# ХИМИЧЕСКАЯ ФИЗИКА, ФИЗИЧЕСКАЯ КИНЕТИКА И ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

## Динамика давления в сверхзвуковом потоке при инициировании импульсных скользящих поверхностных разрядов

Д. Ф. Латфуллин<sup>а</sup>, И.В. Мурсенкова, Н.Н. Сысоев

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, кафедра молекулярной физики. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2. E-mail: <sup>a</sup> dlatfullin@hotbox.ru Статья поступила 10.12.2008, подписана в печать 21.01.2009.

Экспериментально исследовано сверхзвуковое течение воздуха в ударной трубе (числа Маха потока 1.1–1.6) при инициировании импульсных поверхностных скользящих разрядов наносекундной длительности. Получены теневые изображения поля течения после инициирования разрядов, характеризующие движение ударных волн из разрядной области. Зарегистрированы периодические пульсации давления на стенке канала ударной трубы. Показано, что динамика давления соответствует движению ударных волн из зоны разряда и сверхзвуковому течению возбужденного разрядом газа вблизи стенки канала. Повышение давления на стенке канала ударной трубы при этом составило 6–18% по сравнению с давлением в невозмущенном потоке.

*Ключевые слова*: сверхзвуковой поток, ударная волна, теневой метод, динамика давления, импульсный поверхностный скользящий разряд.

УДК: 533.6:533.9. PACS: 52.80.-s, 52.30.-q, 52.35.Tc.

Решение задач оптимизации обтекания тел сверхзвуковыми и гиперзвуковыми потоками газа возможно путем организации энергоподвода в пристеночное течение с помощью газовых разрядов разного типа [1]. В ряде работ теоретически и экспериментально показано, что таким образом можно менять профиль параметров течения и корректировать локальную структуру пограничного слоя, что связано главным образом с влиянием ионизационных и тепловых процессов, возникающих при развитии газового разряда, на параметры течения вблизи поверхности обтекаемого тела [1, 2]. Актуальность экспериментального исследования влияния поверхностного разряда на сверхзвуковое течение связана с фундаментальным и прикладным аспектом проблемы взаимодействия плазмы с высокоскоростными потоками газа.

В настоящей работе в сверхзвуковом потоке воздуха в области пограничного слоя инициировался скользящий по поверхности раздела твердого и газообразного диэлектриков разряд (плазменный лист) наносекундной длительности, развивающийся в тонком приповерхностном слое газа [3, 4]. Задачей исследования было экспериментальное изучение динамики возмущений из области разряда в сверхзвуковом потоке и динамики давления на стенке канала ударной трубы при инициировании двух плазменных листов на противоположных стенках канала.

Эксперименты проводились на ударной трубе с разрядной секцией (сечение канала камеры низкого давления и разрядной секции  $24 \times 48$  мм), подробно описанной в [3, 4]. Рабочим газом служил воздух. Скользящие поверхностные разряды площадью 30×100 мм<sup>2</sup> инициировались в сверхзвуковом потоке за фронтом идущей по каналу ударной волны на двух стенках разрядной секции на расстоянии 24 мм друг от друга (рис. 1). Две другие стенки представляли собой плоскопараллельные кварцевые стекла. На электроды разрядов подавалось импульсное напряжение 25 кВ. Ток разряда достигал 1000 А, длительность разряда ~200 нс. Высокие значения напряжения и тока обеспечивали эффективное возбуждение колебательных и электронных степеней свободы молекул азота [3]. В каждый плазменный лист вкладывалась энергия ~0.4 Дж.

Эксперименты проводились при числах Маха потока 1.1–1.6 (числах Маха проходящей ударной волны 2.4–4.2), плотности 0.06–0.20 кг/м<sup>3</sup>. Длительность однородного течения за фронтом ударной волны при указанных числах Маха 200–600 мкс, характерная длина —



Рис. 1. Схема течения в канале ударной трубы после инициирования разрядов: 1 — фронт проходящей ударной волны; 2 — область однородного сверхзвукового течения за фронтом ударной волны; 3 — расположение области инициирования разрядов; 4 — ударные волны, движущиеся из области разрядов; 5 — области течения возбужденного разрядами газа; 6 — пьезоэлектрический датчик давления

около 30 см. Энерговклад в приповерхностный слой газа был сравним с энтальпией газа за ударной волной и достигал 70–110% этой величины. Инициирование разрядов в сверхзвуковом потоке создавало протяженные приповерхностные плазменные области, которые перемещались со скоростью потока. По оценкам, длительность течения распадающейся плазмы поверхностных разрядов составляла в экспериментах 100 ÷ 200 мкс.

С точки зрения характерных газодинамических времен (~100 мкс) энерговложение в пристеночный слой газа при инициировании плазменных листов происходит мгновенно (200 нс). Вследствие быстрого ввода энергии в малый объем газа возникают ударные волны, визуализация которых проводилась теневым методом. В качестве источника света использовался Ultra CFR «Big Sky Laser» (длина волны 532 нм, длительность импульса излучения 6 нс). Схема синхронизации процессов позволяла регистрировать ударные волны от плазменных листов в различные моменты времени после инициирования разрядов.

Возмущения из разрядной области через 150 ÷ 300 мкс после инициирования разрядов достигали пьезоэлектрического датчика давления с диаметром рабочей части 1 мм, погрешностью измерения не более 8%, аналогичного описанному в [4]. Калиброванный пьезодатчик располагался на расстоянии 16.5 см от края разрядной области вниз по потоку. Сигнал датчика регистрировался цифровым осциллографом Tektronix TPS 2014 в течение всего времени взаимодействия сверхзвукового потока с областью неравновесно возбужденного разрядом газа.

Полученные в экспериментах серии теневых изображений поля течения показали динамику идущих от двух плазменных листов навстречу друг другу ударных волн с числом Маха 1.1–1.3 (рис. 1). Фронты этих волн формируются в течение 3-5 мкс в результате интерференции ударных волн от отдельных каналов разряда [3]. В сверхзвуковом потоке за плоской ударной волной фронты образовавшихся ударных волн движутся со скоростью 500–850 м/с; на поперечное движение в канале ударной трубы накладывается движение в направлении потока (рис. 2). Период поперечного движения инициированных разрядами ударных волн зависит от их интенсивности и параметров потока, в проведенных экспериментах он составлял 25–35 мкс.

Полученные экспериментально осциллограммы давления показывают динамику давления на стенке канала ударной трубы в точке расположения пьезодатчика давления. При инициировании разрядов в разрядной камере с течением времени к датчику приходит сначала проходящая ударная волна, затем ударные волны, вызванные энерговкладом в пристеночные слои течения, и затем область возбужденного разрядом газа (рис. 1).

На рис. 3 показана осциллограмма давления, соответствующая числу Маха потока 1.16 (число Маха проходящей ударной волны 2.4). Первый резкий подъем на осциллограмме соответствует регистрации пьезодатчиком фронта проходящей ударной волны; далее ход давления определяется стационарным давлением в потоке и возмущениями, пришедшими из области разряда. Во всех экспериментах регистрировались периодические низкочастотные пульсации давления. Сравнение полученных осциллограмм с осциллограммами давления в потоке без инициирования разрядов показало, что интенсивные периодические колебания давления на стенке канала (пики 2–6 на рис. 3) и незначительное увеличение стационарного среднего уровня давления связаны с приходом



Рис. 2. Теневые изображения поля течения после инициирования скользящих поверхностных разрядов: а — 7.6 мкс, неподвижный воздух (плотность 0.14 кг/м<sup>3</sup>); б — 7.6 мкс, сверхзвуковой поток (число Маха потока 1.2, плотность 0.14 кг/м<sup>3</sup>); в — 10.8 мкс, сверхзвуковой поток (число Маха потока 1.2, плотность 0.14 кг/м<sup>3</sup>). На изображениях б, в поток направлен слева направо. Стрелками показано движение ударных волн из разрядной области. Край разрядной области обозначен треугольным маркером



Рис. 3. Осциллограммы давления за фронтом ударной волны с числом Маха 2.4 (число Маха потока 1.16): 1 — при инициировании разрядов; 2 — без инициирования разрядов; 3 — область, соответствующая течению возбужденного разрядом газа. Стрелками указаны характерные пики давления 2-6. Давление отнесено к стационарному значению давления в потоке P<sub>1</sub>

возмущенной разрядом области потока. Период изменения давления на стенке канала зависит от параметров потока и составляет в проведенных экспериментах порядка 25-45 мкс. Период низкочастотных пульсаций соответствует периоду поперечного движения ударных волн из зоны разряда и увеличивается с течением времени вследствие их затухания. Собственные колебания (дребезг) датчика определяют высокочастотные пульсации на осциллограммах.

Непосредственно возбужденный разрядом слой газа движется вблизи стенки канала со скоростью течения и достигает пьезодатчика позднее инициируемых разрядами ударных волн (пики 2-6 на рис. 3). В потоке с числом Maxa 1.16 эта область приходит к датчику давления через 290 мкс после инициирования разряда, и ее течение длится около 180 мкс. За это время происходит рекомбинация заряженных частиц в плазме, но сохраняется высокая степень возбуждения внутренних степеней свободы молекул вследствие значительного времени колебательной релаксации в потоке. Течение области возбужденного газа обусловливает незначительное повышение давления. Анализ и обработка полученных осциллограмм показали, что среднее значение давления на стенке канала в сверхзвуковом потоке при инициировании импульсных скользящих поверхностных разрядов выше невозмущенного значения приблизительно на 6–18%. Повышение давления в потоке связано с одновременным влиянием области возбужденного течения и движущимися из области разряда ударными волнами.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 08-08-90003-Бел\_а).

## Список литературы

- 1. Bletzinger P., Ganguly B.N., Van Wie D.M., Garscadden A. // J. Phys. D. Appl. Phys. 2005. **38**. P. R33.
- 2. Ларин О.Б., Левин В.А. // ПМТФ. 2001. 42. № 1. С. 147.
- 3. Знаменская И.А., Латфуллин Д.Ф., Луцкий А.Е. и др. // ЖТФ. 2007. 77, № 5. С. 10.
- 4. Знаменская И.А., Латфуллин Д. Ф., Мурсенкова И.В., Сысоев Н.Н. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2006. № 1. С. 57.

## Pressure dynamics in a supersonic flow with the initiation of the pulse surface sliding discharges

## D. F. Latfullin<sup>a</sup>, I. V. Mursenkova, N. N. Sysoev

Department of Molecular Physics, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia. E-mail: <sup>a</sup> dlatfullin@hotbox.ru.

The supersonic air flow at Mach numbers of 1.1-1.6 in shock tube is experimentally investigated when the pulse surface sliding discharges of nanosecond duration are initiated. The dynamics of shock waves propagating from the discharge area is studied using shadow method. Periodic pressure pulsations on the shock tube channel wall are registered. It is shown, that pressure dynamics corresponds to movement of shock waves from the discharge area and to supersonic flow of gas-discharge excited air near to a channel wall. The pressure increase on a wall of the shock tube channel was 6-18% by contrast with the pressure in a non-disturbed flow.

*Keywords*: supersonic gas flow, shock wave, shadow method, pressure dynamics, pulse surface sliding discharge. PACS: 52.80.-s, 52.30.-q, 52.35.Tc. *Received 10 Dezember 2008.* 

English version: Moscow University Physics Bulletin 3(2009).

### Сведения об авторах

- 1. Латфуллин Денис Фатбирович аспирант; тел.: 939-44-28, e-mail: dlatfullin@hotbox.ru.
- 2. Мурсенкова Ирина Владимировна к. ф.-м. н., доцент; тел.: 939-44-28, e-mail: murs\_i@molphys.phys.msu.ru.
- 3. Сысоев Николай Николаевич д. ф.-м.н., профессор, зав. кафедрой; тел.: 939-10-91, e-mail: sysoev@phys.msu.ru.