

*В.Ю. Митяков¹, С.З. Сапожников¹, А.В. Митяков¹, С.А. Можайский¹,
С.В. Бабашев², Н.П. Менде², В.А. Сахаров²,*

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Россия (1)

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

ТЕПЛОМЕТРИЯ В УДАРНЫХ ТРУБАХ: ВОЗМОЖНОСТИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ТЕПЛООБМЕНА В ГАЗОВЫХ ПОТОКАХ

АННОТАЦИЯ

Описано применение градиентных датчиков теплового потока (ГДТП), изготовленных из монокристалла висмута (99,99), в ударных трубах. Динамические характеристики описанных датчиков определены экспериментально. Представлены результаты экспериментов по натурной теплометрии в ударных трубах при числах Маха $M=2\dots 9$. Измерительными средствами служили ГДТП с постоянной времени $10^{-8}\dots 10^{-9}$ с. Впервые исследованы динамика теплового потока на стенках и торце ударной трубы, а также влияние электромагнитного поля на теплообмен плазмы со стенкой расширяющегося сопла. Определены тепловые потоки на стенке, имитирующие поток в трубе Леонтьева.

1. ВВЕДЕНИЕ

Тепловые процессы в ударных трубах имеют характерное время порядка 10^{-3} с и менее [1].

В экспериментах традиционно измеряют давление в полости трубы и температуру на ее стенках (цилиндрической и торцевой) [2]. Измерения тепловых потоков на этих поверхностях до последнего времени не проводились ввиду отсутствия быстродействующего датчика теплового потока (ДТП); тепловой поток определяют расчетным путем [1]. В случаях, когда теплообмен в ударной трубе происходит в присутствии электрических и магнитных полей, тепловые потоки не имели и расчетной оценки.

2. ТЕОРИЯ

Принцип действия ГДТП основан на поперечном эффекте Зеебека – возникновении термо э.д.с., вектор которой перпендикулярен градиенту температуры в сечении датчика. ГДТП позволяют измерять значения местного теплового потока на поверхности любой формы и практически без запаздывания (постоянная времени $10^{-8}\dots 10^{-9}$ с)

В работе (впервые на ударных трубах) использовались градиентные датчики теплового потока (ГДТП), выполненные в виде батарей из анизотропных термоэлементов. Материалом послужили монокристаллы висмута чистоты 0.9999. Конструкция и границы применимости таких датчиков описаны в монографии [3]. Область рабочих температур ГДТП из висмута ограничивается сверху точкой плавления висмута (541К). Кратковременность опытов в ударных трубах обеспечивает со-

хранность датчиков, что подтверждается как расчетными оценками, так и экспериментально.

3. ЭКСПЕРИМЕНТ

Опыты проводили в атмосфере ксенона, нагреваемого ударной волной с числом Маха $M=6\dots 7$. ГДТП располагали заподлицо с внутренней цилиндрической стенкой трубы в сечениях, отстоящих от закрытого торца на 100 и 425 мм, ориентируя датчики меньшей стороной вдоль оси трубы.

В этих же сечениях устанавливали пьезоэлектрические датчики давления с диаметром чувствительного элемента 4 мм. Таким образом, в каждом опыте регистрировали тепловой поток и давление вначале за падающей ударной волной, а затем за ударной волной, отраженной от закрытого торца трубы.

Данные измерений в сечении, отстоящем от торца трубы на 100 мм, представлены на рис. 2.

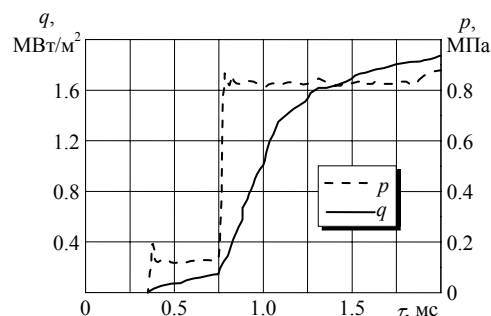


Рис. 2. Изменение плотности теплового потока и давления в ксеноне на стенке ударной трубы в сечении, отстоящем от ее торца на 100мм. Среда ксенон.

Сигнал датчика давления резко возрастает в момент прохождения через измерительное сечение падающей ($\tau = 0.35$ мс) и отраженной ($\tau = 0.75$ мс) ударных волн. Изменение плотности теплового потока коррелирует во времени с сигналом датчика давления, причем плотность теплового потока в области за отраженной ударной волной (где температура газа $T_f \approx 7000$ К) достигает 1.4 МВт/м².

Оба датчика предварительно тарировались; погрешность измерения теплового потока составляет приблизительно 2%, давления – не более 10%.

Представляют особый интерес опыты, в которых синхронно записаны изменения давления, плотности теплового потока и температуры (изме-

ренной тонкопленочным платиновым термометром сопротивления) на торце трубы (рис. 3).

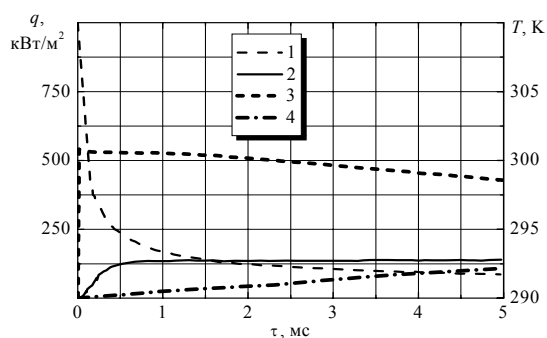


Рис. 3. Расчетные изменения температуры (кривая 3) и плотности теплового потока (кривая 1) на торце ударной трубы в сравнении с экспериментом (кривые 2 и 4, соответственно)

Динамика изменения теплового потока и температуры качественно соответствует физическим представлениям о процессах в ударной трубе, но начало процесса (до $\tau \approx 5 \dots 10$ мс) заслуживает более подробного внимания.

В газодинамике принято считать, что на торце ударной трубы пограничный слой не формируется, а температура поверхности с приходом ударной волны меняется скачком. На рис. 3 сплошной линией нанесены температура и плотность теплового потока, рассчитанные для условий проведенного эксперимента. При этом задавалось скачкообразное изменение температуры в начальный момент, поэтому, в соответствии с теорией теплопроводности [4], начальная плотность теплового потока должна быть бесконечно большой. Фронт сигнала ДТП, близкий к вертикальному, ранее получить не удавалось; это приписывали недостаточному быстродействию датчиков. Как показано выше, постоянная времени ГДТП не превышает 10^{-8} с, эти датчики обязательно выявил бы «всплеск» теплового потока, если бы он существовал: разница между постоянной времени и временем процесса в ударной трубе превышает 5 порядков.

Эксперименты (рис. 3) показывают, что температура и тепловой поток меняются совершенно по-иному: тепловой поток почти постоянен (за исключением начального участка продолжительностью 1 мс), а температура плавно и без экстремума (в пределах 5 мс) возрастает на 1.9 К.

Следующая серия опытов просвещена определению тепловых потоков на поверхностях пластины, омываемой с одной стороны дозвуковым, а с другой – сверхзвуковым потоком газа. Устройство, известное как труба Леонтьева [5], действует именно по этому принципу; в наших опытах использовался макет, получивший рабочее название «гарпун А.И. Леонтьева». Он неоднократно описан как модель для расчетных оценок эксперимента в работах А.И.Леонтьева и др. [6]. Вид ГЛ на державке, а также его расположение в сверхзвуковом потоке газа (на выходе из сопла Лавалья) и скачки

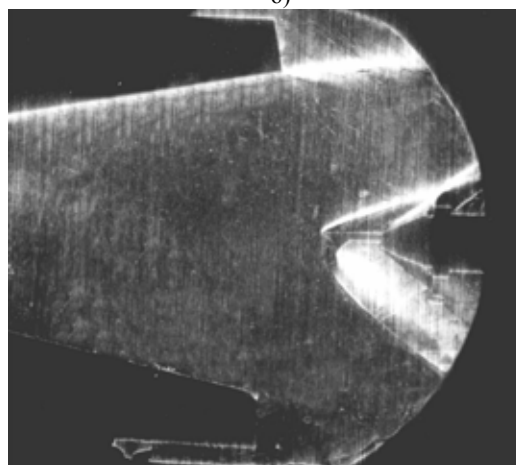
уплотнений, наблюдаемые в ходе опытов, представлены на рис.4.



а)



б)



в)

Рис. 4. К испытанию ГЛ в ударной трубе: а – ГЛ на державке; б – вид на ГЛ через окно теневой системы; в – скачки уплотнения на ГЛ при обтекании потоком азота.

При обтекании ГЛ сверхзвуковым потоком на гладкой поверхности сохраняется сверхзвуковой режим, а за уступом скорость резко падает (в опытах на ударных трубах такой характер течения мы зафиксировали методами теневой диагностики (рис. 4,в)). На удалении от передней кромки в 3...4 ширины пластины на обеих поверхностях заподлицо с ними установлены ГДТП размерами в плане 4x7 мм с вольт-ваттной чувствительностью около 10 мВ/Вт.

Результаты экспериментов иллюстрирует рис. 5.

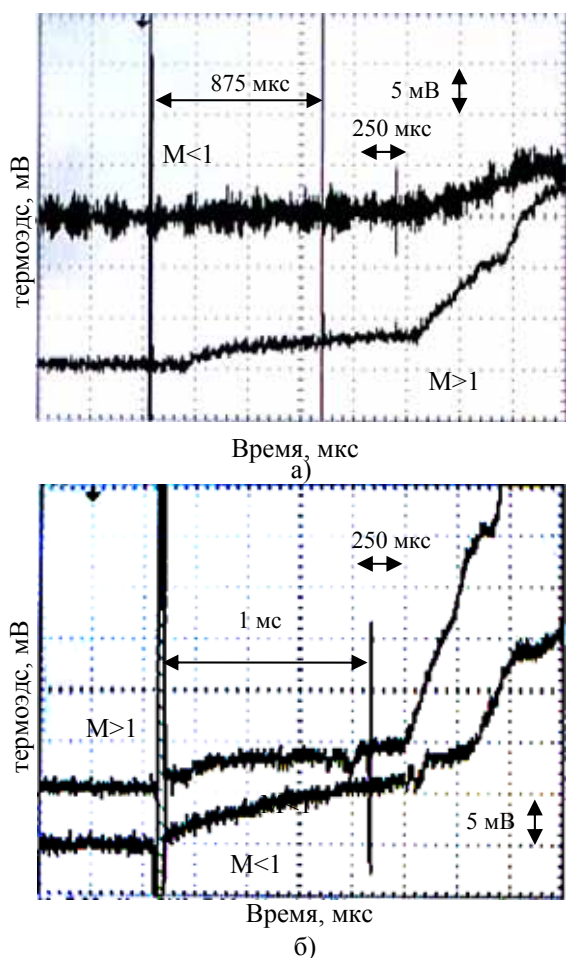


Рис 5 Результаты испытаний в ударной трубе

а) в среде азота выход из сопла число Маха - 4,0, давление - 0,05 атм, плотность - 0,04 кг/м³, температура - 440 К, скорость потока - 1600 м/с, пластина с уступом давление - 0,34 атм, плотность - 0,143 кг/м³, температура - 1034 К скорость потока - 450 м/с, пластина давление - 0,120 атм, плотность - 0,076 кг/м³, температура - 585 К, скорость потока - 840 м/с

б) в среде ксенона выход из сопла число Маха - 5,0, давление - 0,03 атм, плотность - 0,05 кг/м³, температура - 850 К, скорость потока - 1500 м/с, пластина с уступом давление - 0,48 атм, плотность - 0,16 кг/м³, температура - 4200 К скорость потока - 460 м/с, пластина давление - 0,105 атм, плотность - 0,1 кг/м³, температура - 1487 К, скорость потока - 750 м/с

Как видим, параметры на «дозвуковой» и «сверхзвуковой» поверхностях ГЛ, для азота и ксенона существенно различны. По оси ординат отложена термо-э.д.с. ГДТП, линейно связанная с тепловым потоком на соответствующей поверхности.

Термодинамическая температура рассчитывается по стандартным формулам, поэтому ГДТП на поверхности ГЛ дает, по сути, информацию о коэффициентах теплоотдачи в соответствующих режимах обтекания. Это позволяет использовать данные теплотрии для расчета энергоразделителей более сложной конструкции.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ГДТП на основе монокристаллов висмута про-

демонстрировали свою работоспособность в условиях импульсного высокотемпературного потока газа в экспериментах на ударной трубе и применимы для исследований процессов с характерными частотами до 1 МГц. Их использование в экспериментах на ударных трубах существенно расширяет экспериментальные возможности в решении такой практически важной проблемы, как теплозащита летательных аппаратов [7].

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 04-02-16944, 05-02-16071, 05-02-08128, 05-08-33486).

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

ГДТП – градиентный датчик теплового потока;

ДТП – датчик теплового потока;

M – число Маха;

T_г – температура газа;

ρ – плотность жидкости;

τ – время (сигнала, процесса), мс.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акатнов, Н.И. и др. Исследование на ударной трубе с соплом сверхзвуковых МГД каналов на неравновесной плазме инертного газа / Н.И. Акатнов и др. // Журнал технической физики. 1982. Т.52. Вып. 5. С. 884-892.
2. Масленников, В.Г., Сахаров, В.А. Двухдиафрагменная ударная труба Физико-технического института / В.Г. Масленников, В.А. Сахаров // Журнал технической физики. 1997. Т. 67. № 11. С. 8895.3. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.- Машиностроение. 1992. 672 с.
3. Градиентные датчики теплового потока / С.З. Сапожников, В.Ю. Митяков, А.В. Митяков. СПб.: СПбГПУ, 2003. 169 с.
4. Лыков, А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков. М.: Высшая школа, 1967. 600 с.
5. Леонтьев А.И., Температурная стратификация в сверхзвуковом потоке // Доклады Академии Наук, 1997, №2, с. 65-72.
6. Леонтьев А.И., Газодинамический метод энергоразделения газовых потоков // ТВТ, 1997, №1, с. 157-159.
7. Edney, В.Е. Effect of Shock Impingement on the Heat Transfer around Blunt Bodies // AIAA J. 1968. Vol. 6. № 1. P. 1521.