

УДК 533.6.071

## ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ИМПУЛЬСНЫХ РАЗРЯДОВ В НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕЧЕНИЯХ С УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ

© 2011 г.

*И.А. Знаменская*

Московский госуниверситет им. М.В. Ломоносова

znamen@phys.msu.ru

*Поступила в редакцию 16.05.2011*

Исследуются энергетические характеристики наносекундных локализованных разрядов (объемного и поверхностного) в нестационарных сверхзвуковых потоках на основе экспериментального и численного анализа возникающих газодинамических течений.

*Ключевые слова:* ударная труба, наносекундный поверхностный разряд, объемный разряд, энерговклад, двумерное моделирование.

Энергоподвод в газодинамический поток является одним из методов управляемого воздействия на течение. Эффективность воздействия разряда на поток определяется отношением  $D$  вложенной в поток энергии разряда  $W_{\text{разр}}$  к энтальпии газодинамического потока:  $D = W_{\text{разр}}/h_{\text{пот}}$  (аналог числа Дамкелера для физико-химических процессов в потоке газа). Для сверхзвуковых течений газа эффективное воздействие предполагает увеличение значения  $W_{\text{разр}}$ . В стационарном режиме энергоподвода при увеличении энергии (тока) разряда повышается вероятность возникновения плазменных неустойчивостей. Исследования показали, что осуществление эффективного воздействия на высокоэнтальпийные газовые потоки возможно на основе импульсного (импульсно-периодического) энергоподвода. Основным средством реализации такого энергоподвода являются импульсные разряды: оптический разряд, сильноточные наносекундные разряды – объемный и поверхностный. За время  $t_{\text{разр}} \ll t_{\text{пот}}$ , плазменные неустойчивости не успевают развиваться. При этом инициирование разряда в потоке приводит к возникновению нестационарного ударно-волнового течения, которое воздействует на исходный высокоскоростной поток. Воздействие определяется энерговкладом и конфигурацией разрядной области в потоке, параметрами и структурой исходного газодинамического течения.

Для описания газодинамических последствий инициирования разряда в потоке в случае, если время протекания тока разряда  $t_{\text{разр}}$  много меньше характерных газодинамических времен  $t_{\text{пот}}$ , можно использовать модель мгновенного энерговклада. Пусть за время  $t_{\text{разр}}$  в нагрев газа (последовательные степени свободы) переходит энергия

$W_{\text{разр}} = KE$ , где  $E$  – полная электрическая энергия,  $K$  – доля энергии разряда, перешедшая в тепло на стадии протекания тока разряда. Нахождение значения коэффициента  $K$  через физико-химический анализ плазмы разряда требует учета множества кинетических процессов, определяемых параметрами плазмы, газа, эволюцией течения. Предложен и реализован для ряда двумерных нестационарных течений с энергоподводом альтернативный подход к данной проблеме: определение энергии, импульсно введенной в поток разрядом, путем решения обратной задачи. Численно моделируется возникающее при мгновенном локальном энерговкладе нестационарное газодинамическое течение. Экспериментально теневым методом исследуются быстротекающие квазидвумерные газодинамические процессы, возникающие после инициирования разрядов наносекундной длительности в течениях с разрывами. Проводится сравнение теневых изображений возникающих ударно-волновых конфигураций и соответствующих данным условиям численных картин течения. При решении обратной задачи методом подбора находятся энергетические характеристики разрядов в потоке: значения поглощенной газом энергии  $W_{\text{разр}}$  (и коэффициента  $K$ ).

Исследовались экспериментально в газодинамическом потоке два сильноточных наносекундных разряда: 1) распределенный поверхностный разряд, скользящий по поверхности диэлектрика (плазменный лист) размером  $30 \times 100 \times 0.5$  мм [1, 2]; 2) объемный разряд с предыонизацией ультрафиолетовым излучением от плазменных листов в прямоугольном канале размером  $48 \times 100 \times 24$  мм [3]. Для численного моделирования течения с импульсным энергоподводом использовалась схе-

ма Годунова повышенного порядка точности.

На рис. 1 изображено газодинамическое течение, образовавшееся после взаимодействия плоской ударной волны в канале с течением, возникшим после инициирования плазменного листа на стенке канала поперек потока.

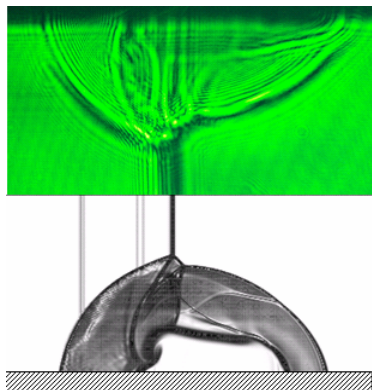


Рис. 1

К моменту разряда ударная волна  $M = 2.1$  двигалась по области разрядного промежутка в течение 8 мкс. Разряд локализовался только перед ударной волной – в зоне низкой плотности (эффект самолокализации [1–3]). Для данных условий совпадение расчета (снизу) с экспериментом (сверху) достигается для  $K = 30 \pm 5\%$ . Метод позволяет исследовать зависимости характеристик импульсных разрядов в нестационарных течениях с ударными волнами от параметров газа, конфигурации потока. На рис. 2 представлена зависимость энерговклада на единицу поверхности в за-

висимости от протяженности зоны разряда  $x$ :  $P = 25$  торр (треугольники) и  $75$  торр (кружки).

Показано, что значение  $K$  для сильноточного наносекундного разряда достигает при некоторых условиях 60%, что указывает на особый механизм быстрого нагрева газа.

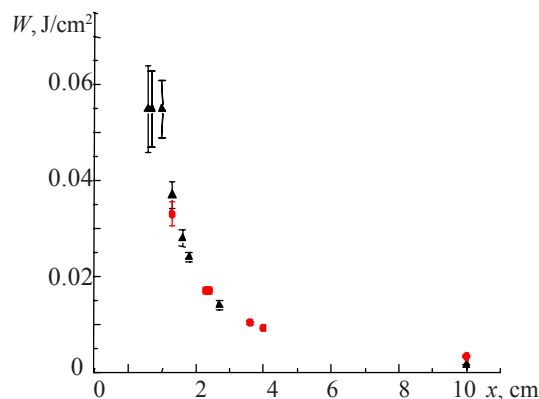


Рис. 2

*Работа выполнена при участии И.Э. Иванова, А.Е. Луцкого, И.В. Мурсенковой, аспирантов МГУ, при поддержке грантами РФФИ.*

#### Список литературы

1. Знаменская И.А., Иванов И.Э., Орлов Д.М., Сысоев Н.Н. // Докл. РАН. 2009. Т. 425, №2. С. 174–177.
2. Ivanov I.E., Kryukov I.A., Orlov D.M., Znamenskaya I.A. // Experiments in Fluids. 2010. V. 48, No 4. P. 607–613.
3. Знаменская И.А., Коротеев Д.А., Луцкий А.Е. // Докл. РАН. 2008. Т. 420, №5. С. 619–622.

## THE INVERSE PROBLEM OF ANALYZING THE CHARACTERISTICS OF PULSE DISCHARGES IN NON-STATIONARY FLOWS WITH SHOCK WAVES

*I.A. Znamenskaya*

The energy characteristics of nanosecond localized discharges (volume and surface) in unsteady supersonic flows are studied on the basis of experimental and numerical analysis of the dynamics of emerging flows.

*Keywords:* shock tube, nanosecond surface discharge, volume discharge, energy input, two-dimensional simulation.