

03.1

## Калибровка тепловых датчиков на анизотропных термоэлементах и гетерогенных металлических структурах с помощью отраженной ударной волны

© П.А. Попов, Н.А. Монахов, Т.А. Лапушкина, С.А. Поняев, Р.О. Куракин

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: pavel.popov@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 6 июля 2022 г.

В окончательной редакции 26 августа 2022 г.

Принято к публикации 26 августа 2022 г.

Продemonстрирована применимость метода калибровки тепловых датчиков на анизотропных термоэлементах из висмута и гетерогенной структуры из пары медь–никель с помощью отраженной ударной волны для определения вольт-ваттного коэффициента. Полученный коэффициент для датчика на анизотропных термоэлементах близок к данным стационарной калибровки, а для датчика на гетерогенной структуре — к результатам численного моделирования.

**Ключевые слова:** тепловой поток, калибровка, ударная труба, ударная волна, градиентные датчики теплового потока, гетерогенные градиентные датчики теплового потока.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.20.53688.19297

Измерение теплового потока к поверхности тела является базовой диагностикой в газодинамическом эксперименте [1]. В последнее время в экспериментах на ударных трубах стали применяться термоэлектрические тепловые датчики на основе анизотропных термоэлементов из висмута — градиентные датчики теплового потока (ГДТП), а также гетерогенных металлических структур — гетерогенные градиентные датчики теплового потока (ГГДТП). Их принцип действия основан на генерации термоэлектрического поля в чувствительном элементе, обладающем анизотропией термоэдс при появлении в нем градиента температуры [2]. Обработка результатов измерений нестационарного теплового потока осуществляется по методике [3] или [4].

Перед использованием ГДТП или ГГДТП необходимо провести калибровку для определения вольт-ваттного коэффициента  $S_0$ . При калибровке в стационарном тепловом режиме датчик устанавливается на специальный стенд, где через него проходит тепловой поток известной плотности  $q$  и регистрируется электрический сигнал  $U$  [2]. Искомый вольт-ваттный коэффициент определяется с помощью соотношения  $S_0 = U/(qA)$ , где  $A$  — площадь рабочей поверхности. При измерении импульсных тепловых потоков калибровку желательно проводить в нестационарном тепловом режиме, например, с помощью отраженной ударной волны. Данный способ довольно прост в реализации и часто используется для калибровки коаксиальных термпар [5,6]. В настоящей работе продемонстрирована применимость данного подхода для калибровки ГДТП из висмута и ГГДТП из пары медь–никель. Неопределенность полученного вольт-ваттного коэффициента зависит от точности измерения начального давления рабочего газа в

камере низкого давления ударной трубы и числа Маха падающей ударной волны.

Экспериментальная часть калибровки проводится на ударной трубе. В торце камеры низкого давления закрепляются тепловой датчик и датчик давления для запуска системы регистрации. По начальным данным эксперимента рассчитывается теоретическое значение теплового потока в стенку за отраженной ударной волной. В одномерном приближении при отсутствии диссоциации и ионизации газа, зависимости теплопроводности  $\lambda \sim T^\nu$  и плотности  $\rho \sim T^{-1}$ , а также постоянной теплоемкости  $C_p$  он может быть рассчитан по соотношению [7]:

$$q(t) = 1.13 \sqrt{\frac{\rho_5 \lambda_5 C_5}{2t}} T_5 \sqrt{\frac{1 - \theta_w^\nu}{\nu} - \frac{1 - \theta_w^{\nu+1}}{\nu + 1}}, \quad (1)$$

где  $\rho_5$ ,  $\lambda_5$ ,  $C_5$  — плотность, теплопроводность и теплоемкость газа за отраженной ударной волной,  $t$  — время,  $\theta_w = T_5/T_w$  — отношение температуры газа за отраженной ударной волной и температуры стенки,  $\nu$  — показатель степени. По зарегистрированному в эксперименте сигналу теплового датчика и начальному приближению  $S_0$  по методике [3] рассчитывается тепловой поток. Для сравнения экспериментальных и теоретических данных удобно использовать нормированный тепловой поток  $q\sqrt{t}$ , зависящий только от параметров газа за отраженной ударной волной. Далее подбирается такое значение  $S_0$ , при котором различие значений  $q\sqrt{t}$  будет минимальным.

В качестве стенда для калибровки ГДТП и ГГДТП использовалась ударная труба ФТИ им. А.Ф. Иоффе [8]. Число Маха падающей ударной волны определялось с помощью пьезоэлектрических датчиков давления, установленных в конце камеры низкого давления на рассто-

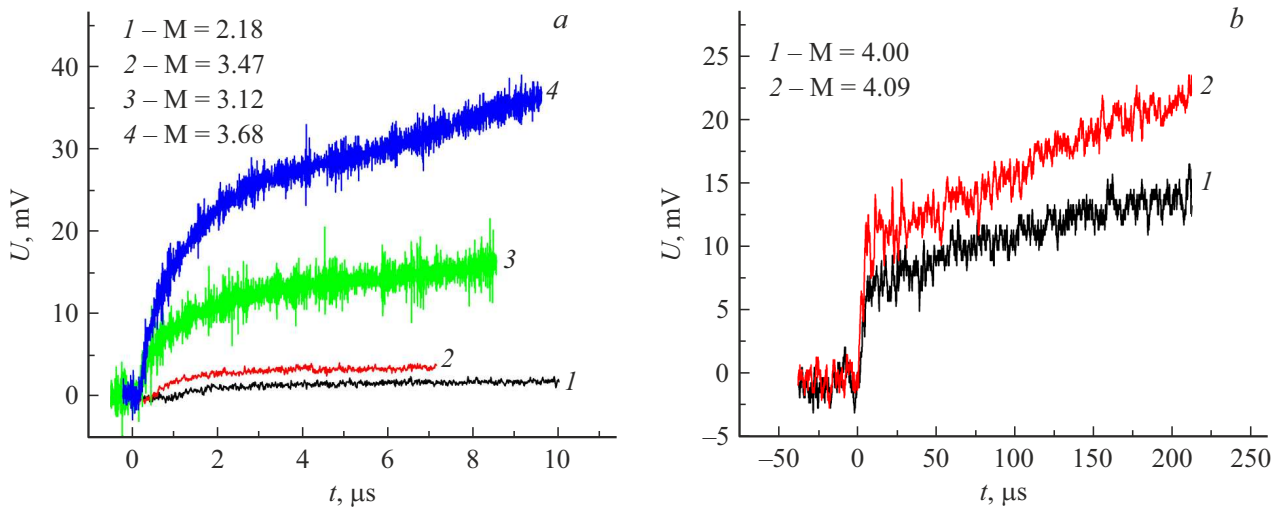


Рис. 1. Сигналы ГДТП (а) и ГГДТП (б) при отражении ударной волны с различным числом Маха.

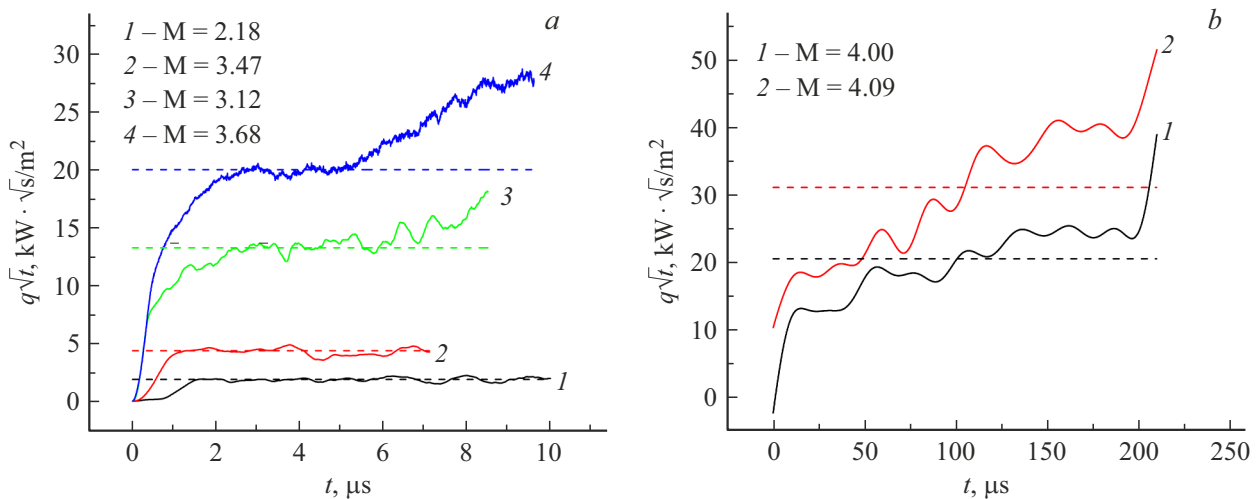
янии 58 mm друг от друга. Регистрация сигналов датчиков давления осуществлялась с помощью осциллографа Tektronix TDS 2014 с временным разрешением  $4 \cdot 10^{-7}$  s. В первой серии экспериментов использовался ГДТП размером  $4 \times 7$  mm из десяти термоэлементов из висмута. Длина каждого термоэлемента составляла 7 mm, ширина 0.4 mm и толщина 0.25 mm. По данным стационарной калибровки  $S_0 \approx 3.1$  mV/W. Во второй серии использовался ГГДТП из пары медь–никель размером  $3 \times 3$  mm и толщиной 0.5 mm. Толщина каждого слоя металла 0.15 mm. ГГДТП был подключен к усилителю на базе микросхемы INA128P с коэффициентом усиления 200 и полосой пропускания  $\sim 200$  kHz. Сигнал датчиков теплового потока регистрировался с помощью осциллографа Tektronix TDS 1002. Длительность измерения с помощью ГДТП составляла  $\sim 10$   $\mu$ s при временном разрешении  $10^{-8}$  s, а в случае ГГДТП  $\sim 100$   $\mu$ s при разрешении  $10^{-7}$  s.

Вольт-ваттный коэффициент типичного ГДТП составляет  $S_0 \sim 1-10$  mV/W, а для рассматриваемого ГГДТП  $S_0 \approx 19$   $\mu$ V/W (расчет по модели [9] с воспроизведением внутренней структуры датчика). Поэтому для калибровки ГДТП и ГГДТП были выбраны режимы с различным значением нормированного теплового потока  $q\sqrt{t}$  (см. таблицу). При калибровке ГДТП в качестве рабочего газа использовался азот. В режимах с числом Маха  $M = 2.18$  и  $3.47$  толкающим газом был азот, в режимах с  $M = 3.12$  и  $3.68$  — водород. При калибровке ГГДТП рабочим газом являлся аргон, толкающим — водород.

На рис. 1 приведены исходные электрические сигналы ГДТП (а) и сигналы ГГДТП (б) после усиления. Различие температуропроводности висмута ( $a = 5.5 \cdot 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s) и пары медь–никель ( $a = 5.8 \cdot 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s) приводит к разному распределению температуры в датчике, а следовательно, и к различной форме сигнала.

На рис. 2 показаны теоретические и экспериментальные значения нормированного теплового потока для вольт-ваттного коэффициента ГДТП (а) и ГГДТП (б), при котором наблюдается наилучшее совпадение значений  $q\sqrt{t}$ . При расчете среднего значения  $q\sqrt{t}$  в случае ГДТП были исключены начальная фаза установления теплообмена длительностью  $\sim 1$   $\mu$ s и участок, на котором наблюдается рост нормированного теплового потока. В случае ГГДТП были исключены начальный и конечный участки длительностью  $\sim 10$   $\mu$ s, где также присутствует существенное изменение  $q\sqrt{t}$ . Увеличение длительности начального участка, не учитываемого при осреднении в случае ГГДТП, обусловлено ограниченной полосой пропускания усилителя и возможным искажением быстрорастущего сигнала. Видно, что при калибровке ГДТП различие  $S_0$  во всех режимах, за исключением  $M = 3.68$ , не превышает 20%. В случае ГГДТП в обоих режимах получен одинаковый вольт-ваттный коэффициент (см. таблицу).

При калибровке ГДТП в режимах  $M = 2.18$  и  $3.47$  поведение экспериментального нормированного теплового потока соответствует теоретическому во всем диапазоне времен. В режимах  $M = 3.12$  и  $3.68$  наблюдается короткий участок установившегося теплообмена, соответствующий закону  $q \sim 1/\sqrt{t}$ , длительность которого сокращается с увеличением теплового потока. Использование подобных режимов может приводить к существенной погрешности при определении вольт-ваттного коэффициента ГДТП. При калибровке ГГДТП на кривых  $q\sqrt{t}$  не наблюдается установившейся фазы теплообмена. Возможной причиной могут быть возмущения вблизи торца ударной трубы, вызванные взаимодействием отраженной ударной волны с пограничным слоем на рассматриваемых временах  $\sim 100$   $\mu$ s [6]. Несмотря на это, полученный вольт-ваттный коэффициент близок к значению, полученному в численном расчете.



**Рис. 2.** Тепловой поток  $q\sqrt{t}$ : теоретический нормированный (штриховые линии) и рассчитанный по сигналу ГДТП (а) и ГГДТП (б) для выбранного значения вольт-ваттного коэффициента  $S_0$  (сплошные линии).

Начальные условия экспериментов, рассчитанные параметры рабочего газа за отраженной ударной волной и определенный вольт-ваттный коэффициент датчика

M	$P_1$ , kPa	$T_5$ , K	$\rho_5$ , kg/m <sup>3</sup>	$C_{p5}$ , J/(kg · K)	$\lambda_5$ , W/m · K	$(q\sqrt{t})_{th}$ , W · √s/m <sup>2</sup>	$\overline{(q\sqrt{t})_{ex}}$ , W · √s/m <sup>2</sup>	$S_0$ , V/W
Калибровка ГДТП								
2.18	6.67	805	0.552	1123	0.058	1880	1859	$2.9 \cdot 10^{-3}$
3.47	1.33	1607	0.218	1252	0.099	4354	4269	$2.3 \cdot 10^{-3}$
3.12	25.06	1363	3.589	1224	0.088	13247	13053	$2.7 \cdot 10^{-3}$
3.68	19.20	1763	3.362	1267	0.107	20012	19364	$3.9 \cdot 10^{-3}$
Калибровка ГГДТП								
4.00	13.33	3620	1.72	520	0.10011	20664	20008	$15 \cdot 10^{-6}$
4.09	26.66	3779	3.4841	520	0.10291	31244	30557	$15 \cdot 10^{-6}$

Выбраны режимы ударной трубы и проведена калибровка ГДТП и ГГДТП с помощью отраженной ударной волны для определения вольт-ваттного коэффициента. Использование азота в качестве рабочего газа в режимах с большим нормированным тепловым потоком приводит к уменьшению стационарной фазы теплообмена, соответствующей теоретической зависимости. Полученный вольт-ваттный коэффициент ГДТП близок к значению при стационарной калибровке, а в случае ГГДТП соответствует рассчитанному с помощью численного моделирования.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

[1] B.R. Hollis, D.K. Prabhu, M. Maclean, A. Dufrene, J. Thermophys. Heat Transf., **31** (3), 712 (2017). DOI: 10.2514/1.T5019

[2] S.Z. Sapozhnikov, V.Yu. Mityakov, A.V. Mityakov, *Heatmetry: the science and practice of heat flux measurement (heat and mass transfer)* (Springer International Publ., 2020).

[3] П.А. Попов, С.В. Бобашев, Б.И. Резников, В.А. Сахаров, Письма в ЖТФ, **44** (8), 3 (2018). DOI: 10.21883/PJTF.2018.08.45960.17036 [P.A. Popov, S.V. Bobashev, B.I. Reznikov, V.A. Sakharov, Tech. Phys. Lett., **44** (4), 316 (2018). DOI: 10.1134/S1063785018040235].

[4] Ю.В. Добров, В.А. Лашков, И.Ч. Машек, А.В. Митяков, В.Ю. Митяков, С.З. Сапожников, Р.С. Хоронжук, ЖТФ, **91** (2), 240 (2021). DOI: 10.21883/JTF.2021.02.50357.209-20 [Yu.V. Dobrov, V.A. Lashkov, I.Ch. Mashek, A.V. Mityakov, V.Yu. Mityakov, S.Z. Sapozhnikov, R.S. Khoronzhuk, Tech. Phys., **66** (2), 229 (2021). DOI: 10.1134/S1063784221020109].

[5] B. Birch, D. Buttsworth, F. Zander, Exp. Therm. Fluid Sci., **119**, 110177 (2020). DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2020.110177

[6] E. Marineau, H. Hornung, in *Proc. of 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting (AIAA)* (Orlando, Florida, 2009), AIAA 2009-737. DOI: 10.2514/6.2009-737

[7] J.A. Fay, N.H. Kemp, J. Fluid Mech., **21** (4), 659 (1965). DOI: 10.1017/S002211206500040X

- [8] S.V. Bobashev, A.V. Erofeev, T.A. Lapushkina, S.A. Poniaev, R.V. Vasil'eva, D.M. Van Wic, *J. Propuls. Power*, **21** (5), 831 (2005). DOI: 10.2514/1.2624
- [9] С.В. Бобашев, П.А. Попов, Б.И. Резников, В.А. Сахаров, *Письма в ЖТФ*, **42** (9), 32 (2016). [S.V. Bobashev, P.A. Popov, B.I. Reznikov, V.A. Sakharov, *Tech. Phys. Lett.*, **42** (5), 460 (2016). DOI: 10.1134/S1063785016050035].