

03

Измерение теплового потока на внутренних стенках канала ударной трубы

© С.З. Сапожников, В.Ю. Митяков, А.В. Митяков, Р.Л. Петров,
В.В. Григорьев, С.В. Бобашев, Н.П. Менде, В.А. Сахаров

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

Поступило в Редакцию 24 июля 2003 г.

Представлены результаты измерения теплового потока на внутренних цилиндрической и торцевой поверхностях ударной трубы. Эксперименты проводились в атмосфере газов (воздуха и ксенона), нагреваемых сильной ударной волной. Впервые для измерения теплового потока в ударной трубе использованы датчики на основе анизотропного монокристалла висмута.

При гиперзвуковом движении летательного аппарата (ЛА) вблизи его поверхности возникает сложная система ударных волн, интерференция между которыми может в ряде случаев привести к десятикратному и более увеличению локальной плотности теплового потока с пагубными последствиями для конструкции ЛА [1]. По этой причине проектирование гиперзвуковых ЛА должно базироваться на численном моделировании их обтекания с учетом теплообмена. Для задания граничных условий подобного моделирования и верификации численных методов и расчетных схем необходимо экспериментально оценить уровень теплового потока и динамику его изменения.

Весьма заманчивым представляется использование датчиков теплового потока, обеспечивающих его прямое измерение. Эксперимент в ударных трубах [2,3] требует применения датчиков с высоким быстродействием. Поскольку характерное время процессов обычно не превосходит 1–5 ns, постоянная времени датчика не должна превышать 0.05–0.1 ns. В то же время теплостойкость материалов датчика не так существенна, как кажется на первый взгляд: поток газа с температурой,

доходящей до $(7-8) \cdot 10^3$ К, за время опыта не успевает изменить температуру обтекаемой поверхности более чем на 100–200 К. В связи с этим в наших опытах использовались градиентные датчики теплового потока (ГДТП) на основе анизотропного монокристалла висмута чистоты 0.9999 [4,5].

Действие ГДТП основано на поперечном эффекте Зеебека: выходной сигнал (термо-эд.с.) линейно связан с тепловым потоком в поверхностном слое висмута. При этом вектор напряженности нормален вектору падающего теплового потока. Вольт-ваттная чувствительность ГДТП изменяется в пределах 10–20 мВ/Вт, постоянная времени не превышает 0.05 мс, а верхняя граница рабочих температур вплотную подходит к точке плавления висмута (544 К).

ГДТП разработан в С.-Петербургском государственном политехническом университете [4,5] и применялся в разнообразных исследованиях, например при изучении процесса нестационарного теплообмена в камерах сгорания дизельных двигателей [6]. В этих опытах температура газа в камере сгорания изменялась циклически, достигая в максимуме более 2000 К.

Данное сообщение содержит первые результаты применения упомянутых градиентных датчиков для измерения тепловых потоков в сверхзвуковых течениях газа в ударных трубах ФТИ им. А.Ф. Иоффе [7] и СПбГПУ [2]. В этих опытах использовались ГДТП площадью 4×7 мм и толщиной 0.2 мм, наклеенные на органическое стекло.

На ударной трубе ФТИ опыты проводили в атмосфере ксенона, нагреваемого ударной волной с числом Маха $M = 6$. Датчик располагали заподлицо с внутренней стенкой цилиндрического канала трубы в сечениях, отстоящих от закрытого торца на расстоянии 100 и 425 мм, ориентируя датчик меньшей стороной чувствительного элемента вдоль оси трубы. В этих же сечениях трубы устанавливался пьезоэлектрический датчик давления с диаметром чувствительного элемента 4 мм. Таким образом, в каждом опыте регистрировались 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, показаны на рис. 1. Сигнал датчика давления (штриховая линия) резко возрастает в момент прохождения через измерительное сечение падающей ($t = 0.15$ мс) и отраженной ($t = 0.55$ мс) ударных волн. Кривая изменения теплового потока (сплошная линия) полностью коррелирует во времени с сиг-

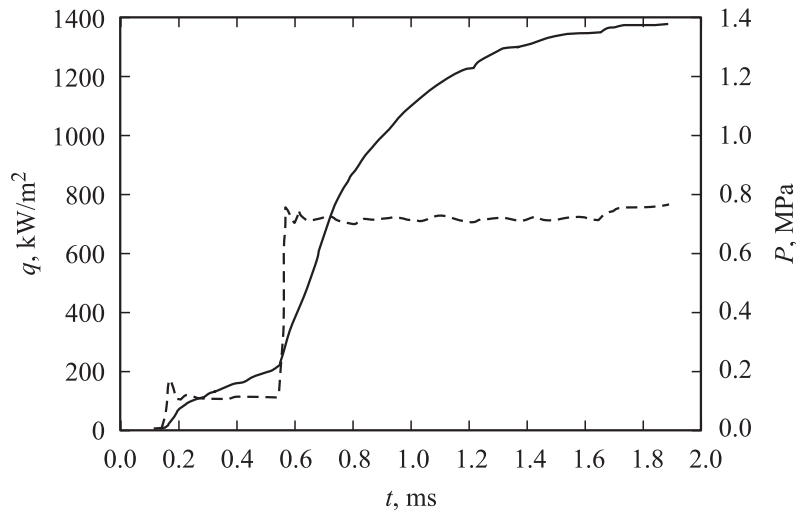


Рис. 1. Изменение во времени теплового потока (сплошная линия) и давления (штриховая) в ксеноне на боковой стенке ударной трубы в сечении, отстоящем от ее торца на расстояние 100 мм.

налом датчика давления. Плотность теплового потока в области за отраженной ударной волной (температура газа $T \sim 7000$ К) достигает 1.4 MW/m^2 . Оба датчика предварительно тарировались: погрешность измерения теплового потока составляет $\sim 2\%$, давления — не более 10% .

На ударной трубе СПБГПУ опыты проводились на воздухе по той же схеме. Скорость ударной волны соответствовала числу Маха $M = 1.9$. ГДТП размещали на внутренней цилиндрической стенке трубы в сечении, удаленном на 3 м от закрытого торца, а также в центре торцевой заглушки канала. На рис. 2 показаны результаты измерения теплового потока. Как и в предыдущих опытах, начало импульсов совпадает с приходом к датчикам ударной волны. Датчик на боковой стенке (кривая 1) регистрирует вначале возрастание теплового потока в момент прохождения падающей ударной волны, температура за которой составляет $T \sim 460$ К, и его последующее уменьшение при $t > 2.5$ ms, после прихода в это сечение холодного газа за контактной поверхно-

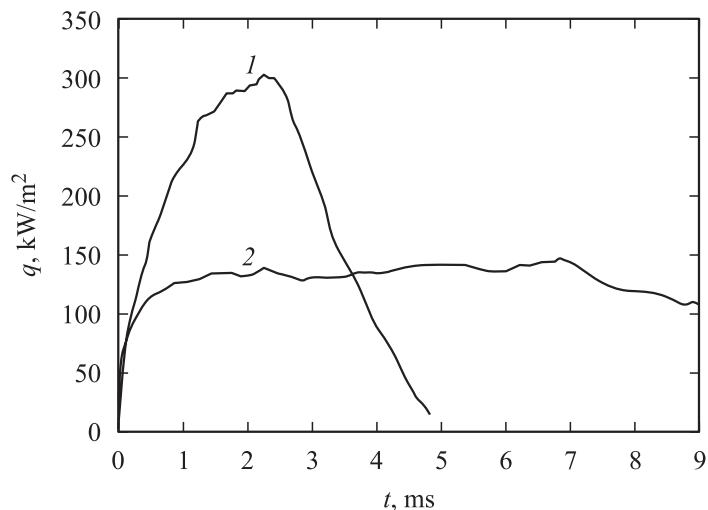


Рис. 2. Изменение теплового потока во времени за ударной волной в воздухе на боковой стенке в 3 м от торца (1) и в торце (2) ударной трубы.

стью. Датчик в торце трубы (кривая 2) в момент прихода (и отражения) ударной волны сразу оказывается в области неподвижного газа с более высокой температурой $T \sim 900$ К. Примерно через 1.5 мс после отражения ударной волны тепловой поток становится практически неизменным вплоть до $t \sim 7$ мс, когда к торцу трубы приходит контактная поверхность. Обращает на себя внимание более чем двукратное превышение максимального уровня теплового потока к цилиндрической стенке канала (сплошная линия) над уровнем теплового потока к торцу (штриховая линия). Это, по-видимому, свидетельствует о различных механизмах теплообмена на боковой и торцевой стенках канала. На торцевой поверхности теплообмен протекает так же, как между двумя полуограниченными стержнями [8], в то время как на цилиндрической стенке преобладает конвективный теплообмен. Этот вывод подтверждается результатами измерений теплового потока за отраженной ударной волной в опытах на ударной трубе ФТИ (рис. 1). Датчик в этих опытах находился в пограничном слое, образованном спутным потоком за падающей ударной волной, и отраженная ударная волна, двигаясь

навстречу спутному потоку, взаимодействовала с этим слоем. Поэтому газ у стенки не находился в состоянии покоя, как это имело место у торца трубы, и, следовательно, существовал конвективный теплообмен.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что градиентные датчики теплового потока на основе анизотропного монокристалла висмута могут быть использованы для измерения больших импульсных тепловых нагрузок в задачах сверхзвуковой газовой динамики. Отметим, что результаты данной работы качественно соответствуют аналогичным измерениям [9], выполненным с помощью пленочных датчиков.

Список литературы

- [1] *Edney B.E.* // AIAA Journ. 1968. V. 6. N 1. P. 16–24.
- [2] *Бабинский М.Г., Григорьев В.В., Исаков С.Н.* и др. Некоторые аэродинамические исследования в гиперзвуковой ударной трубе ЛПИ. Механика и машиностроение. Труды ЛПИ. № 352. Л., 1976. С. 100–104.
- [3] *Акатнов Н.И., Бабинский М.Г., Васильева Р.В.* // ЖТФ. 1982. Т. 52. В. 5. С. 884–892.
- [4] *Mitiakov V.Y., Sapozhnikov S.Z., Chumakov Y.S.* et al. // 5th World Conference on Experimental Heat Transfer. Fluid Mechanics and Thermodynamics. Thessaloniki, Greece, 2001. P. 111–116.
- [5] *Sapozhnikov S.Z., Mitiakov V.Y., Mitiakov A.V.* // 3rd European Thermal Science Conference. Heidelberg, Germany, 2000. P. 687–690.
- [6] *Сапожников С.З., Митяков В.Ю., Митяков А.В.* // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика. 1997. № 9–10. С. 53–57.
- [7] *Масленников В.Г., Сахаров В.А.* // ЖТФ. 1997. Т. 67. В. 11. С. 88–95.
- [8] *Карслоу Г., Егер Л.* Теплопроводность твердых тел. М.: Наука, 1964.
- [9] *Жилин Ю.В.* Методика измерения стационарных тепловых потоков с помощью пленочных датчиков сопротивления. ИВТАН, препринт № 2-005, 1976.