

Визуализация высокоскоростной теневой съемкой, импульсным разрядом и численным моделированием сверхзвукового течения в канале с препятствием

И.А. Знаменская¹, А.Е. Луцкий², И. Долбня¹

¹ МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Ленинские горы 1с2, Москва, 119234, Россия

² ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Миусская пл., д.4, Москва, 125047, Россия

Аннотация

В сверхзвуковом течении в камере ударной трубы реализован импульсной объемный разряд с преионизацией ультрафиолетовым излучением от плазменных листов. Препятствие с размерами 2 мм × 48 мм × 6 мм, установленное на нижнем плазменном листе поперек потока в разрядной камере, приводит к структурным изменениям течения и, соответственно, локализации разряда. В результате локализации энергии разряда формируется сложное нестационарное газодинамическое течение, содержащее разрывы и неоднородности различного типа. Для визуализации течения используется регистрация поля свечения субмикросекундного разряда в потоке; высокоскоростная теневая съемка с частотой 150 тысяч кадров в секунду в течение 14 мс после инициирования разряда в неоднородном потоке за ударной волной. Дополнительная информация об исследуемом течении получена путем численного моделирования на основе уравнений Навье-Стокса. Численные данные представлены в виде распределений газодинамических величин, включая модуль градиента плотности, на различных стадиях процесса. Проведено сравнение расчётных и экспериментальных теневых изображений течения, образовавшегося в результате вложения энергии разряда; вложение энергии в численном расчете производилось в соответствии с полем плотности.

Ключевые слова

Импульсный разряд, теневая высокоскоростная съемка, численное моделирование, визуализация разрядом, зона отрыва, взрывные волны.

Visualization of Supersonic Flow in a Channel with an Obstacle by High-speed Shadow Imaging, Pulsed Discharge and Numerical Simulation

I.A. Znamenskaya¹, A.E. Lutskii², D.I. Dolbnya¹

¹ Lomonosov MSU, Department of Physics, Leninskie gory 1-2, Moscow, 119234, Russia

² Keldysh Institute of Applied Mathematics (RAS), Miusskaya sq., 4, Moscow, 125047, Russia

Abstract

In a supersonic flow in a shock tube chamber, a pulsed volume discharge with preionization by ultraviolet radiation from plasma sheets is realized. An obstacle with dimensions of 2 mm × 48 mm × 6 mm, installed on the lower plasma sheet across the flow in the discharge chamber, leads to structural changes in the flow and, accordingly, the discharge localization. As a result of the localization of the discharge energy, a complex unsteady gas-dynamic flow is formed, containing discontinuities and inhomogeneities of various types. To visualize the flow, registration of the glow field of a submicrosecond discharge in the flow is used; high-speed shadow shooting with a frequency of 150 thousand frames per second for 14 ms after the initiation of a discharge in an

ГрафиКон 2022: 32-я Международная конференция по компьютерной графике и машинному зрению, 19-22 сентября 2022 г., Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина, Рязань, Россия

EMAIL: znamen@phys.msu.ru (И.А. Знаменская); allutsky@yandex.ru (А.Е. Луцкий); dolbnya.dar@yandex.ru (Д.И. Долбня)
ORCID: 0000-0001-6362-9496 (И.А. Знаменская); 0000-0002-4442-0571 (А.Е. Луцкий); 0000-0002-2591-850X (Д.И. Долбня)



© 2022 Copyright for this paper by its authors.
Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

inhomogeneous flow behind the shock wave. Additional information about the flow under study was obtained by numerical simulation based on the Navier-Stokes equations. Numerical data are presented in the form of gas-dynamic quantities distributions, including the modulus of the density gradient, at various stages of the process. A comparison is made between the calculated and experimental shadow images of the flow formed as a result of the discharge energy input; the energy input in the numerical calculation was carried out in accordance with the density field.

Keywords

Pulsed discharge, high-speed shadow imaging, numerical simulation, discharge visualization, separation zone, blast waves.

1. Введение

Импульсные разряды обладают большим потенциалом управления скоростными потоками газа с помощью сверхбыстрого локального нагрева среды [1]. Возникающие при иницировании субмикросекундных разрядов ударно-волновые конфигурации вместе со вторичными потоками воздействует на основной поток. Импульсные разряды эффективны как на малых дозвуковых, так и на сверхзвуковых скоростях [2-4].

Основным механизмом воздействия является быстрая передача электрической энергии газу и нагрев участка потока. Иницирование импульсной плазмы способствует образованию ударных (взрывных) волн и повышению температуры газа, что позволяет, в частности, стимулировать воспламенение и поддержание горения [2, 5].

Целью представленной работы является исследование панорамными методами высокоскоростных течений, формирующихся в потоке в канале с препятствием при импульсной объемной ионизации сверхзвукового потока в канале. Вложение энергии в поток происходит в области комбинированного разряда – импульсного объемного разряда с предыонизацией ультрафиолетовым излучением от плазменных листов. Сложная нестационарная конфигурация возникающих разрывов и возмущений в потоке предъявляет высокие требования к численным алгоритмам, моделирующим процесс импульсного распределенного энергоподвода [6, 7].

2. Экспериментальная установка. Метод визуализации

Исследовалось течение в ударной трубе, представляющей собой канал сечением 24 мм × 48 мм; ударная волна $M = 2,8 - 3,4$ формировалась в результате разрыва диафрагмы при достаточном перепаде давлений на ней. Плоская ударная волна формировалась на расстоянии около 1 метра от точки разрыва диафрагмы. Двигаясь со сверхзвуковой скоростью, она взаимодействует с установленной на нижней стенке (в области плазменного листа) преградой (препятствием). Следует отметить, что из-за влияния волны разрежения, формирующейся в момент разрыва диафрагмы, скорость потока перед разрядной камерой существенно меняется (падает от 820 м/с до 200 м/с) в промежутке времени до 14 мс. Как будет показано ниже, этот факт влияет на локализацию объемного разряда и его воздействие на поток.

Объемный разряд длительностью около 500 нс реализуется после предыонизации газа ультрафиолетовым излучением от плазменных электродов на участке потока протяженностью 10 см в разрядной камере. Межэлектродное расстояние составляет 2,4 см. Препятствие с размерами 2 мм × 48 мм × 6 мм, установленное поперек потока в разрядной камере, приводит к структурным изменениям течения и, соответственно, локализации разряда.

Интегральная регистрация поля свечения комбинированного разряда в различные моменты после прохода ударной волны через препятствие ($t = 0$ – момент касания) велась цифровыми фотоаппаратами с двух сторон рабочей камеры через кварцевые окна длиной размером 170 мм × 16 мм × 24 мм (метод визуализации объемным разрядом [8]). На Рисунке 1 приведены изображения свечения зоны отрыва за препятствием и косоугольного скачка уплотнения импульсным объемным разрядом (с двух ракурсов).

Исследовалось течение в ударной трубе, представляющей собой канал сечением 24 мм × 48 мм; ударная волна $M = 2,8 - 3,4$ формировалась в результате разрыва диафрагмы при

достаточном перепаде давлений на ней. Плоская ударная волна формировалась на расстоянии около 1 метра от точки разрыва диафрагмы. Двигаясь со сверхзвуковой скоростью, она взаимодействует с установленной на нижней стенке (в области плазменного листа) преградой (препятствием). Следует отметить, что из-за влияния волны разрежения, формирующейся в момент разрыва диафрагмы, скорость потока перед разрядной камерой существенно меняется (падает от 820 м/с до 200 м/с) в промежутке времени до 14 мс. Как будет показано ниже, этот факт влияет на локализацию объемного разряда и его воздействие на поток.

Объемный разряд длительностью около 500 нс реализуется после предыонизации газа ультрафиолетовым излучением от плазменных электродов на участке потока протяженностью 10 см в разрядной камере. Межэлектродное расстояние составляет 2,4 см. Препятствие с размерами 2 мм × 48 мм × 6 мм, установленное поперек потока в разрядной камере, приводит к структурным изменениям течения и, соответственно, локализации разряда.

Интегральная регистрация поля свечения комбинированного разряда в различные моменты после прохода ударной волны через препятствие ($t = 0$ – момент касания) велась цифровыми фотоаппаратами с двух сторон рабочей камеры через кварцевые окна длиной размером 170 мм × 16 мм × 24 мм (метод визуализации объемным разрядом [8]). На Рисунке 1 приведены изображения свечения зоны отрыва за препятствием и косоугольного скачка уплотнения импульсным объемным разрядом (с двух ракурсов).

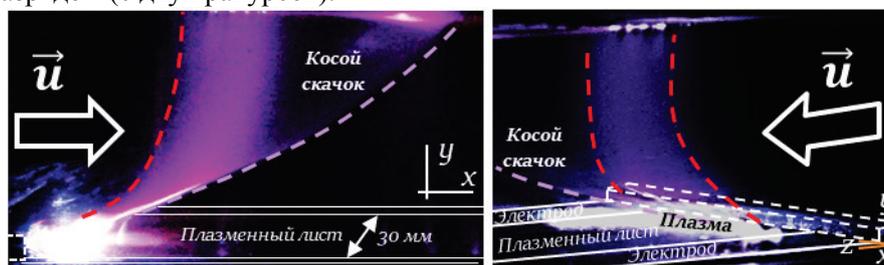


Рисунок 1 – Визуализация зоны отрыва за препятствием и косоугольного скачка уплотнения в сверхзвуковом потоке

Теневая съемка газодинамического потока велась на основе лазерной теневой схемы в параллельных лучах высокоскоростной камерой. Оптимальная скорость съемки 150000 кадров в секунду с экспозицией 1 мкс. Взаимодействие плоской ударной волны (УВ) с препятствием сопровождается нестационарным процессом дифракции этой волны (Рисунок 2а). Сверхзвуковое обтекание препятствия устанавливается в течение 100 – 120 мкс после прохода УВ и длится сотни микросекунд. Стационарному сверхзвуковому (скорость набегающего потока воздуха $u = 820$ м/с) обтеканию препятствия соответствует образование скачка уплотнения (Рисунок 1, Рисунок 2б) вблизи передней кромки, зоны рециркуляции в подветренной области за препятствием, формирование скачка присоединения и пр. (Рисунок 2).

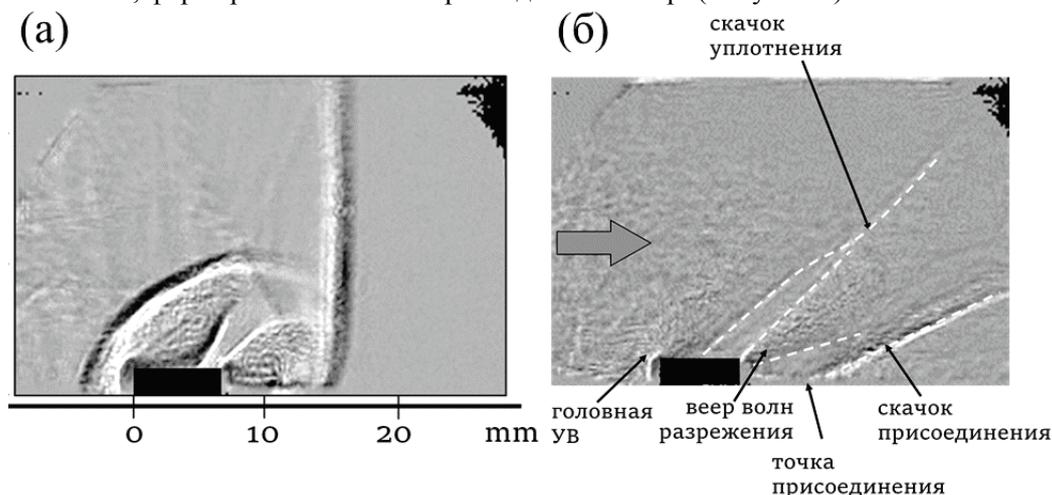


Рисунок 2 – Визуализация дифракции ударной волны (а) и сверхзвукового обтекания с косым скачком уплотнения (б) теневым оптическим методом

3. Результаты

Численное моделирование течения на основе уравнений Навье-Стокса осуществлялось с помощью алгоритма, представленного в работе [9]. Анализ распределения плотности (Рисунок 3) показывает, что на передней и задней кромках выступа формируются области отрыва.

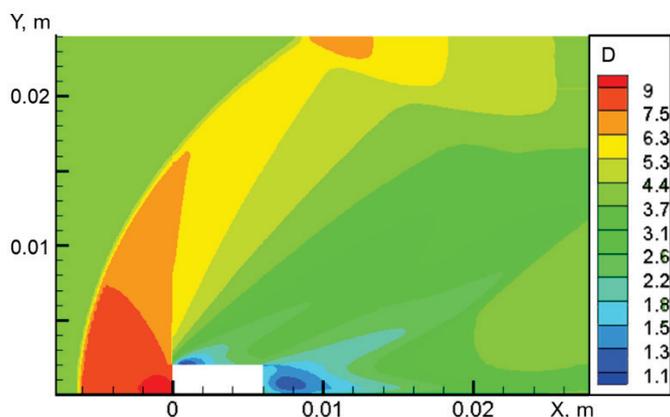


Рисунок 3 – Компьютерная визуализация (численное моделирование) сверхзвукового течения $u = 820$ м/с, поле плотности

При инициировании сильнооточного импульсного разряда с предыонизацией от плазменных листов в потоке за УВ плазма локализуется преимущественно в подветренной области (Рисунок 1, Рисунок 4), где плотность газа является минимальной, а также вдоль косого скачка (Рисунок 1). Мгновенный вклад энергии приводит к возникновению ударно-волнового течения, сносимого основным потоком (Рисунок 4). Взрывные волны имеют изначально форму близкую к полуцилиндрической, затем взрывная волна деформируется и сносится потоком. На Рисунок 4 приведены 3 изображения потока, соответствующие одному моменту времени и числу Маха ударной волны ($M = 3,2$; $t = 210$ мкс после дифракции и 5 мкс после разряда). Сравнение экспериментального (теневое) и численного расчета (Рисунок 4в) производилось методом наложения мгновенных картин течения равного масштаба до полного совпадения разрывов и газодинамических структур.

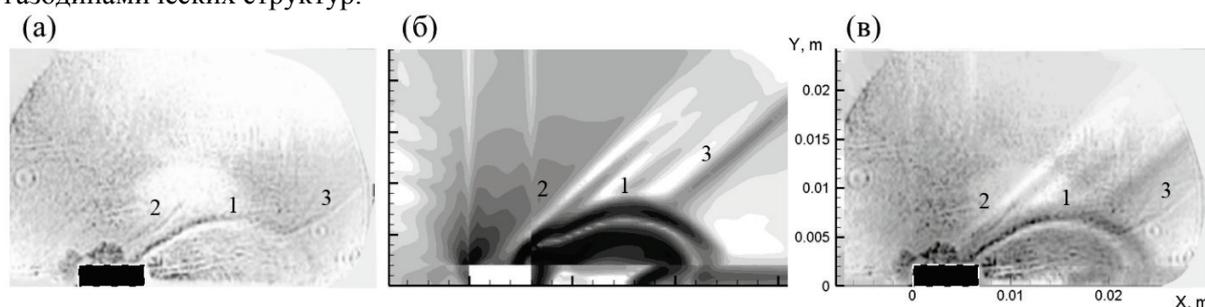


Рисунок 4 – Ударно-волновое течение после 5 мкс после мгновенного вклада энергии; теневой снимок (а), численное моделирование (б), наложение двух кадров (в). 1 – взрывная ударная волна, 2 – косой скачок, 3 – скачок присоединения

Три последовательных (с интервалом 6,6 мкс) кадра распространения взрывной ударной волны (наложение экспериментальных и численных теневых картин) приведены на Рисунок 5. Течение восстанавливается через 25 – 40 мкс после энерговклада при инициировании разряда в сверхзвуковом потоке $u = 820$ м/с.

После 500 – 600 мкс от момента прохода УВ, скорость течения в ударной трубе начинает снижаться под действием волны разрежения, конфигурация течения около препятствия меняется. К моменту 4,5 мс от начала развития течения ее скорость составляет, в частности, 390 м/с. В этом случае минимум плотности наблюдается на поверхности диэлектрической вставки

вблизи передней кромки, в то время как за препятствием (в подветренной области) плотность более чем в 2 раза выше.

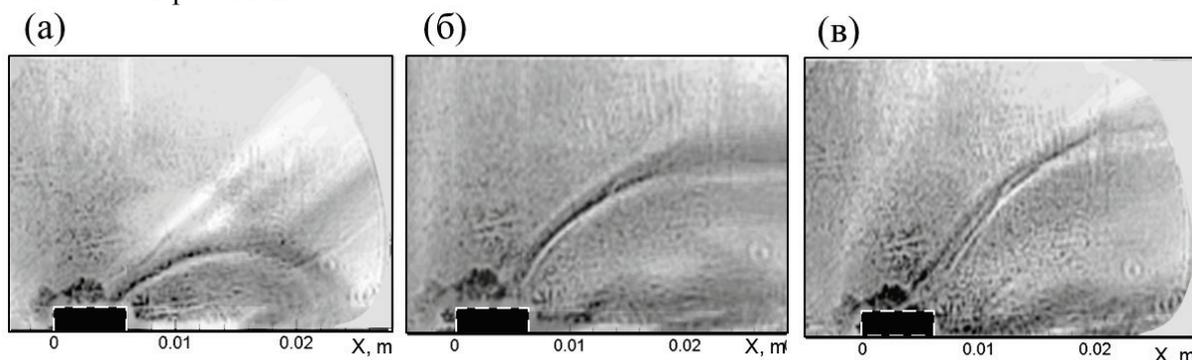


Рисунок 5 – Сравнение последовательных теневых снимков эволюции развития взрывной ударной волны с численным моделированием (методом наложения), скорость потока $u = 820$ м/с. Частота съемки 150 тыс. кадров в секунду, экспозиция 1 мкс

В данном режиме на теневых снимках наблюдается косой скачок, сдвинутый к задней кромке препятствия и турбулентный след, образованный отрывным течением после препятствием шириной около 2 мм (см. Рисунок 6(б,в)). На Рисунке 6(б,в) можно видеть, что течение квазистационарное. На следующем кадре (Рисунок 6(г)) видно яркое пятно - послесвечение от вспыхнувшего в интервале между кадрами (в) и (г) импульсного локализованного разряда. На этом этапе развития потока плазма импульсного разряда формируется вблизи отрыва у передней кромки на верхней поверхности препятствия и вдоль косого скачка. Импульсная ионизация потока ведет к взрывному образованию цилиндрической волны из зоны отрыва, скорость распространения которой достигает 650 м/с и достаточно равномерна во всех направлениях. Локализация разряда вдоль косого скачка ведет к распаду разрыва на его поверхности. На Рисунке 6(д) визуализированы образовавшиеся разрывы. От места локального энерговыклада распространяется термик, ограниченный контактной поверхностью (Рисунок 6(д)) сносимый вдоль основного потока. Процесс формирования термика иллюстрируется также распределениями температуры в последовательные моменты времени – Рисунок 7. Поля температуры (см. Рисунок 7) получены в результате численного моделирования течения в канале. Расчет выполнен в рамках модели уравнений Эйлера. Сетка 670×120 . Обобщенная схема С.К. Годунова – кусочно-линейная реконструкция, ограничитель minmod. Изображение построено с помощью пакета Tecplot360EX.

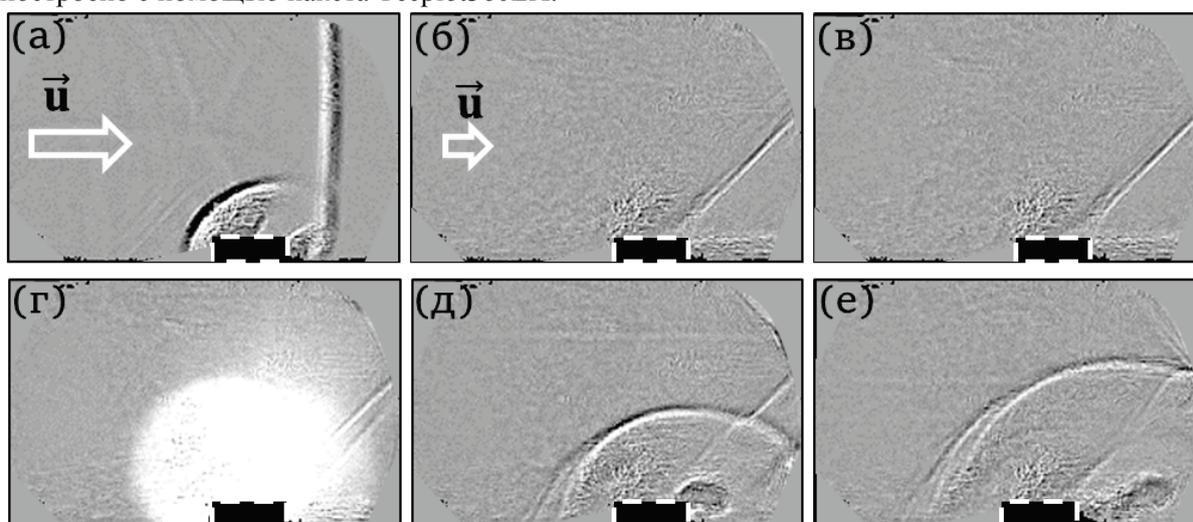


Рисунок 6 – Теневая высокоскоростная съемка 150 тыс кадров/сек: дифракция падающей ударной волны на вставке (а); установившееся стационарное обтекание препятствия через 4.53 мс: последовательные снимки после прохода ударной волны (б)-(е)

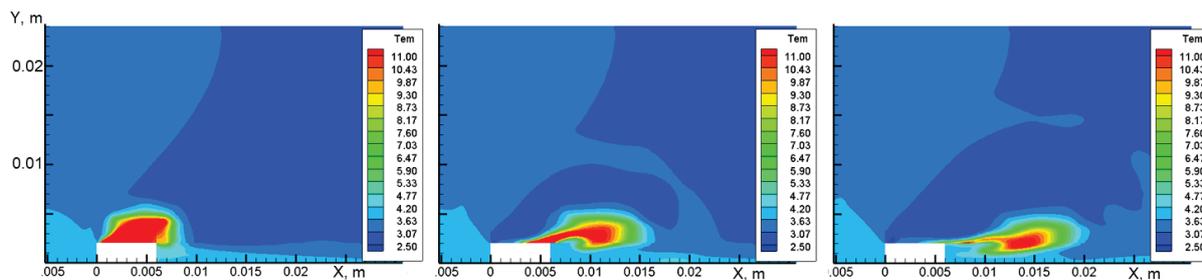


Рисунок 7 – Распределение температуры в последовательные моменты времени после вложения энергии над верхней поверхностью препятствия

На Рисунке 8 приведено сравнение экспериментальных снимков распространения взрывной ударной волны от импульсного энерговклада с численным моделированием в момент, когда поток за ударной волной достиг скорости и равную 390 м/с (после прохода УВ прошло 4,53 мс) при тех же параметрах потока. Сравнение численного расчета и экспериментальных результатов производилось аналогично методу, представленному к Рисунку 4. Вложение энергии в численном расчете производилось в соответствии с локализацией плазмы в эксперименте, т.е. в тонком слое на верхней поверхности уступа ближе к передней кромке.

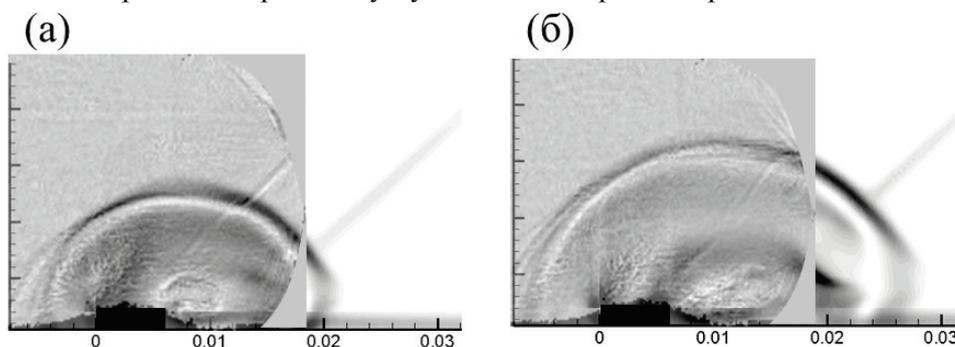


Рисунок 8 – Сравнение последовательных теневых снимков эволюции развития взрывной ударной волны с численным моделированием, скорость потока $u = 390$ м/с

Теневая высокоскоростная съемка также позволила запечатлеть неустойчивость Кельвина-Гельмгольца на контактной поверхности (см. 2, Рисунок 9) после распада косоугольного разрыва под действием импульсной объемной ионизации в потоке.

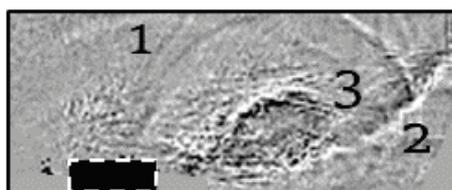


Рисунок 9 - Визуализация неустойчивости Кельвина-Гельмгольца на контактной поверхности после распада разрыва

4. Заключение

Реализован и визуализирован процесс импульсной объемной ионизации сверхзвукового потока газа за плоской ударной волной $M = 2,8 - 3,2$ в прямоугольном канале с препятствием. Численно и экспериментально исследованы возникающие в результате локализации энергии разряда газодинамическое течение сложной структуры. Регистрируется распределение видимого свечения субмикросекундного разряда в потоке, теневые изображения потока в течение 14 мс после инициирования разряда в неоднородном потоке. Показано, что при уменьшении скорости потока на входе в разрядную камеру область вложения энергии

смещается с подветренной стороны препятствия в зону над верхней поверхностью и окрестность косого скачка. При этом наблюдается распространение возмущений вверх и вниз по потоку.

5. Благодарности

Долбня Д.И. является стипендиатом Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС» для аспирантов

6. Список источников

- [1] Leonov S., Petrishchev V., I. Adamovich. Dynamics of energy coupling and thermalization in barrier discharges over dielectric and weakly conducting surfaces on μs to ms time scales // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2014. 47. №46. P. 465201. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0022-3727/47/46/465201>
- [2] Стариковский А., Александров Н. Управление газодинамическими потоками с помощью сверхбыстрого локального нагрева в сильнонеравновесной импульсной плазме // *Низкотемпературная плазма*. 2021. 47. № 2. С. 126-192. URL: <https://doi.org/10.31857/S0367292121020062>
- [3] Moreau E. Airflow control by non-thermal plasma actuators // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2007. 40. P. 605-363. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0022-3727/40/3/S01>
- [4] Temporal variation of the spatial density distribution above a nanosecond pulsed dielectric barrier discharge plasma actuator in quiescent air / T. Ukai, A. Russell, H. Zare-Behtash, K. Kontis // *Physics of Fluids*. 2018. 30. № 11. P. 116106. URL: <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.5054263>
- [5] Ignition and combustion enhancement in a cavity-based supersonic combustor by a multi-channel gliding arc plasma / R. Feng [и др] // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2021. 120. P. 110248. URL: <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2020.110248>
- [6] Знаменская И., Луцкий А. Исследование эволюции и взаимодействия разрывов течения в канале под действием импульсного вложения энергии // *Препринт ИПМ им. М.В.Келдыша РАН*. 2005. № 88. URL: https://www.keldysh.ru/papers/2005/prep88/prep2005_88.html
- [7] Взаимодействие численной и экспериментальной визуализации при исследовании свойств разрядов методом анализа ударно-волновых конфигураций / И. Знаменская, А. Луцкий, Я. Ханхасаева, Ц. Цзинь // *Научная визуализация*. 2013. 5. № 3. С. 40-51. URL: <http://sv-journal.org/2013-3/03/index.html>
- [8] Знаменская И. Методы панорамной визуализации и цифрового анализа теплофизических полей. Обзор // *Научная визуализация*. 2021. 13. № 3. С. 125-158. URL: <http://sv-journal.org/2021-3/13/?lang=ru>
- [9] Луцкий А., Меньшов И., Ханхасаева Я. Влияние неоднородности набегающего потока на сверхзвуковое обтекание затупленного тела // *Матем. Моделирование*. 2016. 28. № 7. С. 45-55. URL: <https://www.mathnet.ru/links/dea81777670796fff4a35a94eaaccb26/mm3747.pdf>