

*В.Ю. Митяков<sup>1</sup>, С.З. Сапожников<sup>1</sup>, А.В. Митяков<sup>1</sup>,  
С.В. Бабашев<sup>2</sup>, Н.П. Менде<sup>2</sup>, В.А. Сахаров<sup>2</sup>*

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Россия (1)

Физико-технический институт им. Иоффе, Россия (2)

## ГРАДИЕНТНАЯ ТЕПЛОМЕТРИЯ В СВЕРХЗВУКОВЫХ ПОТОКАХ ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ПЛАЗМЫ

### АННОТАЦИЯ

Приведена экспериментальная оценка постоянной времени градиентного датчика теплового потока (ГДТП) на основе анизотропного монокристалла висмута. Показана работоспособность датчика в условиях импульсного высокотемпературного потока плазмы ксенона в канале ударной трубы и в сверхзвуковом потоке того же газа в присутствии внешних электронного и магнитных полей.

Измерен тепловой поток к поверхности тела вращения, обтекаемого сверхзвуковым потоком газоразрядной плазмы азота с числом Маха  $M = 4$ .

### 1. ВВЕДЕНИЕ

При гиперзвуковом движении летательного аппарата вблизи его поверхности возникает сложная система ударных волн, интерференция между которыми иногда существенно увеличивает локальную плотность теплового потока с пагубными последствиями, для конструкции. По этой причине проектирование гиперзвуковых аппаратов должно базироваться на численном моделировании их обтекания с учетом теплообмена. Для задания граничных условий и верификации расчетов необходимо экспериментально определить нестационарный тепловой поток на поверхности обтекаемого тела.

Поскольку характерное время процессов в ударных трубах редко превосходит 1-5 мс, постоянная времени датчика не должна превышать 0.05-0.1 мс. При этом, теплостойкость датчика не так существенна: поток газа с температурой, достигающей до 8000 К, за время опыта успевает изменить температуру обтекаемой поверхности не более, чем на 200 К. Поэтому ГДТП на основе анизотропного монокристалла висмута чистоты 0,9999 [1] могут быть использованы в таких опытах несмотря на то, что висмут плавиться при 544К

Действие ГДТП основано на поперечном эффекте Зеебека: выходной сигнал (термо-э.д.с.) линейно связан с тепловым потоком в слое висмута. При этом вектор напряженности электрического поля нормален вектору теплового потока.

К числу, несомненных достоинств ГДТП следует отнести его относительную дешевизну, малые размеры высокую чувствительность (2-50 мВ/Вт). Малое сопротивление (1-10 Ом) обеспечивает помехозащищенность измерительной цепи, что весь-

ма важно при измерениях в импульсных электромагнитных полях.

### 2. ПОСТОЯННАЯ ВРЕМЕНИ ГДТП

Постоянную времени определяют по крутизне переднего фронта электрического сигнала датчика, испытавшего «мгновенную» тепловую нагрузку. В качестве источника такой нагрузки мы использовали рубиновый лазер, работающий в моноимпульсном режиме. При этом поверхность ГДТП подвергалась воздействию мощного ( $\sim 10^6$  Вт) импульса излучения в течение  $\sim 30$  нс. На рис. 1 показана осциллограмма сигнала ГДТП при воздействии такого импульса.

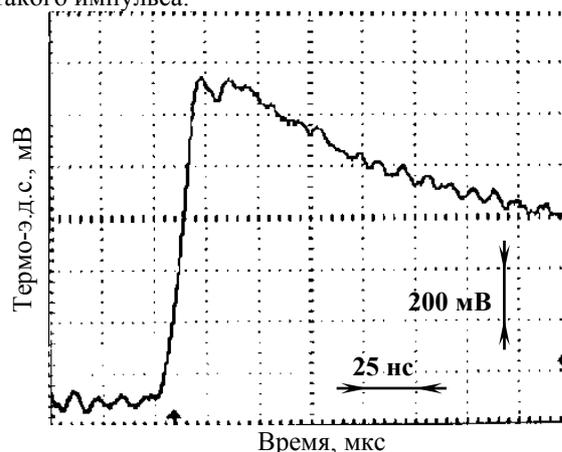


Рис. 1 Осциллограмма сигнала ГДТП при воздействии на него лазерного излучения длительностью  $\sim 30$  нс. (Временная развертка 25 нс/дел.)

На осциллограмме видно, что резкое изменение величины сигнала происходит примерно за 20 нс, после чего наблюдается экспоненциальное снижение его.

Особенностью ГДТП является наличие сигнала после окончания действия светового импульса, что, по-видимому, обусловлено сравнительно медленным процессом «выравнивания» поля температуры в кристалле висмута.

Эффект выравнивания демонстрирует рис. 2, где показаны сигналы ГДТП и фотодиода, регистрирующего излучение лазера. Лазер работал в режиме свободной генерации, излучая пакет импульсов в течении  $\sim 450$  мкс. На осциллограмме видно, что сигнал ГДТП (верхний) откликается на мощ-

ные единичные импульсы излучения и приобретает со временем постоянную составляющую.

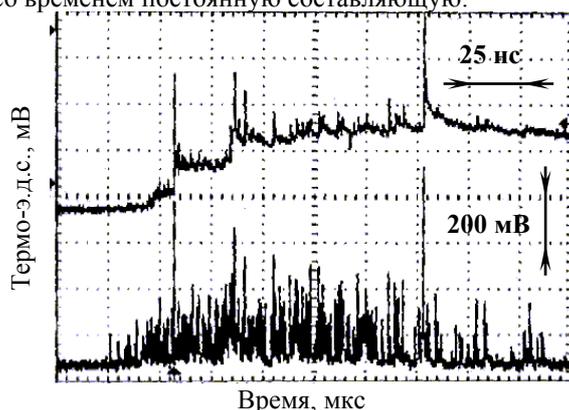


Рис. 2. Осциллограммы сигналов ГДТП (верхний) и фотодиода (нижний). (Временная развертка 50 мкс/дел.)

Измерения показали, что постоянная времени ГДТП не превышает  $3 \cdot 10^{-8}$  с. Результаты измерений совпадают с оценкой этой величины в работе [2].

### 3. ТЕПЛОМЕТРИЯ В СЛАБОИОНИЗИРОВАННОМ СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ

Измерения проводились на экспериментальном стенде, предназначенном для изучения взаимодействия сверхзвуковых потоков слабоионизованного газа с внешним магнитным полем [3]. Была использована рабочая секция прямоугольного сечения, изготовленная из диэлектрика. Секция располагалась в конце канала ударной трубы и была отделена от него тонкой пластиковой диафрагмой для поддержания в отделенном отсеке давление около 1 Па. Внутри секции располагалось клиновидное сопло 1 (рис. 3) шириной 75 мм и высотой критического сечения 9 мм.

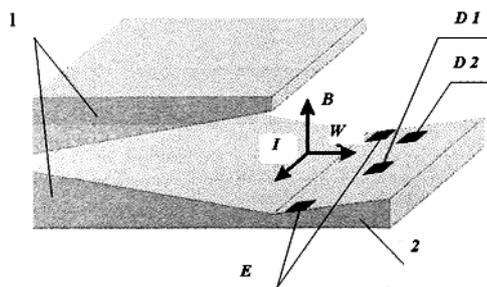


Рис. 3. Эскиз сверхзвукового сопла 1 с отклоняющей пластиной 2, электродами E и ГДТП D1 и D2

К выходной кромке сверхзвукового сопла примыкала плоская пластина 2 так, что сверхзвуковой поток с вектором скорости  $V$  отклонялся ею на угол  $15^\circ$ . Вблизи вершины двугранного угла, образованного пластиной и стенкой сопла, на пластине располагалась пара электродов E размером в плане 6 мм×4 мм, к которым подключался внешний источник напряжения для создания тока I в потоке плазмы. Над и под рабочей секцией расположены две соосные электромагнитные катушки создающие импульсное магнитное поле длительностью 4.5 мс с магнитной индукцией B до 1.5 Т. Два теп-

ловых датчика (D1 и D2) размером 4 мм×7 мм располагались на пластине заподлицо с поверхностью: один в центре, другой - на краю.

На боковых вертикальных стенках секции имеются стеклянные иллюминаторы для оптической диагностики газового потока при помощи теневого прибора, в поле зрения которого находится выходное сечение сопла. Анализ теневых картин позволяет судить об изменениях ударно-волновой структуры течения.

После того, как поток достигает электродов, в плазме возникает ток. Продолжительность процесса определяется длительностью стационарного истечения и составляет примерно 1 мс. В течение этого времени осуществляется магнитогазодинамическое (МГД) взаимодействие, изменяющее картину течения.

В экспериментах регистрировались теневые картины и сигналы датчиков D1 и D2 при различной степени МГД воздействия, т.е. при изменении величины тока и индукции магнитного поля.

Изучение теневых картин позволяет судить о форме ударно-волновой поверхности над пластиной при МГД воздействии (рис.4)

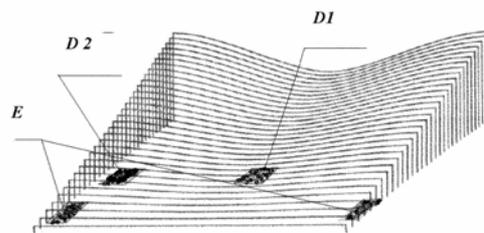


Рис. 4. Вид ударно-волновой поверхности при МГД взаимодействии

Исследования показали, что центральная часть ударно-волновой поверхности, находящаяся над датчиком D1, практически не изменяет наклона к пластине, в то время как периферийные участки изменяются существенно, удаляясь от поверхности пластины с ростом интенсивности МГД воздействия.

Оба ГДТП проходили испытание на помехоустойчивость. С этой целью сравнивались сигналы, записанные либо при включении только внешнего магнитного поля, либо только при прохождении тока (до 500 А) через плазму, либо в отсутствии обоих возмущающих факторов. Во всех опытах МГД воздействия на поток не сказывалось. Влияние помех на показания ГДТП находится в пределах точности измерения и воспроизводимости эксперимента.

Наличие МГД взаимодействия существенно влияет на сигнал датчика D2 и практически не влияет на сигнал D1. На рис. 5 показаны сигналы датчиков теплового потока D2 при различной интенсивности МГД взаимодействия. Эту величину характеризует число Стюарта:

$$S = \frac{B_0^2 l_0 \sigma_c}{\rho w}$$

где  $B_0$  – характерное значение магнитной индукции,  $l_0$  – характерный размер пластины,  $\sigma_e$  – удельная электрическая проводимость,  $\rho$  – плотность жидкости,  $w$  – скорость движения жидкости

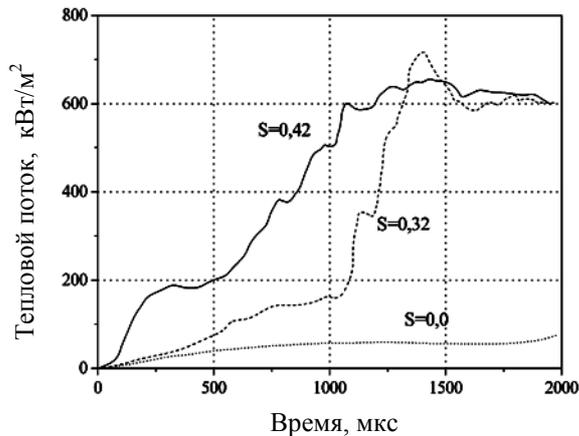


Рис. 5. Тепловой поток на периферии пластины в зависимости от интенсивности МГД воздействия

Из графиков видно, что тепловой поток при МГД взаимодействии, ( $S > 0$ ) значительно больше, чем в случае  $S=0$ , и это отличие увеличивается с ростом значения  $S$ . Датчик отслеживает достаточно быстрые изменения теплового потока и может быть источником количественной информации об исследуемом процессе.

По истечении 500 мкс для кривой, соответствующей  $S=0,42$ , и 1100 мкс для кривой, соответствующей  $S=0,52$ , наблюдается резкий рост теплового потока. Мы связываем это с возникновением отрывного течения в сопле перед пластиной, инициированного МГД взаимодействием (ср. кривую при  $S=0$ ). Напомним, что стационарное истечение продолжается примерно 1 мс, так что дальнейшее описание картины течения носит предположительный характер.

Следующим этапом работ стала теплотрия на поверхности тела вращения (цилиндр-конус), обтекаемого сверхзвуковым потоком газоразрядной плазмы [4]. Тело располагалось за выходным сечением той же рабочей секции (рис 6).



Рис. 6. Вид модели с датчиками теплового потока

Оно имеет форму цилиндра диаметром 26 мм и длиной 40 мм, сопряженного с конусом с углом при вершине  $60^\circ$ . На конической поверхности за-

подлицо с ней распложены два электрода. Центральный электрод диаметром 6 мм расположен вдоль и образует вершину конуса. Второй электрод расположен на конусе в месте его сопряжения с цилиндром и имеет форму конического кольца. МГД устройство обеспечивает генерацию газоразрядной плазмы между двумя электродами и ее вращение вокруг тела с частотой в несколько десятков кГц в течение  $\sim 1,5$  мс. 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-катод), среднее значение частоты вращения составило 30 кГц, а в случае обратного подключения (кольцевой электрод-анод) - 15 кГц.

В ходе исследования измерен тепловой поток на поверхности тела вращения для обоих вариантов подключения источника напряжения.

В качестве датчика использовался ГДП, с чувствительностью 5,3 мВ/Вт размером в плане 4x7мм; он располагался на цилиндрической поверхности тела 20 мм от кольцевого электрода, большей стороной параллельно образующей цилиндра.

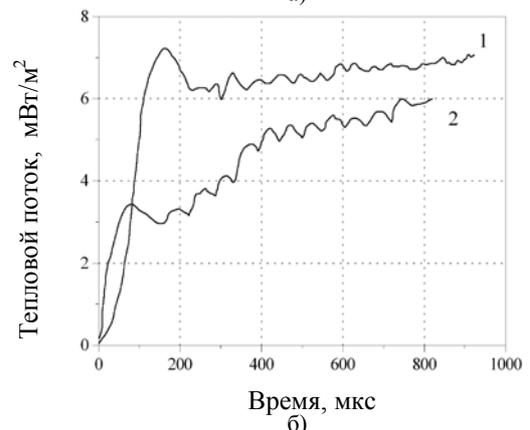
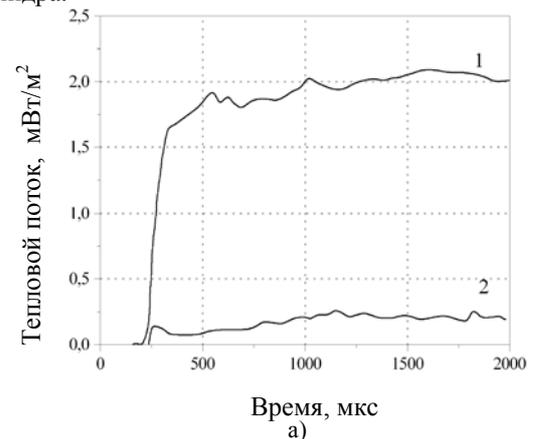


Рис. 7. Тепловой поток на поверхности модели, находящейся в спокойном воздухе (а) и в сверхзвуковом потоке азота (б). Цифрами обозначены: 1 – кольцевой электрод является катодом, 2 – кольцевой электрод является анодом.

В первой серии опытов измерения проводились в атмосфере неподвижного воздуха при давлении

~50 кПа при различных вариантах подключения внешнего источника напряжения. Напряжение источника составляло 500 В, а ток в плазме достигал 700 А. Результаты измерений показаны на рис. 7а.

Видно, что для варианта подключения, когда кольцевой электрод является катодом (кривая 1), установившееся значение теплового потока почти на порядок больше, чем при противоположном подключении источника. Тепловой поток в первом случае стабилизируется за время ~300 мкс от запуска МГД 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 на прежнем уровне. Видно, что абсолютное значение и величина пульсаций теплового потока во второй серии опытов (рис. 7б) значительно больше, чем в первой (рис. 7а). Это можно объяснить сносом и поджатием газоразрядной плазмы к поверхности тела сверхзвуковым потоком.

Как и в опытах без обтекания (первая серия), средняя величина теплового потока для варианта подключения кольцевой электрод-катод заметно больше, чем для варианта противоположной полярности. Возможно, это объясняется неравномерным распределением потенциала в линейном газовом разряде: градиент потенциала вблизи катода больше, чем у анода, следовательно, тепловой поток при разряде будет больше в области катода.

Заметим, что для варианта подключения "кольцевой электрод-анод" частота пульсации ~15 кГц соответствует частоте вращения плазмы, измеренной с помощью фоторегистратора [5]. Для варианта подключения "кольцевой электрод-катод" частота вращения плазмы вдвое больше. В этом случае вид сигнала ГДТП не позволяет выделить характерную частоту пульсаций (кривая 1 на рис 7б). При  $\tau > 300$  мкс средняя величина теплового потока остается практически неизменной во времени, а амплитуда пульсаций сравнительно мала.

Поскольку энергия, затраченная на возбуждение газоразрядной плазмы, соизмерима с кинетической энергией сверхзвукового потока, при работе МГД устройства тепловой поток на поверхности оказывается больше, чем в случае, когда устройство не работает.

Измерения показали, что с помощью МГД устройства можно добиться режима обтекания тела газоразрядной плазмой с распределением теплового потока на поверхности, близким к стационарному. 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 тепловых процессов на ударной трубе представляется перспективным, поскольку получение высоких параметров сверхзвукового потока за

счет нагрева рабочего газа ударной волной представляет значительные трудности.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Градиентные датчики теплового потока на основе монокристалла висмута продемонстрировали работоспособность в условиях импульсного высокотемпературного потока газа в экспериментах на ударной трубе. Опыт показал, что тепловые датчики способны работать в условиях сильных внешних электромагнитных полей. ГДТП обладают малой постоянной времени и могут быть применены для исследований процессов с характерными частотами ~10<sup>6</sup> Гц. Их использование в экспериментах на ударных трубах существенно расширяет экспериментальные возможности в решении такой практически важной проблемы, как теплозащита летательных аппаратов [6].

#### СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

ГДТП – градиентный датчик теплового потока;  
ДТП – датчик теплового потока;  
 $B_0$  – характерное значение магнитной индукции;  
 $M$  – число Маха;  
 $S$  – число Стюарта;  
 $T_f$  – температура газа;  
 $l_0$  – характерный размер пластины;  
 $w$  – скорость движения жидкости;  
 $\rho$  – плотность жидкости;  
 $\sigma_c$  – удельная электрическая проводимость;  
 $\tau$  – время (сигнала, процесса), мс.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Divin N.**, Mitiakov A., Mitiakov V., Sapozhnikov S. Patent Universal sensor for measuring shear stress, mass flow or velocity of a fluid or gas for determining a number of drops, or detection drip or leakage, Docket No EP 1223411, filed 17 July, 2002.
2. **Сапожников С.З.**, Митяков В.Ю., Митяков А.В., Измерение нестационарных тепловых потоков градиентными датчиками на основе анизотропных монокристаллов висмута, ЖТФ, 2004, т. 74, №7, с.114-120.
3. **Масленников В.**, Сахаров В. Двухдиафрагменная ударная труба Физико-технического института, ЖТФ, т.67, №11, 1997, с.88-95.
4. **Sapozhnikov S.**, Mitiakov V., Mitiakov A. Transient phenomenon in gradient heat flux. 3-rd European Science Conference, Heidelberg. Germany, 2000, pp.688-690.
5. **Bobashev S.**, Mende N., Sakharov V., Va Wie D. MHD Control of the Separation Phenomenon in a Supersonic Xenon Plasma Flow II, 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, Jan. 5-8, 2004, AIAA-2004-515
6. **Сапожников С.З.**, Митяков В.Ю., Митяков А.В., Петров Р.Л., Григорьев В.В., Бобашев С.В., Менде Н.П., Сахаров В.А., Измерение теплового потока на внутренних стенках канала ударной трубы, ЖТФ, 2004, т.30, №2, с.76-80.