

УДК 533.6:533.9

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАСПАДАЮЩЕЙСЯ ПЛАЗМЫ ИМПУЛЬСНОГО ОБЪЕМНОГО РАЗРЯДА С УДАРНЫМ СЛОЕМ

И. А. Знаменская, Д. Ф. Латфуллин, И. В. Мурсенкова, Н. Н. Сысоев

(кафедра молекулярной физики)

E-mail: znamen@phys.msu.ru

С помощью однородного импульсного объемного разряда наносекундной длительности экспериментально исследовано сверхзвуковое течение воздуха в ударной трубе после энерговклада в поток. Приведены результаты экспериментов по сверхзвуковому обтеканию затупленной модели распадающейся плазмой импульсного объемного разряда. Проведено сравнение экспериментальных значений с результатами численного расчета в рамках модели теплового энерговклада.

Попытки найти эффективный способ улучшения обтекания и аэродинамических характеристик сверхзвуковых и гиперзвуковых летательных аппаратов стимулировали за последние несколько лет большое количество как экспериментальных, так и теоретических исследований в области подвода энергии в поток с помощью инжекции плазмы, лазерного и микроволнового излучения и др. [1–6]. Анализировались воздействие энергоподвода на параметры течения, влияние ионизации и тепловых процессов на изменения, вносимые в поток при различных способах энергоподвода. При этом отмечалось [6], что создаваемая в экспериментах плазменная область имеет, как правило, весьма неоднородное распределение параметров в пространстве и во времени, что затрудняет интерпретацию результатов. Актуальность экспериментального исследования однородного энерговложения в сверхзвуковой поток связана с фундаментальным и прикладным аспектом интереса к проблеме воздействия плазмы на поток.

Использование импульсного объемного разряда с предыонизацией ультрафиолетовым излучением позволяет экспериментально моделировать ряд задач газовой динамики с пространственно однородным энерговкладом в сверхзвуковое течение газа [2, 7].

В настоящей работе экспериментально исследовалось влияние энергоподвода в сверхзвуковой поток на обтекание тел, при этом энерговклад в поток воздуха в ударной трубе производился с помощью импульсного объемного разряда наносекундной длительности. Приведены результаты экспериментов по сверхзвуковому обтеканию модели со сферическим затуплением плазмой разряда и проведено сравнение экспериментальных значений с результатами численного расчета.

1. Экспериментальная установка и постановка задачи

Эксперименты проводились на ударной трубе с газоразрядной камерой, внутренняя поверхность которой являлась продолжением канала ударной трубы (рис. 1). Рабочим газом служил воздух. Две боковые стенки камеры были выполнены из кварцевого стекла для оптической диагностики течения.

В качестве источника энергоподвода в поток использовался импульсный объемный разряд с предыонизацией ультрафиолетовым излучением от плазменных листов [8, 9]. Разряд происходил в объеме разрядной камеры протяженностью 100 мм сечением 36×24 мм. Приложенное к разрядному промежутку



Рис. 1. Схема экспериментальной установки

шириной 24 мм напряжение $U = 30\text{--}40$ кВ обеспечивало в объеме величину приведенного электрического поля $E/N = 200\text{--}600$ Тд [2]. Высокая однородность области разряда и быстрое нарастание тока (до 50 нс) обеспечивались за счет предыонизации объема ультрафиолетовым излучением от плазменных листов, инициировавшихся на верхней и нижней поверхностях разрядной камеры [9]. Эти плазменные листы, образованные скользящими поверхностными разрядами, служили электродами объемного разряда. Длительность протекания тока объемного разряда составляла около 200 нс.

Сверхзвуковое обтекание модели (затупленного цилиндра) плазмой импульсного объемного разряда моделировалось инициированием разряда в спутном потоке за плоской ударной волной. Разряд инициировался в сверхзвуковом спутном потоке за плоской ударной волной спустя 30–60 мкс после прихода ударной волны к модели, когда устанавливалось стационарное сверхзвуковое обтекание модели с головной ударной волной. Энергоподвод осуществлялся на расстоянии 48 мм от модели выше по потоку (рис. 2). Длительность обтекания модели распадающейся плазмой объемного разряда зависела от скорости потока и составляла в экспериментах 180–300 мкс.

Инициирование объемного разряда в сверхзвуковом спутном потоке создавало в определенный момент времени протяженную однородную область неравновесно возбужденного газа, которая после окончания импульсного разряда (через $t = t_p$) сносилась потоком к модели. Возмущение, возникшее при импульсном вводе энергии на ближней к модели границе разрядного объема, через 20–30 мкс после инициирования разряда достигало головной ударной волны и взаимодействовало с ней, ударным слоем и поверхностью модели. Затем происходило взаимодействие области распадающейся газоразрядной плазмы с головной ударной волной, ударным слоем и с поверхностью модели.

Для визуализации течения в разрядной камере применялись теневая и шлирен-методики [10]. Полученные на фотопленке изображения оцифровывались с помощью слайд-сканера, измерение координат ударных волн выполнялось с точностью до 0.02 мм. В течение всего времени взаимодействия

сверхзвукового потока с моделью регистрировалось давление в точке торможения модели пьезоэлектрическим датчиком с диаметром рабочей части 2 мм, погрешность измерения не превышала 8%.

2. Исследование возмущений, вносимых в газодинамическое течение воздуха импульсным разрядом

При инициировании скользящих поверхностных разрядов вследствие быстрого введения энергии в тонкий приэлектродный слой газа возникают возмущения среды в поперечном потоку направлении. Для оценки влияния этих возмущений на течение по теневым изображениям разрядного промежутка в различные моменты времени после инициирования скользящих разрядов был проведен анализ их динамики. Обработка изображений показала, что от двух плазменных электродов движутся слабые ударные волны с квазиплоскими фронтами, затухающие в течение 20–25 мкс [9]. В неподвижном воздухе при давлении 100 торр и напряжении $U = 30$ кВ эти возмущения характеризовались числами Маха $M_s \approx 1.4$ и отчетливо визуализировались теневым методом; в сверхзвуковом спутном потоке за плоской ударной волной возмущения от разряда не визуализировались.

Для оценки интенсивности возмущений от плазменных листов в сверхзвуковом спутном потоке и их влияния на течение были проведены расчеты изменения плотности на фронте возмущений при предположении, что энерговыделен в скользящий разряд дает одинаковое тепловыделение в приэлектродном слое как в неподвижном воздухе, так и в потоке за ударной волной. Числу Маха $M_s \approx 1.4$ соответствует перепад температуры на фронте $\Delta T = 75$ К, это значение использовалось для расчета перепада плотности на фронте возмущения в потоке.

Расчеты изменения плотности на фронте возмущения в потоке показали, что ударные волны от плазменных листов в потоке при используемой настройке теневой схемы возможно визуализировать в ограниченном диапазоне плотностей и скоростей спутного потока. Отсутствие визуализации возмущений в спутном потоке в диапазоне рабочих условий позволило оценить предел их интенсивности как $M_s < 1.16$. Таким образом, в проведенных экспери-

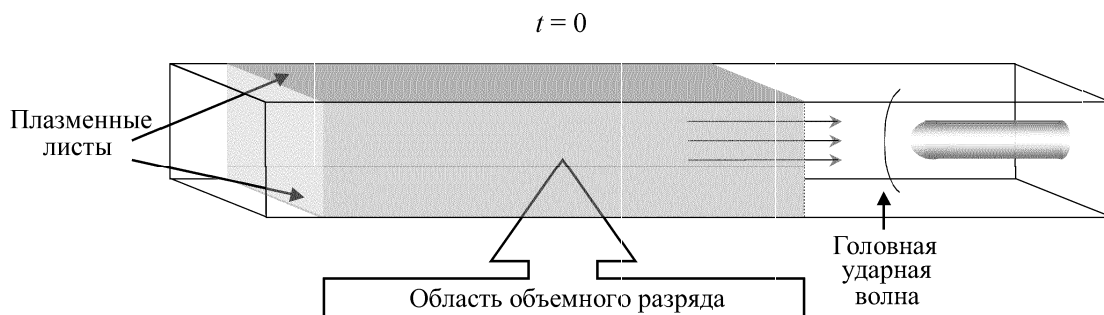


Рис. 2

ментах ударные волны от плазменных электродов в сверхзвуковом потоке были достаточно слабы и не оказывали существенного влияния на поток. Возмущения, возникающие при инициировании в потоке импульсного объемного разряда, имели еще меньшую интенсивность вследствие меньшей плотности энерговклада в объем.

3. Анализ результатов

В экспериментах исследовалось обтекание сверхзвуковым потоком распадающейся газоразрядной плазмы цилиндра диаметром 9 мм со сферическим затуплением (рис. 3, а). Исследования проведены при числах Маха набегающего потока 1.34–1.75, плотности воздуха в потоке 0.07–0.22 кг/м³. Удельный энерговклад w в невозмущенный поток с энтальпией h составлял до $w/h = 0.15$. В соответствии со структурой возмущенной области и динамикой ее взаимодействия с моделью в сверхзвуковом потоке в экспериментах наблюдались изменения формы фронта головной ударной волны перед моделью и величины ее отхода, а также изменения давления в точке торможения модели.

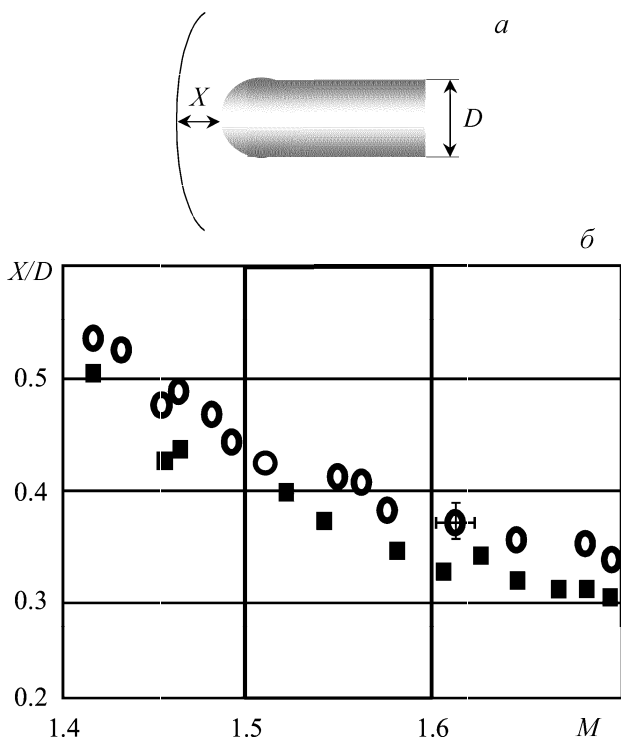


Рис. 3

Кривизна фронта головной ударной волны в возбужденном разрядом потоке была меньше, а величина отхода от модели больше, чем в потоке без возбуждения разрядом. На рис. 4 показано теневое изображение головной ударной волны около модели на стадии квазистационарного обтекания потоком распадающейся газоразрядной плазмы (энерговклад $w/h = 0.11$; число Маха потока 1.52, плотность 0.11 кг/м³). Для сравнения пунктиром показан

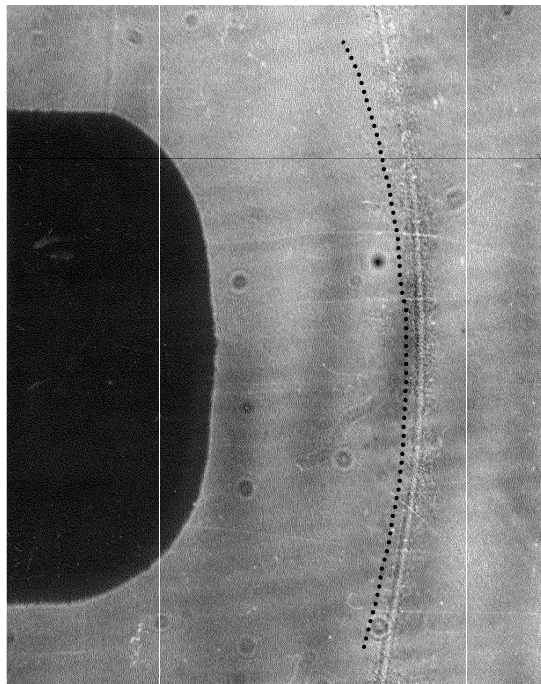


Рис. 4

фронт головной ударной волны при тех же условиях обтекания без инициирования разряда.

Обработка изображений показала, что структура фронта головной ударной волны и ударного слоя практически не изменяются при воздействии возбужденной разрядом области потока. На стадии квазистационарного обтекания модели возбужденным разрядом воздухом максимальное увеличение отхода головной ударной волны вдоль нулевой линии тока достигало 20% от величины, соответствующей невозбужденному течению. На рис. 3, б показаны экспериментальные значения приведенного отхода головной ударной волны X/D в зависимости от числа Маха потока для невозмущенного газа (1) и значения отхода на стадии квазистационарного обтекания потоком распадающейся газоразрядной плазмы (2) при энерговкладе в поток $w/h = 0.11$ (плотность в потоке 0.11 кг/м³). При этих условиях максимальное увеличение отхода головной ударной волны составило 15% (при наименьшем значении числа Маха спутного потока).

Измерения давления в точке торможения модели при воздействии объемного импульсного разряда на спутный поток показали, что на начальной стадии взаимодействия, спустя 20–30 мкс после инициирования разряда, возникают значительные изменения давления в точке торможения, вызванные действием возмущения из зоны разряда на головную ударную волну и ударный слой. При квазистационарном обтекании модели потоком распадающейся плазмы обнаружено систематическое снижение давления в точке торможения, зависящее от энерговклада в объем и скорости спутного потока. При увеличении энерговклада квазистационарное снижение давления увеличивалось. Типичная осциллограмма дав-

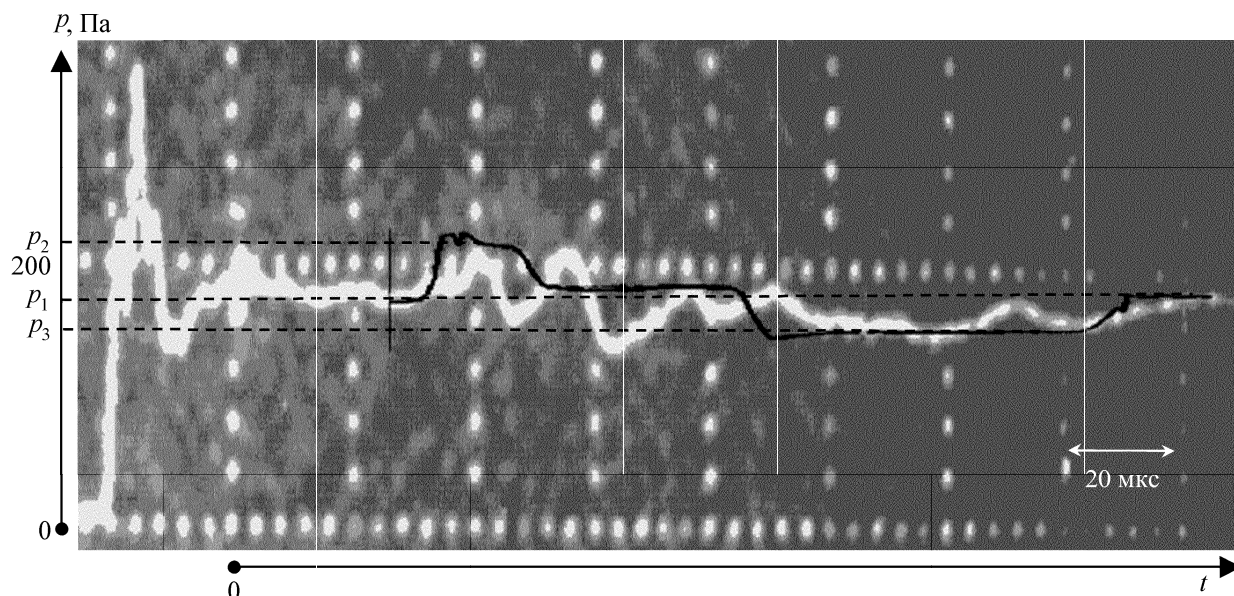


Рис. 5

ления, полученная в экспериментах с возбуждением области потока импульсным разрядом, показана на рис. 5 ($t = 0$ — момент инициирования импульсного разряда). Осциллограмма получена при числе Маха потока 1.61, плотности потока 0.11 кг/м^3 . Черной сплошной линией показан результат численного расчета [7].

Для анализа процесса взаимодействия распадающейся плазмы импульсного объемного разряда с областью ударного слоя было проведено сравнение с результатами численных расчетов [7], выполненных при сходных условиях энерговложения в сверхзвуковое течение воздуха. Расчеты нестационарного обтекания модели потоком, возмущенным объемным энерговложением, основывались на системе уравнений Эйлера. Ввод энергии в невозмущенный поток моделировался в соответствии с реальной картиной процесса. Рассматривался режим обтекания с числом Маха 1.61, удельный энерговклад в поток составлял $w/h = 0.11$. Для исследования влияния на течение возмущений, распространяющихся из зоны электродов, были проведены расчеты с учетом и без учета энерговклада в области вблизи электродов.

Согласно расчетам [7], с течением времени первоначально однородная область разряда расслаивается, на границах области энерговложения происходят распады разрыва между невозмущенным потоком и течением с повышенным давлением в зоне энерговклада. До некоторого момента времени поток перед головной ударной волной модели состоит из достаточно протяженных зон постоянного течения, разделенных ударными волнами, контактными разрывами и волнами разрежения, которые с различными скоростями движутся вниз по потоку в сторону модели и взаимодействуют с ней. На рис. 5 показана расчетная зависимость давления торможения в носовой точке модели от времени с учетом энерговклада в область электродов. Из расчета следует,

что при воздействии некоторых зон сверхзвукового течения, образовавшегося после импульсного ввода энергии в объем, успевает сформироваться квазистационарный режим обтекания модели с постоянным значением давления торможения. Значение p_1 соответствует давлению торможения в невозмущенном потоке, значение p_2 — воздействию зоны повышенного давления за ударной волной, движущейся от ближайшей границы области энерговклада, значение p_3 — воздействию зоны пониженного давления, сформировавшейся в результате взаимодействия волн разрежения в зоне энерговклада. Сопоставление экспериментальных осциллограмм давления в точке торможения и численных расчетов давления показало их качественное соответствие (рис. 5). Расчет динамики отхода головной ударной волны при обтекании модели потоком с объемным энерговложением также показал качественное соответствие с экспериментами. Проведенные расчеты (как и экспериментальные оценки) показали незначительность влияния вложения энергии вблизи электродов на режим обтекания модели.

Заключение

Импульсный объемный разряд с предыонизацией в ударной трубе позволяет исследовать набегание достаточно однородной зоны распадающейся плазмы импульсного разряда на затупленную модель с головной ударной волной (числа Маха потока 1.3–1.7). Удельный энерговклад в невозмущенный поток с энтальпией h составлял до $w/h = 0.15$. Расчет в рамках модели теплового энерговклада дает результаты, качественно соответствующие экспериментально зарегистрированным изменениям в потоке (увеличению отхода ударной волны, динамике давления в точке торможения). Трехмерный характер развивающегося в газодинамическом канале

течения и кинетика неравновесных процессов в газоразрядной плазме предполагают сложный и относительно длительный процесс преобразования всей энергии разряда в тепло. Этот вопрос должен стать предметом дальнейших исследований.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке программы РАН «Взаимодействие плазмы с высокоскоростными потоками газа» и РФФИ (грант 05-08-50247).

Литература

1. Chernyi G.G. // AAIA Proc. 2nd Weakly Ionized Gases Workshop. Norfolk, USA, November 1-5, 1998. P. 1.
2. Андреев С.И., Знаменская И.А., Степанец И.В. // Хим. физика. 1993. **12**. С. 392.
3. Пилюгин Н., Талипов Р., Хлебников В. // Теплофизика высоких температур. 1997. **35**, № 2. С. 322.
4. Третьяков П.К., Яковлев В.И. // Докл. РАН. 1999. **365**, N 1. С. 58.
5. Георгиевский П.Ю., Левин В.А. // Изв. РАН. Сер. Механика жидкости, газа и плазмы. 2003. № 5. С. 152.
6. Bletzinger P., Ganguly B.N., Van Wie D., Garscadden A. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2005. **38**. P. R33.
7. Znamenskaya I.A. Mursenkova I.V., Lutsky A.E. // Proc. of 3rd Workshop on Magneto-Plasma-Aerodynamics in Aerospace Applications. Moscow, April 24-26, 2001. P. 17.
8. Карлов Н.В., Кузьмин Г.П., Прохоров А.М. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1984. **48**, № 7. С. 1430.
9. Знаменская И.А., Латфуллин Д.Ф., Мурсенкова И.В. // Матер. Всеросс. науч. конф. по физике низкотемпературной плазмы (ФНТП-2004). Петрозаводск, 28 июня – 4 июля 2004. С. 172.
10. Селиванов В.В., Соловьев В.С., Сысоев Н.Н. Ударные и детонационные волны. Методы исследования. М., 1990.

Поступила в редакцию
27.06.05