколько газодинамических разрывов [2-3]. Теоретически было показано, что с помощью локального быстрого ($t < 1$ мкс) нагрева потока можно разрушить ударную волну, если превысить пороговую величину энергозклада для данной интенсивности ударной волны и параметров потока [4]. Такой быстрый энергозклад в поток можно реализовать, применяя газовые разряды.

Для визуализации потоков с ударными волнами используются, как правило, шлирен или теневой методы [5-7]. В настоящей работе применялся теневой метод. Регистрируемое теневым методом распределение интенсивности соответствует пространственной производной второго порядка (Лапласиану) показателя преломления n , таким образом, данный метод позволяет визуализировать газодинамические разрывы, такие как, например, ударные волны и контактные поверхности. В последние десятилетия на смену пленочным высокоскоростным камерам пришли цифровые, скорость съемки которых достигает 10 миллионов кадров в секунду [8]. Переход на цифровой формат позволяет значительно ускорить обработку и систематизацию полученных результатов. В настоящей работе для высокоскоростной теневой съемки течений в микросекундном диапазоне применялась высокоскоростная камера. Максимальная скорость съемки составляла 525 000 кадров/с. Процессы, связанные со свечением импульсного разряда, происходят, как правило, в наносекундном диапазоне [9]. Для регистрации свечения разряда использовались электронно-оптические камеры. Распределение свечения разряда по пространству разрядной камеры зависит от параметров течения внутри нее, так как электрическая проводимость воздуха зависит от плотности, которая различна в разных точках течения. Таким образом, сам разряд позволяет визуализировать некоторые особенности течения, например, положения газодинамических разрывов [10].

В данной работе оптическими панорамными методами исследовался процесс распада разрыва на фронте плоской ударной волны при ее импульсной ионизации объемным разрядом. Самолокализация разряда происходит перед фронтом ударной волны, в связи со скачком плотности за ним и невозможностью протекания в этой области тока разряд и реализует быстрый ($t < 1$ мкс) нагрев газа перед фронтом. В результате по обе стороны от фронта ударной волны возникают объемы газа с различными значениями газодинамических параметров, и ударная волна распадается на несколько разрывов: две ударные волны и контактную поверхность. Данное явление известно как «задача Римана о распаде разрыва» [11]. Одиночные изображения потока после распада разрыва на фронте проходящей ударной волны в канале были впервые получены теньевыми методами в работах Знаменской и др. [12-14]. В данной работе анализируются теневые последовательные кадры рассматриваемого течения и сопоставляются с соответствующими кадрами свечения разряда в наносекундном диапазоне.

2. Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки, а также системы визуализации течения панорамными методами и синхронизации потока и разряда приведены на рис. 1. Использовалась та же установка, что и в работе [12]. Основной частью установки является разрядная камера, встроенная в камеру низкого давления ударной трубы. Разрядный промежуток имеет прямоугольное сечение размером 24x48 мм². Длина разрядного промежутка 100 мм. Напряжение поджига разряда 25 кВ. Амплитуда тока ~1 кА, продолжительность 200-300 нс. Использовался комбинированный импульсный объемный разряд с преионизацией ультрафиолетовым излучением от плазменных электродов, расположенных на верхней и нижней стенках разрядной камеры. Разряд инициировался в режиме единичного импульса. Боковые стенки разрядной камеры выполнены из кварцевого стекла для оптического доступа. В качестве рабочего газа во всех экспериментах использовался воздух. Система управления установкой и синхронизации

позволяет регулировать давление перед фронтом ударной волны, задавать ее скорость и запускать разряд при любом положении ударной волны внутри разрядного промежутка. Число Маха создаваемой в ударной трубе прямоугольной ударной волны составляло от 2,2 до 4,8, давление перед фронтом задавалось равным $p = 2-25$ Торр. В качестве источника света в теневой схеме использовался стационарный лазер, длина волны 532 нм. Регистрация изображений проводилась высокоскоростной камерой со скоростью съемки от 100 000 до 525 000 кадров в секунду.

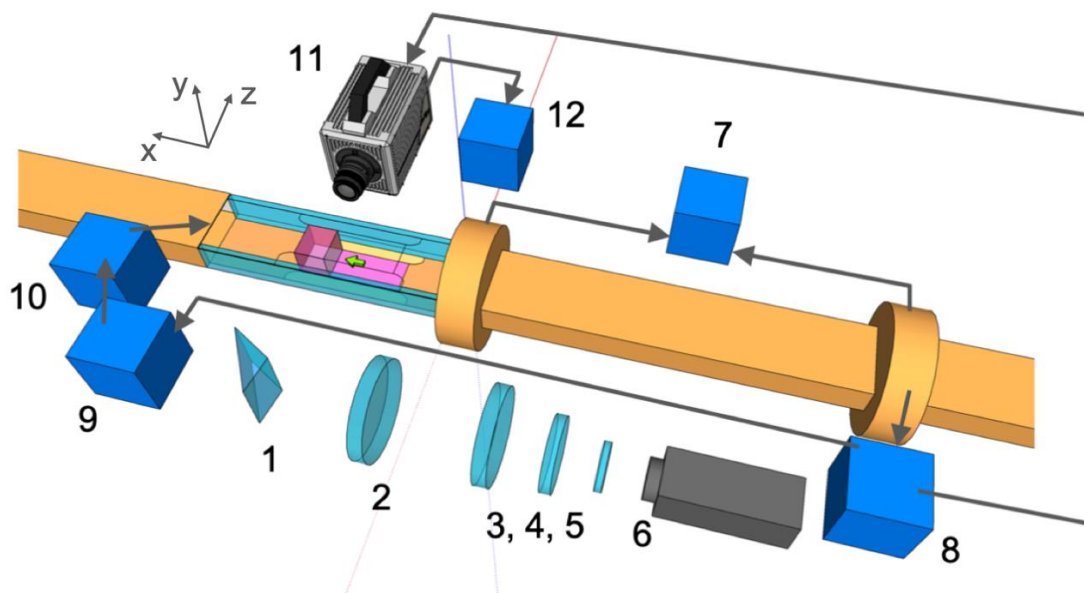


Рис. 1. Экспериментальная установка, система регистрации течения оптическими панорамными методами и синхронизации. 1 – поворотная призма, 2 – собирающая линза, 3,4,5 – рассеивающие линзы, 6 – стационарный лазер, 7 – осциллограф, 8, 9 – генераторы импульсов (задержки), 10 – устройство запуска разряда, 11 – высокоскоростная камера, 12 – ПК

С помощью цифрового фотоаппарата регистрировались интегральные кадры свечения разряда (рис. 2). Фотоизображения разряда содержат информацию об интегральном по времени распределении свечения в исследуемой области. С помощью высокоскоростной электронно-оптической камеры VIFO K011 регистрировались 9-кадровые изображения излучения плазмы разряда с наносекундным разрешением (минимальный интервал времени между кадрами 100 нс, экспозиция кадра 100 нс). Это дало возможность зарегистрировать начальную стадию распада разрыва на фронте исходной ударной волны. При регистрации излучения разряда теневое зондирование не проводилось, электронно-оптическая камера размещалась в положении 11 (см. рис. 1). Спектральный диапазон, регистрируемый фотокамерами и электронно-оптической камерой, 400-800 нм.

3. Локализация импульсного объемного разряда

Конфигурация комбинированного разряда зависит от параметров потока внутри разрядной камеры. Если воздух внутри нее неподвижен и давление не превышает 100 Торр, то свечение разряда равномерно распределено по объему разрядного промежутка (рис. 2, а). При наличии в момент инициирования разряда внутри разрядной камеры фронта ударной волны разряд локализуется перед ее фронтом (рис. 2, б-в). Это связано с различиями в скорости ионизации газа по обеим сторонам от фронта ударной волны из-за скачка плотности, описываемого соотношениями Ренкина-Гюгонио [15]. В связи с этим протекание тока разряда и джоулев нагрев происходят только перед фронтом ударной волны [13, 14], в результате чего по обе стороны от фронта возникают

две области газа с различными значениями газодинамических параметров, то есть возникают условия для формирования распада разрыва (задача Римана) [11].

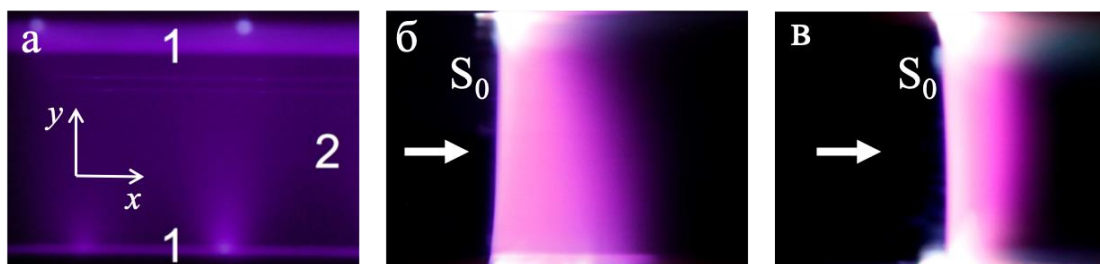


Рис. 2. Интегральные фотоизображения свечения разряда (а) в неподвижном воздухе при давлении $p < 100$ Торр, (б) при локализации перед фронтом ударной волны с числом Маха 4,7 и расстоянием от фронта ударной волны до конца разрядного промежутка в момент запуска разряда 1,3 см, (в) при локализации перед фронтом ударной волны с числом Маха 4,8 и расстоянием от фронта ударной волны до конца разрядного промежутка в момент запуска разряда 0,6 см. Стрелка обозначает направление движения фронта ударной волны и потока за ней: 1 – свечение поверхностных разрядов (плазменных листов), 2 – свечение объемного разряда

4. Высокоскоростная теньевая съемка

С целью исследования газодинамического течения с разрывами была использована оптическая схема для теневой регистрации быстропротекающих процессов. Проведена визуализация течения, возникающего после наносекундной ионизации фронта ударной волны S_0 , на временном интервале от 1,5 до 63 мкс с помощью высокоскоростной теневой съемки. Последовательные наборы кадров теневой съемки, полученные через равные промежутки времени, приведены на рис. 3. Экспозиция каждого кадра составляла 1 мкс. На кадрах видно, как начальный разрыв S_0 (исходная ударная волна) разделяется на три разрыва, соответствующих решению задачи о распаде разрыва (задача Римана): ударные волны S_1 и S_2 и контактную поверхность C . Каждый визуализированный разрыв представляет собой локальный скачок плотности газа, визуализируемый с помощью теневой техники [5]. Кадры на рис. 3, а получены через равные последовательные промежутки времени в 6,7 мкс и обладают наибольшим пространственным разрешением. На них отчетливо видны ударные волны, распространяющиеся от поверхностных разрядов (плазменных листов) [12,13]. Через 10 – 15 мкс они достигают оси симметрии течения. До этого момента течение вдоль оси X можно считать одномерным. На рис. 3, б показан набор теневых изображений, полученных при максимальной скорости съемки: 525 000 кадров/с. Соответственно, интервал времени между кадрами равен 1,9 мкс. На втором кадре данной серии присутствует свечение разряда, после чего видно, как фронт ударной волны распадается на 3 разрыва.

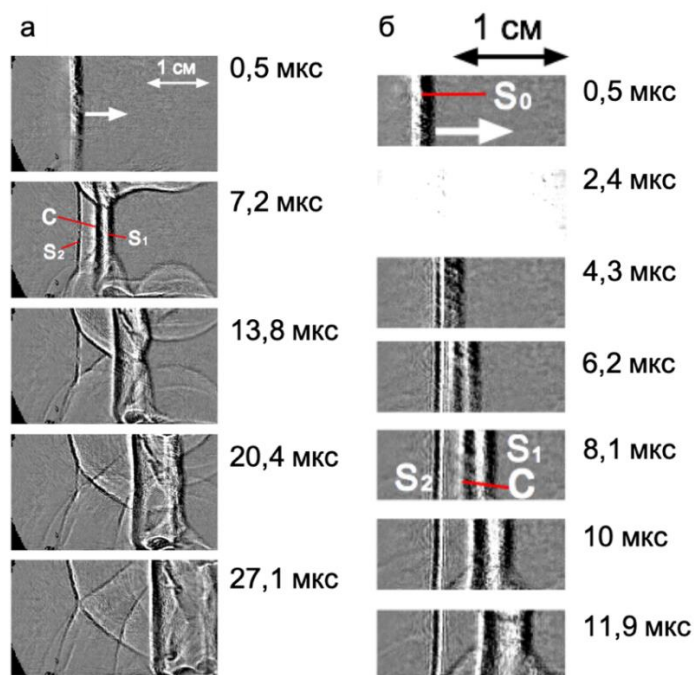


Рис. 3. Серии кадров теневой съемки распада разрыва на фронте плоской ударной волны с числом Маха 2,3 при расстоянии от фронта исходной ударной волны до конца разрядного промежутка 2 см в начальный момент времени. Скорость съемки: а – 150 000 кадров/с, б – 525 000 кадров/с

Построенная по показанной на рис. 3, а последовательности изображений $x-t$ диаграмма движения разрывов приведена на рис. 4. Измерения проводились относительно неподвижной системы координат, жестко связанной с установкой. Расстояние по оси Ox отсчитывается от положения фронта ударной волны в момент разряда. По $x-t$ диаграмме видно, что скорость ударной волны S_1 максимальна. Она, как и контактная поверхность C , движется в положительном направлении оси x . Ударная волна S_2 , двигаясь против набегающего потока, может относительно лабораторной системы координат двигаться в положительном, отрицательном направлении оси x или оставаться неподвижной в зависимости от числа Маха исходной ударной волны S_0 .

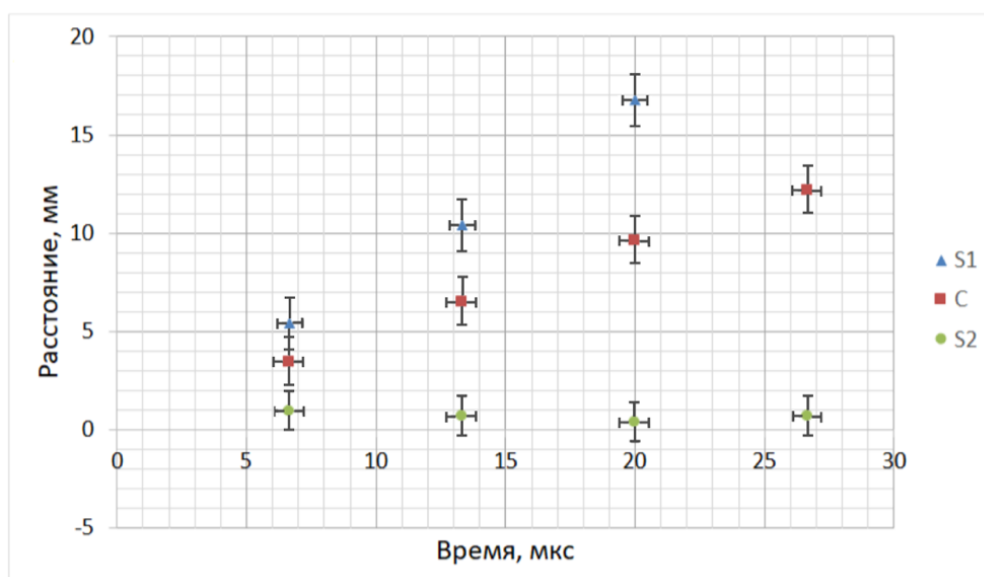


Рис. 4. $x-t$ диаграмма движения поверхностей разрыва, образовавшихся при распаде разрыва на фронте плоской ударной волны с числом Маха 2,3 при расстоянии от фронта исходной ударной волны до конца разрядного промежутка 2 см в начальный момент времени.

На рис. 5 приведены кадры развития течения на больших временах (до 63 мкс). Камера была перемещена на 3 см по ходу движения ударной волны. В результате было визуализировано формирование неустойчивостей и вихревых структур у стенок канала в спутном потоке за фронтом ударной волны S_1 . В эксперименте, в котором была получена данная серия кадров, число Маха исходной ударной волны S_0 составляло $M = 2,2$, расстояние от ее фронта до конца разрядного промежутка в начальный момент времени 2 см, скорость съемки 150 000 кадров/с. Черным треугольником обозначено положение репера для удобства измерений динамики разрывов.

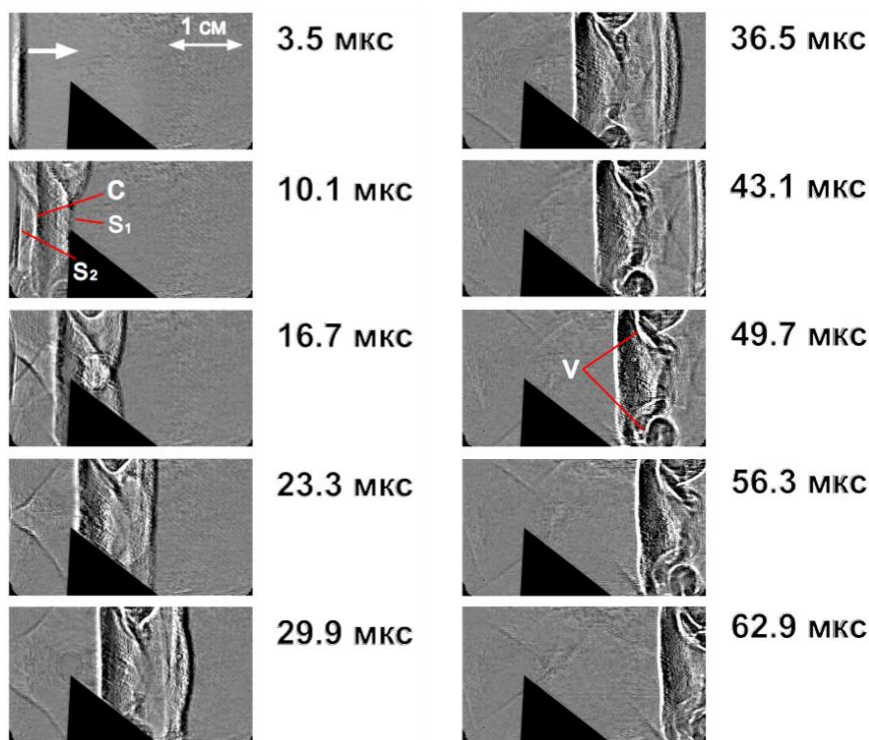


Рис. 5. Серия кадров теневой съемки течения, возникающего при распаде разрыва на фронте плоской ударной волны с числом Маха 2,2 при скорости съемки 150 000 кадров/с.

5. Регистрация свечения разряда с наносекундным разрешением

Регистрация свечения разряда на малых временах проводилась с помощью электронно-оптической камеры VIFO Ko11. Экспозиция каждого кадра составляла 100 нс, промежуток времени между кадрами – от 100 нс. Одна из полученных последовательностей кадров приведена на рис. 6. Три первых кадра приведенной последовательности соответствуют излучению при протекании тока разряда. На последующих изображениях наблюдается послесвечение релаксирующей газоразрядной плазмы, которое может продолжаться более 2 мкс. Полученные исходные изображения монохромные. Для наглядности интенсивность была преобразована в цветовую шкалу. По полученным сериям кадров измерялась скорость движения левой границы области свечения разряда. Строилась $x-t$ диаграмма ее движения и сопоставлялась с $x-t$ диаграммами движения разрывов, полученными с помощью высокоскоростной теневой съемки при тех же условиях. Сравнение большего количества экспериментальных данных в нано- и микросекундном диапазонах показывает, что левая граница области свечения газоразрядной плазмы соответствует контактной поверхности C . Анализ кадров свечения показывает, что вблизи контактной поверхности C существует тонкая область газа размером до 1,5 мм, интенсивность свечения которой в 1,5 – 2,5 раза превышает интенсивность свечения релаксирующей плазмы разряда справа от нее. Геометрия светящейся обла-

сти определялась по среднему распределению интенсивности свечения вдоль прямой, проведенной горизонтально через центр изображения. Для объяснения усиления интенсивности свечения в данной области было проведено одномерно численное моделирование течения.

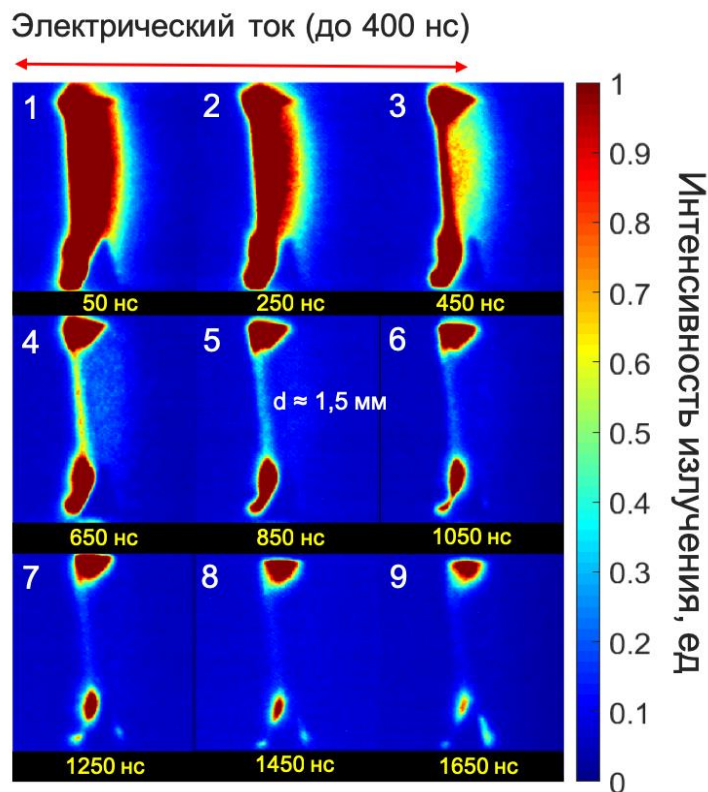


Рис. 6. Девятикадровые изображения эволюции свечения разряда перед фронтом ударной волны с числом Маха 4,7 при начальном давлении 2 Торр. Расстояние от фронта ударной волны до конца разрядного промежутка в момент запуска разряда 1,3 см. Экспозиция/пауза – 100/100 нс. Треугольник на переднем плане является репером для исследования динамики разрывов.

6. Численное моделирование течения после взаимодействия разряда с фронтом ударной волны

Анализ полученных двумя методами изображений потока показал, что течение в центре канала – вдали от плазменных листов – в первые 5-7 микросекунд после разряда близко к одномерному. Для анализа эволюции газодинамических параметров в течении с энерговкладом в центральной области канала было проведено одномерное численное моделирование течения при помощи метода Годунова второго порядка точности. Метод в применении к данной задаче описан в работе [13]. На рис. 7 приведено распределение плотности газа вдоль горизонтальной оси в начальный момент времени и через 1,5 мкс после запуска разряда. На полученных графиках можно выделить 4 существенные области: 1 – область скачка газодинамических параметров за фронтом ударной волны S_0 , 2 – область энерговклада (нагретого газа в области локализации разряда), 3 – область между ударной волной S_2 и контактной поверхностью C , 4 – между контактной поверхностью C и ударной волной S_1 . Области 1 и 2 задаются в начальный момент времени, 3 и 4 формируются после распаде разрыва на фронте исходной ударной волны S_0 . Важно отметить, что на расчетных профилях распад разрыва наблюдается как на левой, так и на правой границе области энерговклада. В действительности распад разрыва происходит только слева (на фронте ударной волны S_0),

справа газоразрядная плазма не имеет резкой границы и условия, необходимые для распада разрыва, не реализуются.

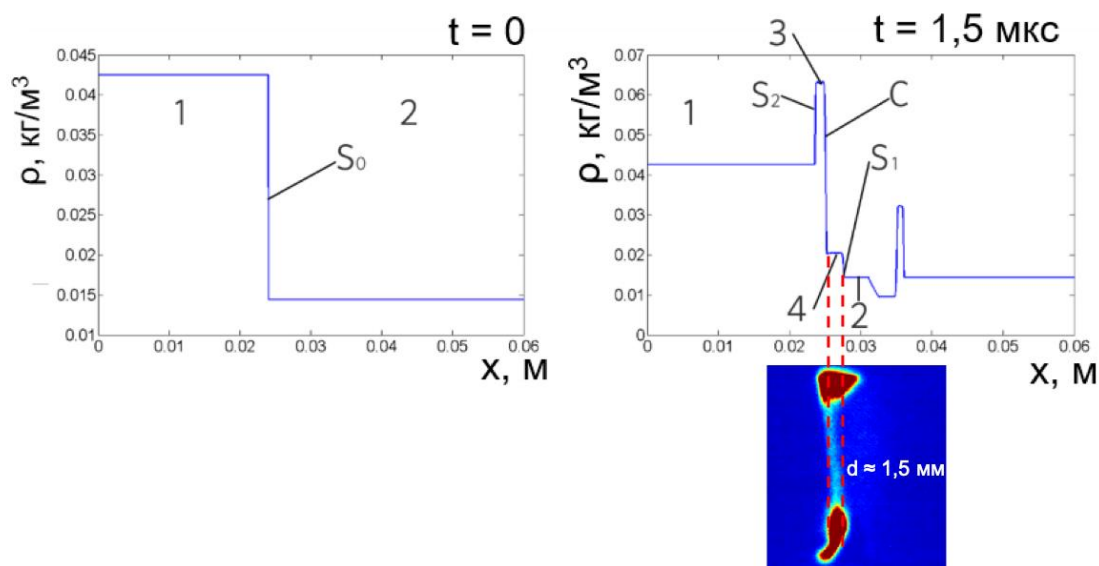


Рис. 7. Расчетные профили плотности при $t = 0$ (слева), $t = 1,5$ мкс (справа). Число Маха ударной волны S_0 в начальный момент времени $M = 4,3$.

Наличие области интенсивного свечения вблизи контактной поверхности можно объяснить дополнительным скачком плотности газа между ударной волной S_1 и контактной поверхностью C в результате ударно-волнового сжатия газа в этой области ударной волной S_1 . Увеличение плотности ведет к увеличению концентрации и частоты столкновений молекул азота в метастабильных возбужденных состояниях. При этом изменяется скорость заселения излучающих состояний и, соответственно, интенсивность излучения.

7. Заключение

Проведена визуализация процесса взаимодействия газодинамического течения с разрывом (ударной волной) с областью наносекундной ионизации, вызванной импульсным объемным разрядом с предионизацией ультрафиолетовым излучением от плазменных листов, локализуемой перед движущимся разрывом. Использованы панорамные методы: высокоскоростная теневая съемка в микросекундном временном масштабе (скорость съемки от 100 000 до 525 000 кадров/с), высокоскоростная регистрация свечения разряда в наносекундном временном масштабе (интервал между кадрами/экспозиция – 100/100 нс). Числа Маха визуализированных разрывов достигали 4,8. Полученные цифровые последовательные кадры были обработаны, динамика разрывов сопоставлена с результатами одномерного численного моделирования визуализированного течения. Сопоставление расчета и экспериментальных изображений позволило объяснить распределение интенсивности свечения разряда в наносекундном временном масштабе на основе динамики образовавшихся газодинамических разрывов.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда РНФ № 18-19-00672.

Список литературы

1. Kuo S.P. Shock Wave Mitigation by Air Plasma Deflector// *Advances in Aerospace Science and Technology*. Vol. 3. 2018. pp.71-88.
2. Лапушкина Т.А., Ерофеев А.В. Особенности воздействия слаботочного газового разряда на сильную ударную волну // *Письма в ЖТФ*. Т. 43. № 5. 2017. С. 17-23.
3. Matsuda A., Kondo Y., Aoyama N. Shock wave modulation due to discharged plasma using a shock tube // *Mechanical Engineering Journal*. Vol. 3. № 6. 2016. pp. 1-12.
4. Анненков В.А., Левин В.А., Трифонов Е.В. Разрушение ударных волн при их взаимодействии с локальным источником энерговыделения // *Прикладная механика и теоретическая физика*. Т. 47. № 2. 2006.
5. Settles G.S., Hargather M.J. A review of recent developments in schlieren and shadowgraph techniques // *Measurement Science and Technology*. Vol. 28, №4, 2017.
6. Krehl P., Engemann S. August Toepler—the first who visualized shock waves // *Shock Waves*. Vol. 5, № 1-2. 1995. pp. 1-18.
7. Герасимов С.И., Зубанков А.В., Кикеев В.А., Смирнов И.Ю., Трепалов Н.А., Герасимова Р.В. Исследование характера отражения в модельных опытах прямотеневым методом визуализации // *Научная визуализация*. Т. 10. № 5. 2018. С. 160-171.
8. Versluis M. High-speed imaging in fluids // *Experiments in fluids*. Vol. 54. No. 1458. 2013. pp. 1-35.
9. Кузнецов А.Ю., Мурсенкова И.В. Особенности излучения объемного наносекундного разряда в воздухе при взаимодействии с плоской ударной волной // *Прикладная физика*. № 5. 2016, С. 16-21.
10. Алферов В.П., Дмитриев Л.М. Электрический разряд в потоке газа при наличии градиентов плотности // *Теплофизика высоких температур*. Т. 23. № 4. 1985.
11. Rosini M.D. The Riemann Problem. In: *Macroscopic Models for Vehicular Flows and Crowd Dynamics: Theory and Applications*. Understanding Complex Systems. Springer, Heidelberg. 2013. pp. 43-50.
12. Znamenskaya I. A., Koroteev D. A., Lutsky A. E. Discontinuity breakdown on shock wave interaction with nanosecond discharge // *Physics of Fluids*. Vol. 20. 2008.
13. Doroshchenko I., Znamenskaya I., Koroteev D., Kuli-zade T. When shock is shocked: Riemann problem dynamics at pulse ionization of a shock wave // *Physics of Fluids*. Vol. 24. № 10. 2017.
14. И. Знаменская, А. Луцкий, Я. Ханхасаева, Ц. Цзинь. Взаимодействие численной и экспериментальной визуализации при исследовании свойств разрядов методом анализа ударно-волновых конфигураций // *Научная визуализация*. Т. 5, № 3. 2013. С. 40–51.
15. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. — Издание 4-е, стереотипное. // М.: Наука. 1988. 736 с.

High speed digital recording of plasma-gas dynamic processes in supersonic channel flow

I.A. Znamenskaya¹, I.V. Mursenkova², I.A. Doroshchenko³

Lomonosov Moscow State University

¹ ORCID: 0000-0001-6362-9496, znamen@phys.msu.ru

² ORCID: 0000-0002-7181-4533, murs_i@physics.msu.ru

³ ORCID: 0000-0002-0488-0020, doroshenko.igor@physics.msu.ru

Abstract

We discuss the results of the visualization of dynamic processes that occur when a pulsed volume discharge concentrates in front of the shock wave in the rectangular channel. Panoramic visualization of the high-speed processes was carried out with a high temporal resolution - in the nanosecond range - based on high-speed recording of the discharge glow by electron-optical cameras, as well as in the microsecond range - using high-speed shadow imaging. We obtained discharge glow images in optical range during the discharge electric current flow and in the afterglow mode. The electron-optical camera exposure was 100 ns. The flow pattern after pulse ionization of the plane shock wave corresponds to the 1D Riemann problem solution. The flow was visualized by the high-speed shadowgraphy with frame rates from 100 000 to 525 000. We made digital processing and analysis of the obtained frames. We compared data obtained with different cameras in nanosecond and microsecond time range and plotted space-time curves of the discontinuities movement. 1D CFD profiles were compared with the experimental data.

Keywords: flow visualization, panoramic imaging techniques, high-speed shadowgraphy, shock waves, contact discontinuities, combined nanosecond discharge.

References

1. Kuo S.P. Shock Wave Mitigation by Air Plasma Deflector // *Advances in Aerospace Science and Technology*. Vol. 3. 2018. pp.71-88.
2. Lapushkina T.A., Erofeev A.V. Osobennosti vozdeystviya slabotochnogo gazovogo razryada na sil'nuyu udarnuyu volnu // *Pis'ma v ZHTF*. T. 43. № 5. 2017. pp. 17-23. [In Russian]
3. Matsuda A., Kondo Y., Aoyama N. Shock wave modulation due to discharged plasma using a shock tube // *Mechanical Engineering Journal*. Vol. 3. № 6. 2016. pp. 1-12.
4. Annenkov V.A., Levin V.A., Trifonov E.V. Razrushenie udarnykh voln pri ih vzaimodeystvii s lokal'nym istochnikom energoydeleniya // *Prikladnaya mekhanika i teoreticheskaya fizika*. v. 47. № 2. 2006. [In Russian]
5. Settles G.S., Hargather M.J. A review of recent developments in schlieren and shadowgraph techniques // *Measurement Science and Technology*. Vol. 28, №4, 2017.
6. Krehl P., Engemann S. August Toepler—the first who visualized shock waves // *Shock Waves*. Vol. 5, № 1-2. 1995. pp. 1-18.
7. Gerasimov S.I., Zubankov A.V., Kikeev V.A., Smirnov I.YU., Trepalov N.A., Gerasimova R.V. Issledovanie haraktera otrazheniya v model'nykh opytakh pryamotenevym metodom vizualizatsii // *Nauchnaya vizualizatsiya*. T. 10. № 5. 2018. pp. 160-171. [In Russian]
8. Versluis M. High-speed imaging in fluids // *Experiments in fluids*. Vol. 54. No. 1458. 2013. pp. 1-35.

9. Kuznecov A.YU., Mursenkova I.V. Osobennosti izlucheniya ob"emnogo nanosekundnogo razryada v vozduhe pri vzaimodejstvii s ploskoj udarnoj volnoj // Prikladnaya fizika. № 5. 2016, pp. 16-21. [In Russian]
10. Alferov V.P., Dmitriev L.M. Elektricheskij razryad v potoke gaza pri nalichii gradientov plotnosti//Teplofizika vysokih temperatur. v. 23. № 4.1985. [In Russian]
11. Rosini M.D. The Riemann Problem. In: Macroscopic Models for Vehicular Flows and Crowd Dynamics: Theory and Applications. UnderstandingComplexSystems.Springer, Heidelberg.2013. pp. 43-50.
12. Znamenskaya I. A., Koroteev D. A., Lutsky A. E. Discontinuity breakdown on shock wave interaction with nanosecond discharge // Physics of Fluids. Vol. 20. 2008.
13. Doroshchenko I., Znamenskaya I., Koroteev D., Kuli-zade T. When shock is shocked: Riemann problem dynamics at pulse ionization of a shock wave // Physics of Fluids. Vol. 24. № 10. 2017.
14. I. Znamenskaya, A. Luckij, YA. Hanhasaeva, C. Czin'. Vzaimodejstvie chislennoj i eksperimental'noj vizualizacii pri issledovanii svojstv razryadov metodom analiza udarno-volnovyh konfiguracij // Nauchnaya vizualizaciya. T. 5, № 3. 2013. pp. 40–51. [In Russian]
15. Landau L.D., Lifshic E.M. Gidrodinamika. — Izdanie 4-e, stereotipnoe. // M.: Nauka. 1988. 736 p. [In Russian]