

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В.ЛОМОНОСОВА»

Физический факультет  
Кафедра молекулярных процессов и экстремальных состояний вещества

**«Эволюция плазменного вихря за обратным уступом при импульсной  
ионизации газодинамического потока»**

Выполнила студентка 404 группы

Карнозова Е.А.

Научный руководитель:

доктор физ.-мат. наук Знаменская И.А.

Москва  
2020

## **Введение**

Наносекундные импульсные разряды достаточно эффективны для активного управления потоком газа. В последнее время уделяется большое внимание изучению методов влияния на сверхзвуковые течения, в том числе с помощью локализованных импульсных энергокладов в поток при использовании празменных актуаторов, работающих на основе импульсных разрядов различных типов. При сверхзвуковом обтекании угловых конфигураций возникают дифракционные ударно-волновые явления, исследование которых представляет интерес для решения задач, связанных с использованием ударных волн в технологических процессах[1].

Цель данной работы – экспериментальное изучение течения при инициированных импульсных разрядах в области обратного уступа за ударной волной.

## **Дифракция ударной волны на обратном уступе**

Дифракция ударной волны на препятствии представляет собой сложный процесс нестационарного взаимодействия с образованием отражённой ударной волны и возмущений. Дойдя до конца препятствия, плоский фронт ударной волны меняет свою форму, дифрагируя на уступе и образуя вихрь. В течении за уступом со временем развиваются процессы взаимодействия ударной волны и вихря, ударной волны и сдвигового слоя, возникают различные типы отражения пристенной ударной волны, а также вторичная ударная волна. Двумерное моделирование дифракции ударной волны на прямом угле может достаточно точно предсказать базовую картину ударного процесса. Важную роль играет интенсивность падающей ударной волны[2]. В случае дифракции слабой ударной волны течение за фронтом – дозвуковое (рис.1а). Структура сверхзвукового течения за фронтом сильной падающей ударной волны существенно усложняется и включает веер волны разрежения, регулярное и нерегулярное взаимодействие ударных волн, а также контактные разрывы (рис.1б).

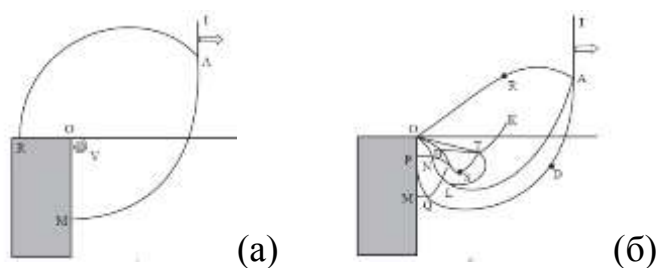


Рисунок 1. Схема течения при дифракции слабой (а) и сильной (б) ударной волны на прямом угле[2]: IA – падающая ударная волна, AM – дифрагированная ударная волна, АО – отраженная акустическая волна, AL – контактная поверхность, TS – волна торможения, OS – линия отрыва, ТВ – косая ударная волна, ТК – вторичный скачок, NP – пристенный скачок, Q – тройная точка, V – вихрь, R и D – точки искривления фронта.

Результаты численных расчетов с учётом вязкости среды[3] достаточно точно отражают основной вихрь, вторичный вязкий вихрь, связанный с взаимодействием ударной волны с пограничным слоем, слоем сдвига и ударную волну лямда-типа, наблюдаемые в экспериментах[4] на ранней стадии эволюции.

### Объёмный и поверхностный разряды

В ряде экспериментальных и численных исследований изучается динамика потоков, вызванных импульсными разрядами поверхностного или объёмного типа [5]-[7]. Плазменный взрыв, возникающий в результате инициирования импульсного разряда, сопровождается газодинамическими возмущениями среды. Формируется фронт ударной волны, который движется от места локализации разряда. Это быстропротекающие во времени процессы, длящиеся менее 1 мкс. За счёт возникновения неоднородностей плотности при ионизации газа разрядом происходит перераспределение тока в области пониженного давления. Объёмный разряд стягивается в области разрежения, которая становится источником повышенной интенсивности свечения.

Параметры индуцированных ударных волн зависят от типа разряда, места и начальной формы пробоя [6]. Малая длительность наносекундных разрядов позволяет визуализировать структуры нестационарных течений, в том числе

сверхзвуковые потоки с ударными волнами, с помощью регистрации их излучения.

## Эксперимент

Эксперименты проводились на установке УТРО-3, состоящей из диафрагменной ударной трубы прямоугольного сечения со встроенной специальной разрядной камерой [7]. Исследовалось прохождение ударной волны через препятствие в форме прямоугольного параллелепипеда с размерами 6\*48\*2 мм, установленного в разрядной камере (рис.2), регистрация свечения и теневая съёмка проводились через боковые прозрачные стенки камеры.

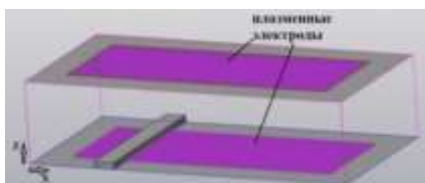


Рисунок 2. Схема расположения препятствия в разрядной камере.

Проведены эксперименты:

- 1) По исследованию дифракции ударной волны от плазменного листа на обратном уступе, образованном верхней плоскостью препятствия в форме параллелепипеда.
- 2) По исследованию импульсной ионизации потока за плоской ударной волной после ее дифракции на задней стенке препятствия.



Рисунок 3. Схема прохождения ударной волной препятствия в двух конфигурациях: конфигурация 1 – дифракция от плазменного листа на обратном уступе; конфигурация 2 – дифракция на задней стенке.

Рассмотрены случаи разряда в объёмном и поверхностном режимах.

Построены осциллограммы тока, проведено сравнение осциллограмм.

## Конфигурация 1. Дифракции ударной волны от плазменного листа на обратном уступе, образованном верхней плоскостью препятствия

Проведена серия экспериментов по дифракции на препятствии ударных волн, инициированных импульсным поверхностным разрядом тита “плазменный лист” (рис.3, конфигурация 1). Получены фото свечения наносекундного объемного разряда с плазменными электродами и поверхностного разрядов в покое воздухе (рис.4) при значении давления  $P \approx 2 \pm 1$  торр.



Рисунок 4. Снимки свечения объёмного и поверхностного разрядов,  $P \approx 2 \pm 1$  торр.

С помощью высокоскоростной теневой съёмки получены кадры эволюции ударно-волновых конфигураций во времени (рис.5,6).



Рисунок 5. Теневая съёмка прохождения ударной волной препятствия в конфигурации 1 – дифракция ударной волны от плазменного листа на обратном уступе, образованном верхней плоскостью препятствия: объёмный разряд, начальное давление в разрядной камере  $P \approx 2 \pm 1$  торр.



Рисунок 6. Теневая съёмка прохождения ударной волной препятствия в конфигурации 1 – дифракция ударной волны от плазменного листа на обратном уступе, образованном верхней плоскостью препятствия: поверхностный разряд, начальное давление в разрядной камере 26 торр.

По снимкам определено смещение полуцилиндрических ударных волн, огибающих препятствие (по изменению положения верхней точки), построены графики для случая объёмного и поверхностного разрядов (рис.7).

Из-за невозможности точно определить момент поджига разряда, графики могут быть смещены по временной шкале. Считая, что движение фронта достаточно равномерно, можно предположить, что при аппроксимации данных полиномиальной функцией вида  $x = -a*t^2 + b*t + c$ , наиболее информативным значением является первый коэффициент.

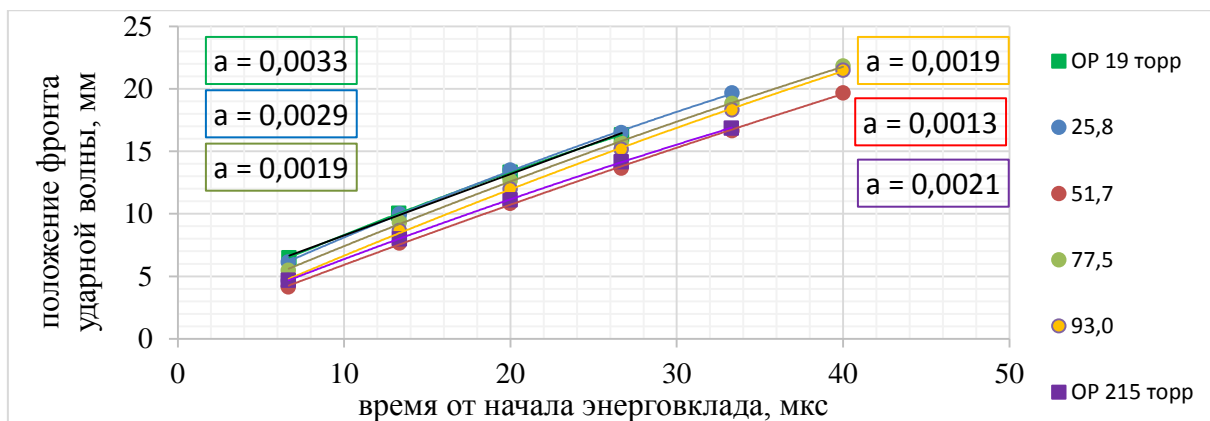


Рисунок 7. График смещения верхней координаты фронта ударной волны при различных начальных давлениях: объёмный (OP) и поверхностный разряд.

На снимке свечения (рис.8) для серии точек с  $P = 215$  Торр – вертикальный пробой, часть энергии перераспределилась в канал пробоя.

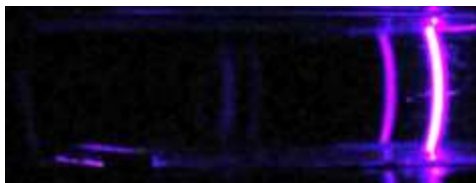


Рисунок 8. Снимок свечения,  $P=215$  Торр.

Построенные осциллограммы тока (рис.9) позволяют исследовать зависимость характеристик тока объёмного и поверхностного разрядов от структуры ударно-волновых конфигураций. Максимумы амплитуды:  $I \sim 1300$  А – вертикальный пробой слева от препятствия (объёмный разряд,  $P=96$  торр),  $I \sim 1500$  А – сильное свечение у правого края препятствия (поверхностный разряд,  $P=247$  торр).

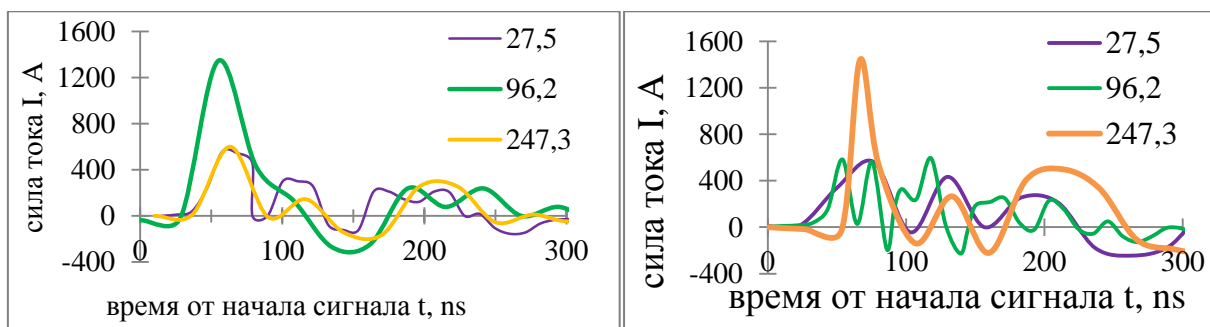


Рисунок 9. Осциллограммы тока объёмного и поверхностного разрядов в неподвижном газе.

## Конфигурация 2. Дифракция ударной волны на задней стенке препятствия в форме параллелепипеда

Получены данные высокоскоростной теневой съемки в конфигурации 2.

Плоская ударная волна движется в сторону препятствия (рис.12). Дойдя до

задней кромки, фронт волны огибает препятствие. В районе обратного уступа образуется вихрь и зоны пониженной плотности.

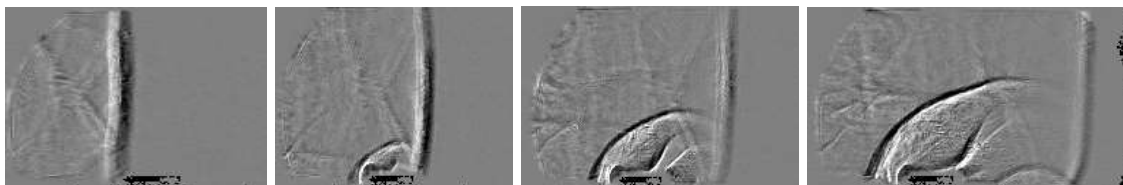


Рисунок 10. Теневая съёмка прохождения ударной волной (число Маха  $M=3,3$ ) препятствия в конфигурации 2 – дифракция на задней стенке препятствия.

Получены фотографии возникновения и эволюции плазменного вихря, локализованного за обратным уступом при импульсной ионизации газодинамического потока в различные моменты времени после прохождения ударной волны с числом Маха  $M \sim 3$  (рис.11-13). В соответствии с эволюцией вихря происходит локализация, смещение, релакация горизонтального плазменного образования в зоне пониженной плотности потока за уступом.



Рисунок 11. Равномерное свечение объёмного разряда в отсутствии УВ

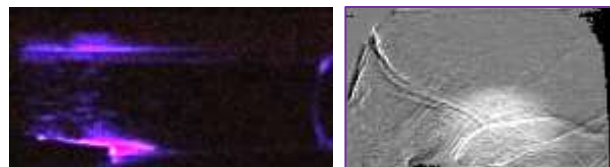


Рисунок 12. Свечение объёмного разряда и кадр теневой съёмки. Время после прохождения УВ ( $M=3,4$ ) задней кромки препятствия  $\Delta t \sim 87$  мкс.

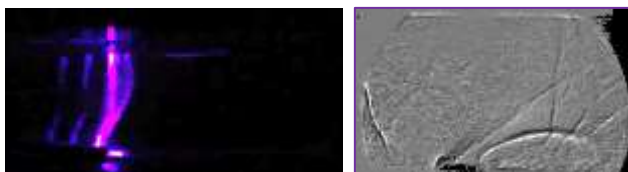


Рисунок 13. Свечение объёмного разряда и кадр теневой съёмки. Время после прохождения УВ ( $M=2,7$ ) задней кромки препятствия  $\Delta t \sim 150$  мкс, разряд за уступом, объёмный пробой.

## Заключение

В работе исследованы течения газа при инициированных импульсных разрядах в области обратного уступа за прямоугольным препятствием для двух различных конфигураций. Получены снимки свечения объёмного и поверхностного разрядов в канале с препятствием. Исследована эволюция плазменного вихря за обратным уступом при импульсной ионизации потока

за ударной волной  $M=2,7-3,4$ . Проведена высокоскоростная съёмка теневым методом течения. Построены зависимости положения взрывной волны от времени и осциллограммы тока. Полученные результаты показали наличие ряда особенностей, связанных со структурой ударно-волновых конфигураций и локализацией разрядов, дальнейшее изучение которых представляется перспективным для использования локализации энергии импульсного разряда в зоне отрыва потока.

### Список литературы

1. Т. В. Баженова Гвоздева, Л. Г. Гвоздева, Нестационарные взаимодействия ударных волн.
2. Булат П.В., Волков К.Н., Численное моделирование дифракции ударной волны на прямом угле на неструктурированных сетках // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 2. С. 354–362. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-2-354-362.
3. V. Soni, A. Chaudhuri, N. Brahmī, and A. Hadjadj, “Turbulent structures of shock-wave diffraction over  $90^\circ$  convex corner”, *Phys. Fluids* **31**, 086103 (2019), <https://doi.org/10.1063/1.5113976>.
4. К. Takayama и О. Inoue “Shock wave diffraction over a 90 degree sharp corner—posters presented at 18th ISSW,” *Shock Waves* 1, 301–312 (1991).
5. I. Znamenskaya, D. Tatarenkova, T. Kuli-zade, Nanosecond volume discharge in the flow with diffracting shock wave in the rectangular channel, *Journal of Physics: Conference Series* 1394 (2019) 012017, . doi:10.1088/1742-6596/1394/1/012017.
6. И. А. Знаменская, Д. А. Коротеев, Н. А. Попов, Наносекундный сильноточный разряд в сверхзвуковом потоке газа, *ТВТ*, 2005, том 43, выпуск 6, 820–827.
7. Н. О. Архипов, И. А. Знаменская, И. В. Мурсенкова, И. Ю. Остапенко, Н. Н. Сысоев, Эволюция наносекундного комбинированного объемного разряда с плазменными электродами в потоке воздуха, *ВМУ. Серия3. Физика. Астрономия*. 2014. №1.