

03;04

## **Исследование поверхностного энерговклада в газ при инициировании импульсного разряда типа „плазменный лист“**

© *И.А. Знаменская, А.Е. Луцкий, И.В. Мурсенкова*

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

E-mail: @phys.msu.ru

Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша, Москва

E-mail: @kiam.ru

*Поступило в Редакцию 1 июля 2004 г.*

Приведены результаты экспериментов по исследованию газодинамических возмущений, возникающих при инициировании импульсных поверхностных разрядов (плазменного листа) в ударной трубе. Представлены результаты численного расчета развития течения в рамках модели теплового энерговклада. Показано, что экспериментальные значения скорости движения возмущений хорошо согласуются с результатами расчета в предположении, что около 50% вкладываемой в поверхностный слой энергии переходит в тепловую энергию на стадии энергоподвода.

Инициирование разряда „плазменный лист“ (система скользящих по поверхности диэлектрика каналов) в газодинамическом потоке дает возможность экспериментально моделировать импульсный энерговклад в области пограничного слоя в течении газа [1,2]. Разряды такого типа используются, в частности, в газоразрядных и эксимерных лазерах в качестве плазменных электродов [3,4]; они являются хорошими распределенными источниками ультрафиолетового излучения для однородной предьонизации основного разрядного объема.

Для учета влияния поверхностного энергоподвода на течение в пограничном слое необходим анализ динамики нагрева газа после инициирования плазменного листа. Механизм перехода электрической энергии импульсного разряда в энтальпию потока связан со сложной, неоднозначно определяемой кинетикой неравновесно возбуждаемой области.

При любом способе возбуждения импульсного разряда в среде возникают газодинамические возмущения, вызванные быстрым введением энергии в ограниченный объем. Исследование среды в разрядном промежутке CO<sub>2</sub>-лазера с двумя плазменными электродами показало, что после инициирования плазменных листов образуются возмущения в виде слабых ударных волн с числом Маха  $M = 1.2-1.3$  [5]. Интерферометрическое исследование выявило гладкость фронта образующихся ударных волн и значительную ширину фронта волны, что могло быть следствием большой величины оптического пути зондирующего луча вдоль возмущенной области (800 mm): оптическое зондирование проводилось в направлении, поперечном к направлению распространения скользящих разрядов.

Целью настоящей работы является анализ доли энергии, непосредственно вводимой в газ вблизи поверхности при инициировании импульсного разряда типа „плазменный лист“ на основе исследования динамики возникших при этом ударных волн.

**1. Экспериментальное исследование динамики возмущений, возникающих при инициировании скользящих по поверхности разрядов.** Экспериментально исследовалась динамика возмущений от плазменных листов, образованных скользящими по поверхности разрядами; процесс регистрировался в газодинамическом канале в направлении, совпадающем с направлением распространения скользящих разрядов. Эксперименты проводились на ударной трубе с разрядной камерой (рабочей секцией). Внутренняя область разрядной камеры являлась продолжением камеры низкого давления ударной трубы сечением  $24 \times 48$  mm. На участке длиной 17 cm противоположные стенки рабочей секции были заменены плоскопараллельными кварцевыми стеклами без изменения поперечного сечения канала. Плазменные листы размером  $35 \times 100$  mm инициировались на двух противоположных стенках рабочей секции на расстоянии 24 mm друг от друга. На электроды скользящих разрядов подавалось импульсное напряжение 30 kV. Рабочим газом служил воздух, начальное давление составляло около 100 Torr. Для визуализации приэлектродных ударных волн (от плазменных листов) и анализа динамики их движения были получены теневые и шпирен-изображения разрядного промежутка в различные моменты времени после инициирования скользящих разрядов. В качестве диагностирующего излучения использовался многомодовый рубиновый лазер с параметрами:  $E = 0.64$  J,  $\tau_{1/2} = 20$  ns,  $\lambda = 0.6943$   $\mu$ m. Схема синхронизации позволяла зондировать разрядный объем в интервале

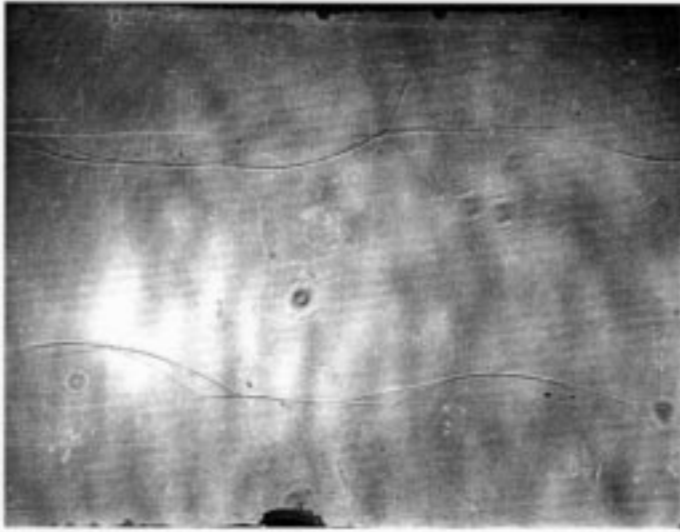


Рис. 1.

задержки  $0 \div 100 \mu\text{s}$  относительно импульса тока скользящего разряда. Одновременно регистрировалась осциллограмма тока разряда.

Анализ экспериментальных данных показал, что в каждый плазменный лист вкладывается энергия  $\sim 0.6 \text{ J}$  за время около  $100 \text{ ns}$ . Скачок давления инициирует на поверхности набор полуцилиндрических ударных волн, в течение  $\sim 10 \mu\text{s}$  фронты этих волн интерферируют друг с другом с образованием гладкого квазиплоского фронта огибающей ударной волны. На рис. 1 приведено теневое изображение возмущенной области через  $12 \mu\text{s}$  после инициирования поверхностных разрядов. Искривления фронта волны соответствуют полуцилиндрическим фронтам ударных волн от отдельных (наиболее интенсивных) скользящих разрядов.

Динамика движения фронтов волн исследована путем цифровой обработки и анализа теневых и шпирен-изображений, полученных с известными временами задержки после инициирования плазменных листов. Значения положения фронта огибающей квазиплоской ударной волны от каждого плазменного листа усреднялись по видимому полю изображения. На рис. 2 точками показаны экспериментальные значения положения фронтов огибающих ударных волн от поверхностных раз-

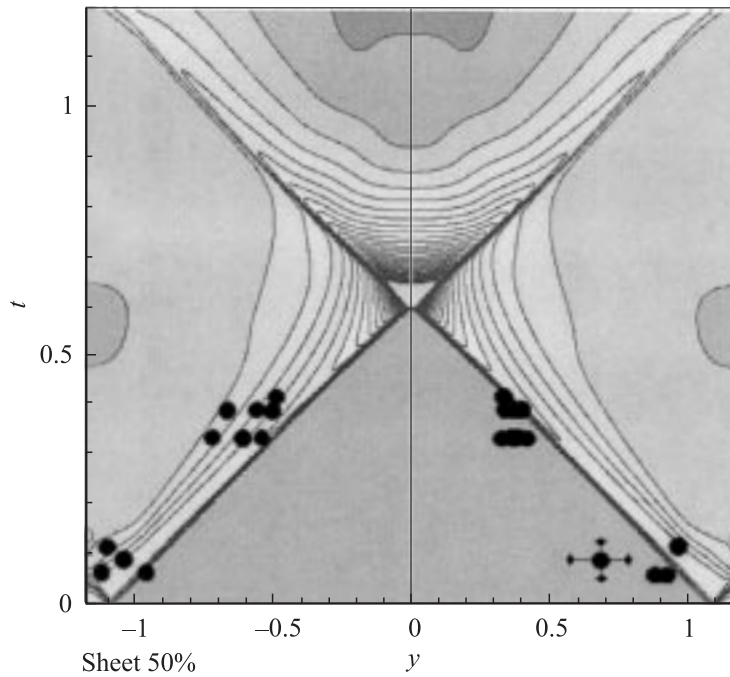


Рис. 2.

рядов на двух противоположных стенках рабочей камеры. Положение плазменных листов в момент времени  $t = 0$  соответствует координатам  $y = \pm 1.2$  см. Волны начинают движение от электродов со скоростями  $\sim 800$  м/с. Через  $15\text{--}20\ \mu\text{s}$  после разряда волна движется со скоростью  $V \approx 450$  м/с. Далее происходит встречное взаимодействие ударных волн от двух плазменных листов, и в течение следующих  $10\text{--}20\ \mu\text{s}$  ударные волны затухают. Систематическая задержка в положении волн от верхнего и нижнего листов (при одинаковой скорости волн) определяется, по-видимому, асимметричной картиной развития скользящего разряда (по зондирующему лучу и навстречу лучу). На рисунке время отнесено к параметру  $\frac{t}{\tau} = L\sqrt{\frac{\rho}{p}}$ , где  $L = 10^{-2}$  м,  $\rho = 0.17$  кг/м<sup>3</sup>,  $p = 1.32 \cdot 10^4$  Па.

**2. Численное исследование течения при импульсном поверхностном энерговкладе.** Проведены двумерные расчеты нестационарного

течения, возникающего при поверхностном энерговлложении. Использовалась обобщенная разностная схема Годунова с кусочно-линейным представлением полей газодинамических функций. В качестве математической модели рассматривалась система уравнений Эйлера (т.е. вязкость и теплопроводность среды не учитывались). Ввод энергии моделировался в соответствии с реальной картиной процесса. Рассчитывалась газодинамическая картина движения возмущений из области энерговлложения толщиной 1 mm. Проводилось сравнение рассчитанной динамики движения возмущений от плазменных листов с экспериментальными данными при различных уровнях мгновенного энерговлклада.

На рис. 2 приведены результаты расчетов динамики давления при движении возмущений из области разряда при равномерном вкладе энергии в поверхность.  $Y-t$ -диаграмма давления при встречном движении ударных волн совмещена с соответствующими экспериментальными значениями положения ударных волн. Расчеты проведены в предположении, что 50% вкладываемой в поверхностный слой энергии переходит тепловую энергию на начальной стадии энергоподвода, при таком предположении наблюдается хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных.

Таким образом, анализ результатов исследований развития течения позволяет в рамках модели теплового энерговлклада оценить долю мгновенного энерговлклада как 45–55%.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы РАН „Взаимодействие плазмы с высокоскоростными потоками газа“.

## Список литературы

- [1] Кузьмин П., Минаев И.М., Рухадзе А.А. // ТВТ. 2002. Т. 40. № 3. С. 515.
- [2] Знаменская И.А., Луцкий А.Е. Импульсный разряд, скользящий по поверхности в газодинамическом потоке // Тез. V совещания по магнитной и плазменной аэродинамике в аэрокосмических приложениях. М., 2003.
- [3] Карлов Н.В., Кузьмин Г.П., Прохоров А.М. // Изв. АН СССР. Сер. Физ. 1984. Т. 48. № 7. С. 1430–1436.
- [4] Баранов В.Ю., Борисов В.М., Христофоров О.Б. // Квантовая электроника. 1981. Т. 8. № 1. С. 165–167.
- [5] Андреев С.И., Знаменская И.А., Ковалев И.О. и др. // Сб. трудов III Всесоюзного совещания „Физика и газодинамика ударных волн“ (Владивосток). М., 1996. Ч. II. С. 68–73.