

03;12

## Использование анизотропных датчиков теплового потока в аэродинамическом эксперименте

© С.В. Бобашев, Н.П. Менде, П.А. Попов, Б.И. Резников,  
В.А. Сахаров, С.З. Сапожников, В.Ю. Митяков, А.В. Митяков,  
Д.А. Бунтин, А.А. Маслов, Х. Кнаусс, Т. Редигер

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург  
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет  
Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, Новосибирск  
Институт аэродинамики и газовой динамики (IAG), Штуттгарт, Германия  
E-mail: boris.reznikov@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 23 октября 2008 г.

Проведено сравнение результатов измерений теплового потока на плоской пластине, обтекаемой сверхзвуковым потоком с числом Маха 6, выполненных двумя датчиками с различной толщиной чувствительного элемента the Atomic Layer Thermo Pile (ALTP, фирма FORTECH HTS GmbH, Германия) толщиной  $\sim 0.5 \cdot 10^{-6}$  м и градиентным датчиком теплового потока (ГДТП, СПбГПУ, Россия) толщиной  $2 \cdot 10^{-4}$  м. ALTP используется для прямого измерения теплового потока в процессах с характерным временем более  $10^{-6}$  с. Предлагается методика математической обработки сигнала ГДТП, пригодная для выделения пульсаций теплового потока в газодинамических процессах с характерным временем  $10^{-4}$  с.

PACS: 47.27.T-, 52.30.Cv

В современной аэродинамике проблема теплопередачи при движении тела с гиперзвуковой скоростью в газовых средах является актуальной. Для измерения теплового потока к поверхности тела используются различные устройства, в частности датчики из анизотропных материалов. В основе работы таких датчиков лежит поперечный эффект Зебека — генерация в анизотропной среде ЭДС в направлении, перпендикулярном градиенту температуры [1].

ГДТП представляет собой батарею термоэлементов из анизотропного монокристалла висмута [2]. Поперечное сечение каждого тер-

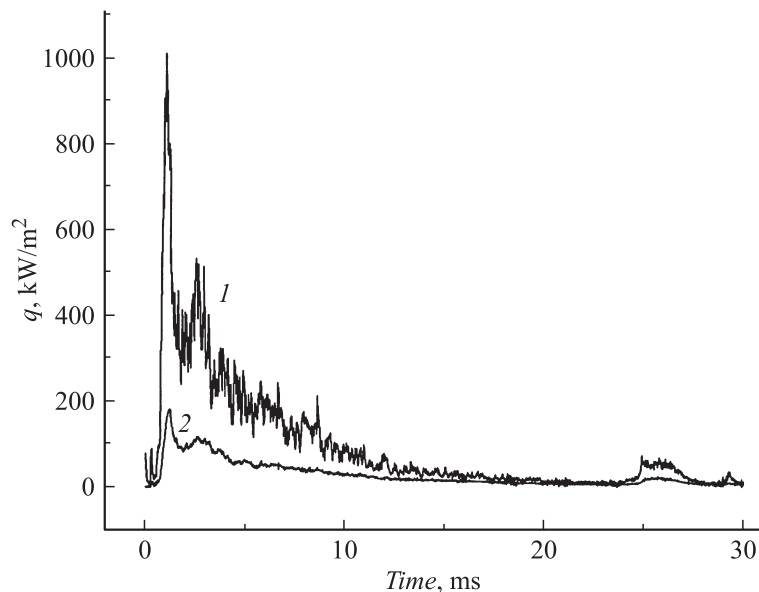
моэлемента  $0.2 \times 0.2 \text{ mm}$ , длина от 2.2 до 15 mm. Термоэлементы соединены последовательно и уложены в пакет таким образом, что ток в смежных элементах протекает в противоположных направлениях. Такая компоновка батареи термоэлементов делает ГДТП устойчивым к сильным электромагнитным помехам. Пакет монтируется на исследуемой поверхности с помощью теплопроводного компаунда.

Первые опыты использования этих датчиков в экспериментах на ударной трубе [3] продемонстрировали его работоспособность при импульсном ( $\sim 1 \text{ ms}$ ) воздействии газа с температурой  $\sim 7000 \text{ K}$ . Благодаря высокой помехоустойчивости, ГДТП показал хорошие результаты при работе в импульсном сверхзвуковом потоке слабоионизованной плазмы при наличии импульсных магнитного и электрического полей [4,5].

ALTP представляет собой косослойную пленку толщиной  $0.5 \mu\text{m}$ , полученную напылением чередующихся слоев  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-d}$  и  $\text{CuO}_2$  на подложке из  $\text{SrTiO}_3$ . Вся сборка имеет форму диска диаметром 6 и высотой 3 mm. Размеры активной зоны ALTP в плане могут варьироваться от  $0.2 \times 1 \text{ mm}$  до  $3 \times 3 \text{ mm}$  в зависимости от требуемого пространственного разрешения в эксперименте. Более детальное описание ALTP и методов его калибровки (статических и динамических) содержится в [6–8].

В настоящей статье проведено сравнение результатов измерений двумя датчиками теплового потока. Данные для сравнения были получены в ИТПМ СО РАН (Новосибирск) на гиперзвуковой импульсной аэродинамической трубе ИТ-302. Датчики были установлены на плоской пластине, обтекаемой сверхзвуковым потоком под нулевым углом атаки на расстоянии 183 mm вниз по течению от острой передней кромки. Расстояние между датчиками в поперечном направлении 16 mm, из чего следует предположение об идентичности условий в неустановившемся течении в пограничном слое вблизи датчиков. Параметры свободного течения в этом эксперименте были следующими: число Маха  $M = 6$ , температура 160 K, давление  $\sim 0.1 \text{ bar}$ . Оба датчика прошли предварительную стационарную калибровку в Институте аэродинамики и газовой динамики (IAG).

На рис. 1 показаны зависимости абсолютной величины теплового потока от времени, рассчитанные по сигналам ALTP и ГДТП по данным стационарной калибровки. Тепловой поток, рассчитанный по сигналу ГДТП (кривая 2), имеет существенно меньшую амплитуду и менее



**Рис. 1.** Сравнение сигналов датчиков ALTP (1) и ГДТП (2).

резкий фронт по сравнению с тепловым потоком, рассчитанным по сигналу ALTP (кривая 1). Из-за большей тепловой инерции ГДТП, вызванной его толщиной, в спектре теплового потока отсутствуют высокочастотные пульсации, которые четко представлены на сигнале ALTP. Эти значительные различия показывают необходимость математической обработки сигнала ГДТП с использованием решения уравнения теплопроводности.

При импульсной тепловой нагрузке в силу малой толщины чувствительного элемента ALTP ( $0.5 \mu\text{m}$ ) в активной пленке достаточно быстро устанавливается линейное распределение температуры, после чего сигнал датчика становится пропорциональным тепловому потоку. В датчике ГДТП, толщина которого  $h = 200 \mu\text{m}$ , линейное распределение температуры устанавливается значительно медленнее, что не позволяет использовать его для прямого измерения теплового потока в начальной фазе импульсного процесса. Для определения теплового

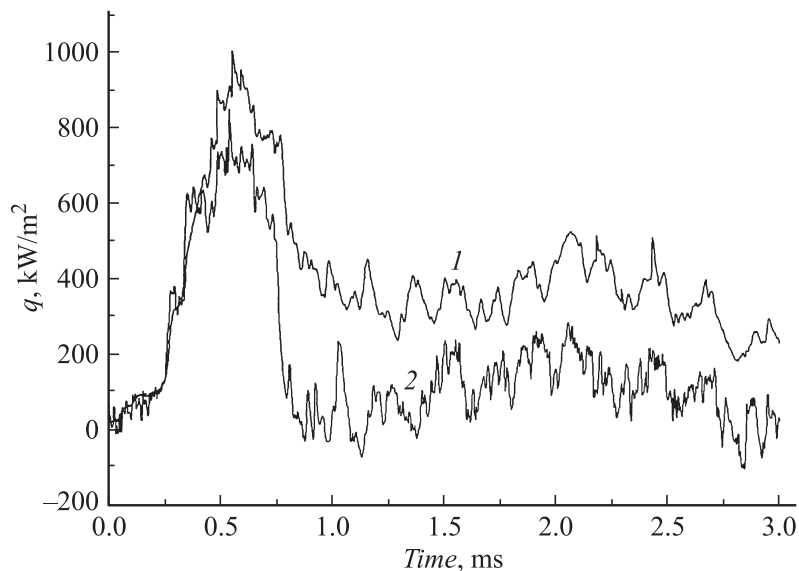
потока в этом случае нами предложена процедура математической обработки сигнала ГДТП, основанная на связи между тепловым потоком к поверхности датчика и изменением температуры поверхности датчика  $\vartheta_0(t) = T_0(t) - T_\infty$  ( $T_\infty$  — начальная температура). Эта величина находится из решения одномерного нестационарного уравнения теплопроводности по разности температур между поверхностями датчика  $\Delta(t) = T_0(t) - T_h(t)$ .

На начальной стадии нагрева можно пренебречь теплообменом датчика с подложкой и элементами конструкции и рассматривать простейшую тепловую модель датчика — полупространство с теплофизическими параметрами материала датчика. В этом случае аналитическое решение уравнения теплопроводности дает связь между тепловым потоком и  $\vartheta_0(t)$  [9,10]. На этой стадии температура тыльной поверхности датчика  $T_h(t) \approx T_\infty$ , и величина  $\vartheta_0(t)$  практически совпадает с  $\Delta(t)$ , которая пропорциональна измеренному сигналу датчика [11]. Коэффициент пропорциональности определяется по данным стационарной калибровки. Для практического применения удобно выражение [12]:

$$q(t_n) = \frac{2\lambda}{\sqrt{a\pi}} \left( \sum_{i=1}^n \frac{\vartheta_0(t_i) - \vartheta_0(t_{i-1})}{(t_n - t_i)^{1/2} + (t_n - t_{i-1})^{1/2}} \right). \quad (1)$$

Здесь  $a, \lambda$  — эффективные значения температуропроводности и теплопроводности материала датчика.

Поскольку датчик имеет конечную толщину  $h$ , выражение (1) справедливо до тех пор, пока температура тыльной поверхности датчика  $T_h$  практически не изменяется. Для оценки времени, в течение которого температура  $T_h$  остается практически неизменной, нами численно решалось нестационарное уравнение теплопроводности для полупространства со свойствами висмута. В качестве граничного условия на поверхности задавалась зависимость  $q(t)$ , соответствующая сигналу АЛТР в эксперименте. Расчеты показали, что разность температур  $\Delta(t)$  немонотонная функция температуры. В течение 1 ms после начала нагрева отношение  $T_h/\Delta$  равно 2%, а при  $t = 1.5$  ms оно не превышает 10%. Это означает, что для времен, меньших 1.5 ms (для ГДТП толщиной  $h = 0.2$  mm и заданной из опыта с АЛТР зависимости  $q(t)$ ), теплообмен датчика с окружающей средой малосуществен и можно использовать модель полупространства с заменой в формуле (1) величины  $\vartheta_0(t_i)$  на разность  $\Delta(t)$ .



**Рис. 2.** Зависимость  $q(t)$ , измеренная ALTR (1) и полученная обработкой сигнала ГДП (2).

На рис. 2 показаны тепловой поток, измеренный ALTR (кривая 1), и результат обработки сигнала ГДП по модифицированной формуле (1) (кривая 2). Видно, что максимумы обеих кривых совпадают по времени, а различие в амплитуде существенно сократилось. Весьма примечательным стало появление в спектре обработанного сигнала ГДП высокочастотных пульсаций, практически совпадающих по времени с пульсациями на кривой 1.

Сравнение результатов обработки сигнала ГДП с результатами прямого измерения теплового потока датчиком ALTR позволяет утверждать, что применяемая математическая обработка сигнала ГДП на начальной стадии нагрева ( $t \leq 0.8$  ms) дает величину теплового потока, близкую к данным прямых измерений, проведенных ALTR датчиком. Используемый алгоритм обработки позволяет выявить в спектре сигнала ГДП высокочастотные пульсации теплового потока, удовлетворительно совпадающие с пульсациями сигнала ALTR для

моментов времени больших 1 ms. Отличие величин теплового потока 1 и 2 при больших временах показывает, что требуется детализация теплообмена датчика с элементами конструкции и, возможно, учет двумерных эффектов. В импульсных газодинамических процессах с характерным временем более 20 ms датчик ГДТП может использоваться для прямого измерения теплового потока.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, проекты № 08-08-00414-а, № 08-01-91956-ННИО\_а и the Deutsche Forschungsgemeinschaft, проект KN 490/1-1 и /1-2.

## Список литературы

- [1] *Снарский А.А., Пальти Ф.М., Ащеулов А.А.* // ФТП. 1997. Т. 31. В. 11. С. 1281–1298.
- [2] *Patent Number: EP 1223411. Universal sensor for measuring shear stress, mass flow or velocity of a fluid or gas, for determining a number of drops, or detecting drip or leakage. Divin N.P., Mitiakov A.V., Mitiakov V.Y., Sapozhnikov S.Z.* Publication date: 2002–07–17.
- [3] *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.
- [4] *Bobashev S., Mende N., Sakharov V., Van 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.
- [5] *Сахаров В.А., Менде Н.П., Бобашев С.В., Сапожников С.З., Митяков В.Ю., Митяков А.В.* // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. В. 14. С. 46–51.
- [6] *Roediger T., Jenkins S., Knauss H., Wolfersdorf J., Gaisbauer U., Kraemer E.* / Time-Resolved Heat Transfer Measurements on the Tip Wall of a Ribbed Channel Using a Novel Heat Flux Sensor — Part I: Sensor and Benchmarks, International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition. Barcelona, Spain, ASME Paper GT2006-91129, 2006. (to appear in the Journal of Turbomachinery).
- [7] *Knauss H., Gaisbauer U., Wagner S., Buntin D., Maslov A., Smorodsky B., Betz J.* / Calibration experiments of a new active fast response heat flux sensor to measure total temperature fluctuations. Part I–III. Proceedings of ICMAR 2002. V. III. Novosibirsk.

- [8] *Knauss H., Roediger T., Gaisbauer U., Kraemer E.* IAG, University of Stuttgart, Germany; *Bountin D.A., Smorodsky B.V., Maslov A.A.* ITAM, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia; *Scrulijes J., Sailer F.* ISL, St. Louis, France: A Novel Sensor for Fast Heat Flux Measurements. AIAA Paper 2006-3637, San Francisco, 2006.
- [9] *Carlslaw H.S., Jaeger J.C.* Conduction of Heat in solids. Second edition. Oxford. At the Clarendon Press, 1959.
- [10] *Резников Б.И., Менде Н.П., Попов П.А., Сахаров В.А., Штейнберг А.С.* // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. В. 15. С. 49–54.
- [11] *Резников Б.И., Сахаров В.А., Штейнберг А.С.* // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. В. 5. С. 28–33.
- [12] *Cook W.J., Felderman E.J.* // AIAA Journal. 1966. V. 4. N 3. P. 561–562.