

03;04

Тепловые измерения на поверхности тела, обтекаемого сверхзвуковым потоком азота

© В.А. Сахаров, Н.П. Менде, С.В. Бобашев, С.З. Сапожников,
В.Ю. Митяков, А.В. Митяков

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург
E-mail: v.sakharov@mail.ioffe.ru
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Поступило в Редакцию 14 марта 2006 г.

Проведены измерения теплового потока к поверхности тела вращения, обтекаемого сверхзвуковым потоком азота с числом Маха 4. Внутри тела смонтировано электромагнитное устройство, с помощью которого генерируется газоразрядная плазма между электродами на поверхности тела. Плазма вращается вокруг оси тела вблизи его поверхности, оказывая существенное влияние на сверхзвуковое обтекание. Установлено, что при работе электромагнитного устройства тепловой поток к поверхности тела возрастает и зависит от направления тока в плазме. Тепловой поток измерялся обладающими большим быстродействием градиентными датчиками на основе анизотропного кристалла висмута.

PACS: 47.27.T-, 52.30.Cv

Эксперименты проводились на экспериментальном комплексе [1,2], созданном на базе Большой ударной трубы ФТИ. В торце канала низкого давления располагалась рабочая секция прямоугольного сечения со сверхзвуковым соплом. Параметры сверхзвукового потока азота в выходном сечении сопла: давление — 5 кПа, плотность — 0.04 kg/m^3 , температура — 440 К, скорость — 1600 м/с, число Маха — 4. Длительность стационарного истечения азота составляла $\sim 1.5 \text{ ms}$.

Тело вращения с исследуемым устройством, подробное описание которого дано в [3], располагается внутри рабочей секции за выходным сечением сопла. Оно имеет форму цилиндра диаметром 26 мм и длиной 40 мм, сопряженного с конусом с углом при вершине 60° . Внешний вид тела и тепловые датчики на его поверхности показаны на рис. 1. На

конической поверхности заподлицо с ней расположены два электрода. Центральный электрод 1 диаметром 6 мм расположен по оси тела и образует вершину конуса. Второй электрод расположен на конусе в месте его сопряжения с цилиндром и имеет форму конического кольца 2.

Электромагнитное устройство обеспечивает генерацию газоразрядной плазмы между двумя электродами и ее вращение вокруг тела с частотой в несколько десятков кГц в течение ~ 1.5 мс за счет энергии внешнего источника напряжения. В экспериментах обнаружена существенная зависимость частоты вращения плазмы от полярности подключения внешнего источника. Для варианта, когда кольцевой электрод подключен к отрицательному полюсу источника напряжения (кольцевой электрод служит катодом), среднее значение частоты вращения составило 30 кГц, а в случае обратного подключения (кольцевой электрод служит анодом) — 15 кГц. Эксперименты [3] демонстрируют эффективное воздействие плазмы на обтекание тела вращения сверхзвуковым потоком азота при числе Маха 4.

Целью настоящего исследования является измерение теплового потока на поверхности тела вращения для двух вариантов подключения источника напряжения. В качестве теплового датчика использовался градиентный датчик теплового потока (ГДТП), изготовленный на основе анизотропного монокристалла висмута [4]. ГДТП обладает достаточным быстродействием, что позволяет использовать его в экспериментах на ударной трубе [5].

Измерения проводились датчиком D2, имеющим размеры в плане 4×7 мм и расположенным на цилиндрической части тела вращения в 15 мм от кольцевого электрода, большей стороной параллельно образующей цилиндра (см. рис. 1). Чувствительность датчика составляла 5.3 мВ/Вт.

В первой серии опытов измерения теплового потока проводились в атмосфере неподвижного воздуха при давлении ~ 50 кПа при двух различных вариантах подключения внешнего источника напряжения. Напряжение источника составляло величину 500 В, а ток в плазме достигал 700 А. Результаты этих измерений показаны на рис. 2. Из графика видно, что для варианта подключения, когда кольцевой электрод играет роль катода (кривая 1), установившееся значение теплового потока почти на порядок больше, чем при противоположном подключении источника. Квазистационарное значение теплового потока

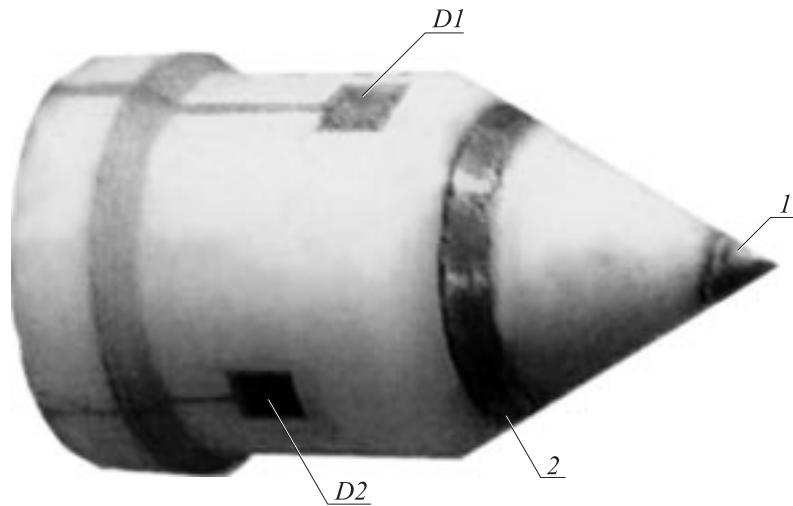


Рис. 1. Внешний вид модели с электромагнитным устройством и тепловыми датчиками на поверхности.

в первом случае достигается за время $\sim 300 \mu\text{s}$ от начала запуска электромагнитного устройства.

Во второй серии опытов при обтекании тела вращения сверхзвуковым ($M = 4$) потоком азота для обоих вариантов подключения электродов величина тока в плазме не изменялась и оставалась той же, что и в опытах без обтекания.

Полученные для этого случая кривые изменения теплового потока к поверхности тела при двух вариантах подключения источника напряжения показаны на рис. 3. Из сравнения графиков на рис. 2 и 3 видно, что абсолютное значение и величина пульсаций теплового потока при сверхзвуковом обтекании (рис. 3) значительно больше, чем в покоящемся газе (рис. 2). Наблюдаемое увеличение теплового потока во второй серии опытов можно объяснить сносом и поджатием газоразрядной плазмы к поверхности тела сверхзвуковым потоком.

Однако, как и в опытах без обтекания, средняя величина теплового потока для варианта подключения, когда кольцевой электрод служит катодом (кривая 1 на рис. 3) заметно больше, чем для варианта

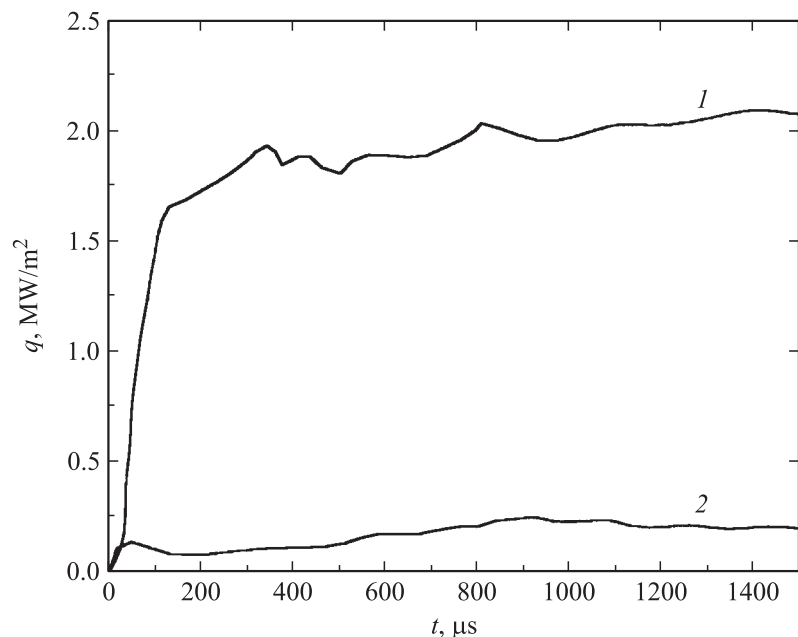


Рис. 2. Изменение теплового потока во времени на цилиндрической поверхности модели в неподвижном воздухе для различных вариантов подключения источника напряжения, когда кольцевой электрод служит: 1 — катодом, 2 — анодом.

противоположного подключения (кривая 2 на рис. 3). Возможно, это объясняется неравномерностью распределения потенциала в линейном газовом разряде, поскольку известно, что градиент потенциала в области катода больше, чем у анода, следовательно, и выделение тепла при разряде также будет больше в области катода.

Заметим также, что для варианта подключения, когда кольцевой электрод служит анодом (кривая 2 на рис. 3), частота пульсации $\sim 15 \text{ kHz}$ соответствует частоте вращения плазмы, измеренной с помощью фоторегистратора [3]. Для варианта подключения, когда кольцевой электрод служит катодом, частота вращения плазмы вдвое больше. В этом случае вид сигнала ГДП не позволяет выделить

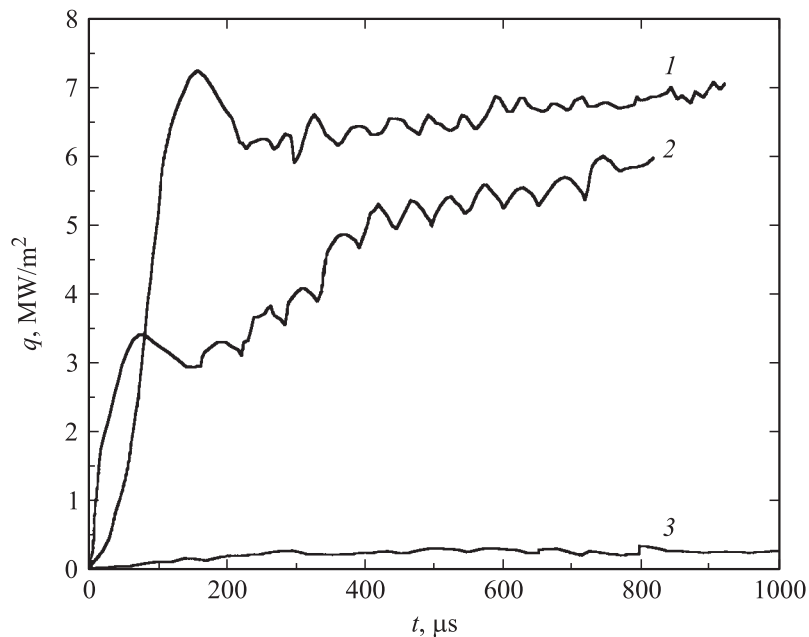


Рис. 3. Изменение теплового потока во времени на поверхности модели, обтекаемой сверхзвуковым потоком азота, для различных вариантов подключения источника напряжения, когда кольцевой электрод служит: 1 — катодом, 2 — анодом. 3 — тепловой поток при выключенном МГД-устройстве.

характерную частоту пульсаций (кривая 1 на рис. 3). Однако спустя $\sim 300 \mu\text{s}$ от начала процесса средняя величина теплового потока остается практически неизменной во времени, а амплитуда пульсаций мала по отношению к среднему уровню сигнала ГДТП.

Поскольку в экспериментах энергия, затраченная на возбуждение газоразрядной плазмы, соизмерима с кинетической энергией сверхзвукового потока, то при работе электромагнитного устройства тепловой поток к поверхности тела оказывается больше, чем в случае, когда устройство не работает. Для сравнения на рисунке показана величина теплового потока при неработающем электромагнитном устройстве (кривая 3).

Измерения показали, что с помощью исследуемого устройства можно добиться режима обтекания тела газоразрядной плазмой с распределением теплового потока на поверхности, близким к стационарному режиму. Это позволяет использовать предложенное устройство для моделирования сверхзвукового обтекания тел высокотемпературным газовым потоком и изучать результаты МГД-воздействия на общую картину течения около тела и тепловой поток к его поверхности. Такой подход к моделированию на ударной трубе тепловых процессов в газах представляется весьма перспективным, поскольку получение высоких параметров сверхзвукового потока за счет нагрева рабочего газа ударной волной представляет значительные трудности.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 04-02-16944, 05-02-16071, 05-02-08128 и 05-08-33486), EOARD (проект МНТЦ № 2009) и Программы президиума РАН № 20.

Список литературы

- [1] *Bobashev S., Mende N., Sakharov V., Van Wie D.* // 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, Nevada, Jan. 5–8, 2004. AIAA-2004-515.
- [2] *Бобашев С.В., Менде Н.П., Сахаров В.А., Ван Ви Д.М.* // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. В. 15. С. 35–40.
- [3] *Сахаров В.А., Менде Н.П., Бобашев С.В., Ван Ви Д.М.* // Письма в ЖТФ. 2006. См. настоящий выпуск. С. 40–45.
- [4] *Сапожников С.З., Митяков В.Ю., Митяков А.В.* // ЖТФ. 2004. Т. 74. В. 7. С. 114–120.
- [5] *Сапожников С.З., Митяков В.Ю., Митяков А.В., Петров Р.Л., Григорьев В.В., Бобашев С.В., Менде Н.П., Сахаров В.А.* // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. В. 2. С. 76–80.