

### **1 слайд**

Представляется доклад на тему «Эволюция плазменного вихря за обратным уступом при импульсной ионизации газодинамического потока».

### **2 слайд**

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

При сверхзвуковом обтекании угловых конфигураций возникают интерференционные и дифракционные ударно-волновые явления. Дифракция ударной волны на плоском прямом угле является частным случаем задачи дифракции на обратном уступе и относится к одной из широко исследуемых тестовых задач нестационарной газодинамики. Представленная схема течения показывает, возникающая при дифракции ударной волны на прямом угле ударно-волновая конфигурация сильно зависит от интенсивности падающей ударной волны. 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.

### **3 слайд**

Эксперименты проводились на установке УТРО-3, состоящей из специальной разрядной камеры и из диафрагменной ударной трубы прямоугольного сечения. На слайде представлена экспериментальная схема. Ударная труба состоит из двух секций: камеры высокого давления (КВД) и камеры низкого давления (КНД), разделённых диафрагмой. В КВД нагнетается толкающий газ гелий, при некотором значении давления происходит разрыв диафрагмы. В результате, возникает ударная волна (УВ), которая движется по КНД, где изначально находился покоящийся воздух, откаченный с помощью вакуумного насоса до малых значений давления. В КНД установлена специальная разрядная камера (РК) с плазменными электродами. Ширина РК

– 48 мм, высота – 24мм, расстояние между вертикальными стенками и электродами – 9 см (с каждой стороны). Внутри РК, на нижней плоскости, установлено препятствие – вставка из капролона с размерами 6\*48\*2 мм (длина в направлении набегающего потока, ширина, высота). Для определения скорости УВ измеряется время, за которое УВ проходит расстояние между пьезодатчиками, установленными в начале КНД и на стыке между КНД и РК. Расстояние между датчиками 103 см. Момент поджига разряда и значение напряжения тока регистрируются с помощью осциллографа. Регистрация свечения и теневая съёмка проводятся через боковые прозрачные стенки камеры. С помощью специальной оптической схемы создается параллельный пучок лучей, который проходит сквозь РК и попадает в поле объектива высокоскоростной камеры, позволяя регистрировать процессы, происходящие в сечении РК теньевым методом

Конструкция разрядной камеры позволяет наблюдать два типа импульсных разрядов: объёмный и поверхностный разряды (ОР и ПР, соответственно). В результате инициирования импульсного разряда происходит плазменный взрыв, который сопровождается газодинамическими возмущениями среды. Формируется фронт ударной волны, движущийся от места локализации разряда. Эти процессы являются быстропротекающими во времени и длятся менее 1 мкс. На слайде представлена фотография свечения кадр высокоскоростной съёмки объёмного разряда в неподвижном воздухе.

#### **4 слайд**

В работе исследовалась структура ударно-волновых конфигураций в случаях импульсных разрядов в объёмном и поверхностном режимах.

Проведены эксперименты для двух различных конфигураций:

- 1) Дифракция ударной волны от плазменного листа на обратном уступе, образованном верхней плоскостью параллелепипеда (конфигурация 1).
- 2) Импульсная ионизация потока за плоской ударной волной после ее дифракции на задней стенке препятствия (конфигурация 2).

## 5 слайд

На слайде представлены результаты, полученные в первой конфигурации, образованном верхней плоскостью параллелепипеда.

Слева представлены фотографии свечения объёмного и поверхностного разряда при малых значениях давления,  $P \sim 2$  торр.

Справа приведены кадры прохождения ударной волной препятствия, полученные с помощью высокоскоростной съёмки теневым методом.

Серия кадров сверху соответствует дифракции ударной волны от плазменного листа на обратном уступе в режиме объёмного разряда, начальное давление в разрядной камере  $\sim 2$  торр.

Кадры снизу – поверхностный разряд, начальное давление в разрядной камере  $\sim 27$  торр.

## 6 слайд

По кадрам высокоскоростной съёмки определено смещение ударных волн, огибающих препятствие (по изменению положения верхней точки).

Построены графики (верхний рисунок на слайде):

для случая объёмного разряда при различных значениях начального давления в разрядной камере (19 торр и 215 торр), для случая поверхностного разряда (при начальном давлении 26, 52, 78, 93 торр).

На снимке свечения при начальном давлении  $P=215$  торр (соответствует серии фиолетовых квадратных точек, выпадающей из общей зависимости) присутствует вертикальный пробой, часть энергии перераспределилась в канал пробоя.

Осциллограммы тока (нижний рисунок) показывают, что максимальное значение силы тока наблюдается для случая объёмного разряда ( $I \sim 1300$  А) при наличие вертикального пробоя слева от препятствия и в случае поверхностного разряда ( $I \sim 1500$  А) при наличие сильного свечения у правого края препятствия.

## 7 слайд

В экспериментах проводилась высокоскоростная съёмка теневым методом. Частота съёмки  $f=150000$  кадр/сек, время экспозиции  $\tau=1$  мкс. Ниже представлены результаты для второй конфигурации: импульсная ионизация потока за плоской ударной волной после ее дифракции на задней стенке препятствия.

Кадры на слайде показывают прохождение плоской ударной волны препятствия в форме прямоугольного параллелепипеда. Представлены две серии экспериментов падающей ударной волны с числом Маха  $M=3,4$  и  $M=2,7$ . Нумерация кадров своя для каждой серии экспериментов. Плоская ударная волна движется в сторону препятствия (кадр 1). Дойдя до задней кромки, фронт волны огибает препятствие (кадр 2) и продолжает движение, удаляясь от препятствия. В районе обратного уступа образуется вихрь и зоны пониженной плотности (кадры 3, 4).

Проведено сравнение экспериментов по дифракции плоской ударной волны на прямоугольном уступе с соответствующим 2D-моделированием.

## 8 слайд

Через некоторое время после прохождения падающей плоской волной препятствия поджигается разряд (кадр 14 и 22). 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.

На слайде представлены фотографии свечения объёмного разряда и соответствующие кадры высокоскоростной съёмки:

разряд в потоке, время после прохождения УВ ( $M=3,4$ ) задней кромки препятствия, составляет  $\Delta t \sim 80$  мкс;

разряд за уступом, УВ прошла препятствие, время после прохождения УВ ( $M=2,7$ ) задней кромки препятствия  $\Delta t \sim 160$  мкс, объёмный пробой.

В соответствии с эволюцией вихря происходит локализация, смещение, релаксация горизонтального плазменного образования в зоне пониженной плотности потока за уступом.

### **9 слайд**

В работе исследованы течения газа при инициированных импульсных разрядах в области обратного уступа за прямоугольным препятствием для двух различных конфигураций:

- 1) огибание ударной волной от импульсного поверхностного разряда прямоугольного обратного уступа;
- 2) импульсная ионизация течения за обратным уступом после дифракции ударной волны.

Проведена высокоскоростная съёмка теневым методом течения в обеих конфигурациях. В случае первой конфигурации рассмотрена дифракция ударной волны от плазменного листа, движущейся вертикально, на обратном уступе, образованном верхней плоскостью препятствия. Построены зависимости смещения верхней точки фронта дифрагировавших ударных волн от времени. Для поверхностного и объёмного разрядов проведено сравнение осциллограмм тока, полученных при различных значениях давления.

В случае второй конфигурации получены снимки свечения объёмного разряда в потоке за плоской ударной волной с числом Маха  $M=2,7-3,4$  в различные моменты времени до  $t \sim 170$  мкс. Исследована эволюция плазменного вихря за обратным уступом при импульсной ионизации потока за ударной волной.

Данные теневой съёмки, снимки свечения и осциллограммы тока 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.