

03;12

## Применение градиентного датчика теплового потока в исследованиях импульсных процессов на ударной трубе

© С.В. Бобашев,<sup>1</sup> Ю.П. Головачев,<sup>1</sup> Н.П. Менде,<sup>1</sup> П.А. Попов,<sup>1</sup> Б.И. Резников,<sup>1</sup> В.А. Сахаров,<sup>1</sup>  
А.А. Шмидт,<sup>1</sup> А.С. Чернышев,<sup>1</sup> С.З. Сапожников,<sup>2</sup> В.Ю. Митяков,<sup>2</sup> А.В. Митяков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,

194021 Санкт-Петербург, Россия

e-mail: boris.reznikov@mail.ioffe.ru

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,

195251 Санкт-Петербург, Россия

(Поступило в Редакцию 13 мая 2008 г.)

С помощью градиентного датчика теплового потока измерена температура поверхности тела вращения, обтекаемого импульсным сверхзвуковым потоком азота. По результатам измерения температуры определен тепловой поток к поверхности тела. Проведен численный расчет стационарного обтекания модели вязким теплопроводным газом. Результаты численного расчета и данные измерений находятся в хорошем соответствии друг с другом.

PACS: 47.27.te, 52.30.Cv

Целью настоящей работы является измерение теплового потока к поверхности модели (рис. 1), расположенной в выходном сечении сопла 1 и обтекаемой сверхзвуковым потоком азота с числом Маха 4. Параметры течения изменялись в диапазонах: температура — 600–800 К, давление — 4–9 кПа, плотность — 0.02–0.06 кг/м<sup>3</sup>. Измерения проводились на Большой ударной трубе ФТИ, обеспечивающей стационарный сверхзвуковой поток в течение времени до 1.5 мс. Модель 2 представляет собой комбинацию конуса с углом 60° и цилиндра диаметром 30 мм. На конической поверхности модели располагается градиентный датчик теплового потока (ГДТП) 3, изготовленный из анизотропного монокристалла висмута [1]. В основе работы ГДТП лежит поперечный эффект Зеебека — генерация ЭДС в направлении, перпендикулярном градиенту температуры [2].

В стационарных режимах и медленно изменяющихся процессах с характерным временем более 20 мс ГДТП используется для прямого измерения теплового потока. Перед применением проводится калибровка датчика на специальном стенде, которая заключается в определении коэффициента пропорциональности между величиной стационарного теплового потока и электрическим сигналом, генерируемым датчиком.

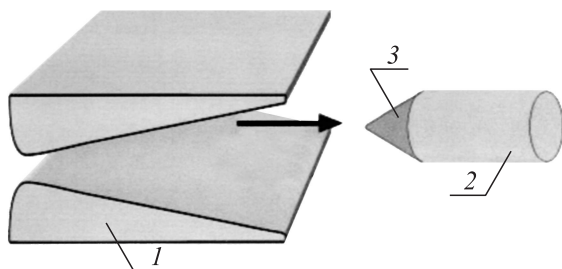


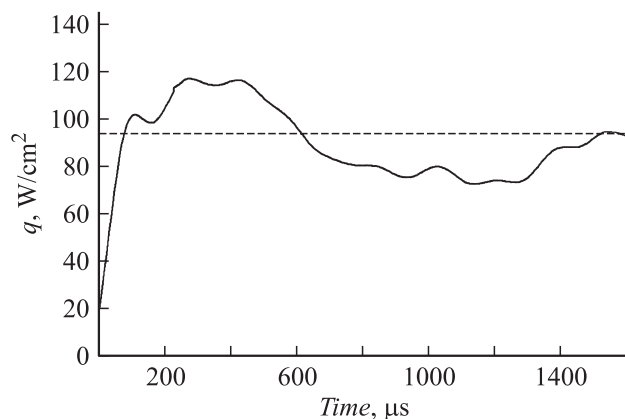
Рис. 1. Схема эксперимента.

В импульсных процессах величина теплового потока определяется из решения уравнения теплопроводности для полупространства при известном изменении температуры рабочей поверхности датчика [3]. Для определения коэффициента пропорциональности, связывающего сигнал ГДТП с изменением температуры его рабочей поверхности, используется вольт-ваттная характеристика, полученная при стационарной калибровке. Это возможно, поскольку при постоянных физических параметрах термоэлемента величина ЭДС не зависит от распределения температуры по толщине датчика [3].

По результатам обработки серии опытов [4] были получены следующие оценки: погрешность измерений разности температур составляет примерно 0.1°, относительная погрешность вычисления теплового потока ~ 10%.

Для сравнения проводилось численное моделирование сверхзвукового обтекания того же тела с параметрами потока, реализуемыми в эксперименте. Стационарное решение уравнений газовой динамики находилось методом установления с помощью неявного алгоритма высокого разрешения, который обеспечивает второй порядок точности по пространственным переменным и по времени в областях гладкости решения. Метод обладает свойством консервативности и является методом сквозного счета, что необходимо при решении нестационарных задач. Вычислительная процедура имела 2-й порядок точности по пространству и удовлетворяла условию TVD, что обеспечивало монотонность получаемого решения. В областях сильных градиентов газодинамических функций использовалась блочно-структурированная сетка со сгущением. В расчете использовалась модель турбулентности Спаларта–Аллмараса. Подробнее описание алгоритма приведено в работе [5].

На рис. 2 показано сравнение результатов расчета теплового потока и измерений. Сплошной линией показано изменение средней величины теплового потока,



**Рис. 2.** Сравнение результатов численного моделирования (пунктир) и эксперимента (сплошная кривая).

определенного из опыта. Осреднение проводилось для каждого момента времени в пределах  $\pm 50 \mu\text{s}$ . Из графика видно, что тепловой поток достигает максимального значения к моменту времени  $300 \mu\text{s}$ , что соответствует оценке времени формирования стационарного течения в сопле по одномерной модели. Последующее уменьшение величины теплового потока, возможно, связано с незначительным изменением параметров в сверхзвуковом потоке.

Горизонтальным пунктиром на рис. 2 показано значение теплового потока, полученное при численном моделировании. Из рисунка видно, что данные расчета находятся в хорошем соответствии с результатами измерений. Величина стационарного теплового потока  $94 \text{ W/cm}^2$ , определенная при численном моделировании, практически совпадает с осредненным в интервале  $200\text{--}600 \mu\text{s}$  значением теплового потока, равным  $91 \text{ W/cm}^2$  при относительной погрешности 15%.

Работа выполнена при поддержке EOARD (проект МНТЦ № 3475р), программы президиума РАН № П-09, РФФИ проект № 08-08-00414-а.

## Список литературы

- [1] Patent 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 / N.P. Divin, A.V. Mitiakov, V.Y. Mitiakov, S.Z. Sapozhnikov. Publ. 17.07.2002.
- [2] *Снарский А.А., Пальти Ф.М., Ащеулов А.А.* // ФТП. 1997. Т. 31. Вып. 11. С. 1281–1298.
- [3] *Резников Б.И., Сахаров В.А., Штейнберг А.С.* // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. Вып. 5. С. 28–33.
- [4] *Резников Б.И., Менде Н.П., Попов П.А., Сахаров В.А., Штейнберг А.С.* // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. Вып. 12. С. 49–54.
- [5] *Bobashev S., Chernyshev A., Golovachov Y., Kurbatov G., Mende N., and Sakharov V.* // AIAA–2008–1094. 46<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sci. Meeting and Exhibit. Reno, Nevada. Jan. 7–10. 2008.