

03.2

## Изменение динамических характеристик датчиков теплового потока на анизотропных термоэлементах в экспериментах на ударных трубах

© П.А. Попов<sup>1</sup>, А.В. Масюкевич<sup>1</sup>, Е.В. Колесник<sup>2</sup> А.Б. Подласкин<sup>1</sup><sup>1</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия<sup>2</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: pavel.porov@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 6 февраля 2024 г.

В окончательной редакции 5 марта 2024 г.

Принято к публикации 11 марта 2024 г.

Обнаружено изменение динамических характеристик датчиков на анизотропных термоэлементах из монокристалла висмута при измерении интенсивных тепловых потоков ( $> 1 \text{ MW/m}^2$ ) в экспериментах на ударных трубах в случае использования воздуха в качестве рабочего газа. Заметное увеличение времени реакции на тепловое воздействие, а также искажение формы и амплитуды электрического сигнала и рассчитываемого по нему теплового потока вызваны образованием в термоэлементах приповерхностного дефектного слоя толщиной  $< 1 \mu\text{m}$ , не участвующего в генерации термоэдс. Это может ограничивать условия применимости датчика в экспериментах на ударных трубах и требует проведения периодической калибровки датчика по отраженной ударной волне для контроля состояния рабочей поверхности и значения вольт-ваттного коэффициента.

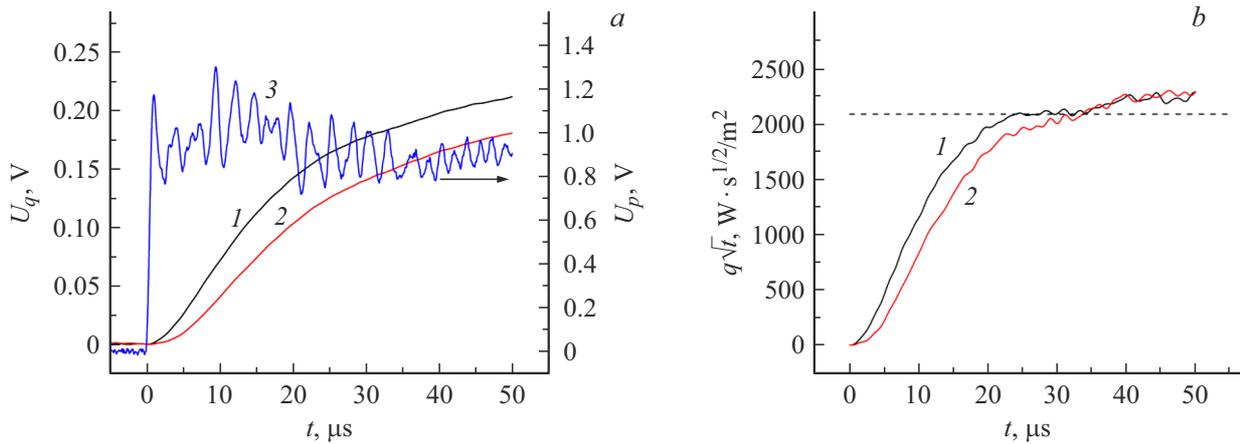
**Ключевые слова:** тепловой поток, ударные трубы, датчики на анизотропных термоэлементах, висмут.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.12.58063.19882

Датчик на анизотропных термоэлементах из монокристалла висмута [1] является удобным инструментом для измерения нестационарного теплового потока в экспериментах на ударных трубах. Он обладает высокой чувствительностью ( $\sim 10 \text{ mV/W}$ ), малым временем отклика ( $< 0.1 \mu\text{s}$ ) и широким динамическим диапазоном ( $\sim 0.1 - 10 \text{ MW/m}^2$ ). Накопленный опыт показывает, что воздействие азота и аргона, нагретого до  $\sim 5000 \text{ K}$ , за отраженной ударной волной длительностью до  $100 \mu\text{s}$  не приводит к термическому разрушению термоэлементов и мест пайки, изменению вольт-ваттного коэффициента и динамических характеристик датчика [2,3]. В [4] показано, что при изготовлении датчиков в тонком приповерхностном слое анизотропного термоэлемента может нарушаться монокристаллическая структура, что проявляется в заметном увеличении времени реакции на тепловое воздействие и генерации электрического сигнала, не соответствующего действующему на датчик нестационарному тепловому потоку. Причиной данного эффекта является образование дефектного слоя, не участвующего в генерации термоэдс. В настоящей работе показано, что аналогичное повреждение, сопровождающееся изменением характеристик датчика, может возникать и в процессе измерений интенсивного теплового потока ( $> 1 \text{ MW/m}^2$ ) длительностью до  $1 \text{ ms}$ , когда рабочим газом является воздух.

Используемый датчик теплового потока состоял из одного термоэлемента длиной  $4 \text{ mm}$ , шириной  $0.5 \text{ mm}$  и толщиной  $0.35 \text{ mm}$ . Он был откалиброван по отраженной ударной волне [5] до проведения основной серии изме-

рений. В торце камеры низкого давления ударной трубы был установлен фланец с датчиком теплового потока и давления, который использовался для точного определения момента отражения падающей ударной волны. Начальное давление азота в камере низкого давления составляло  $p_1 = 50 \text{ Torr}$ , число Маха падающей ударной волны  $M_1 = 2.2$ . Для увеличения отношения сигнал/шум при регистрации на нижнем пределе измерений осциллографа использовался промежуточный усилитель на основе инструментального усилителя INA128 с коэффициентом  $\times 500$  и RC-фильтром нижних частот с постоянной времени  $5 \mu\text{s}$ . Использование фильтра снизило динамические характеристики системы датчик–усилитель и уменьшило длительность рабочего времени, но при этом позволило существенно снизить уровень шумов и повысить точность результатов измерений. Сигналы датчиков регистрировались с помощью осциллографа Tektronix TDS 2024C с шагом по времени  $4 \cdot 10^{-8} \text{ s}$ . Кривой 3 на рис. 1, а показан сигнал датчика давления, а кривой 1 — сигнал датчика теплового потока. Осцилляции сигнала датчика давления вызваны исключительно передачей механических колебаний через контакт фланца в торце трубы и металлического корпуса, а не газодинамическими причинами. На рис. 1, б горизонтальной линией показано теоретическое значение приведенного теплового потока за отраженной ударной волной  $q_5 \sqrt{t} = 2100 \text{ W} \cdot \text{s}^{1/2}/\text{m}^2$ , рассчитанное по начальным условиям эксперимента, а кривой 1 — рассчитанное по сигналу датчика. Полученный вольт-ваттный коэффициент составил  $S_0 = 11 \text{ mV/W}$ . Кривыми 2 на рис. 1, а и б



**Рис. 1.** Электрический сигнал датчика (а) и приведенный тепловой поток (б) при калибровке по отраженной ударной волне до измерений в воздухе (1) и после измерений (2). 3 — сигнал датчика давления.

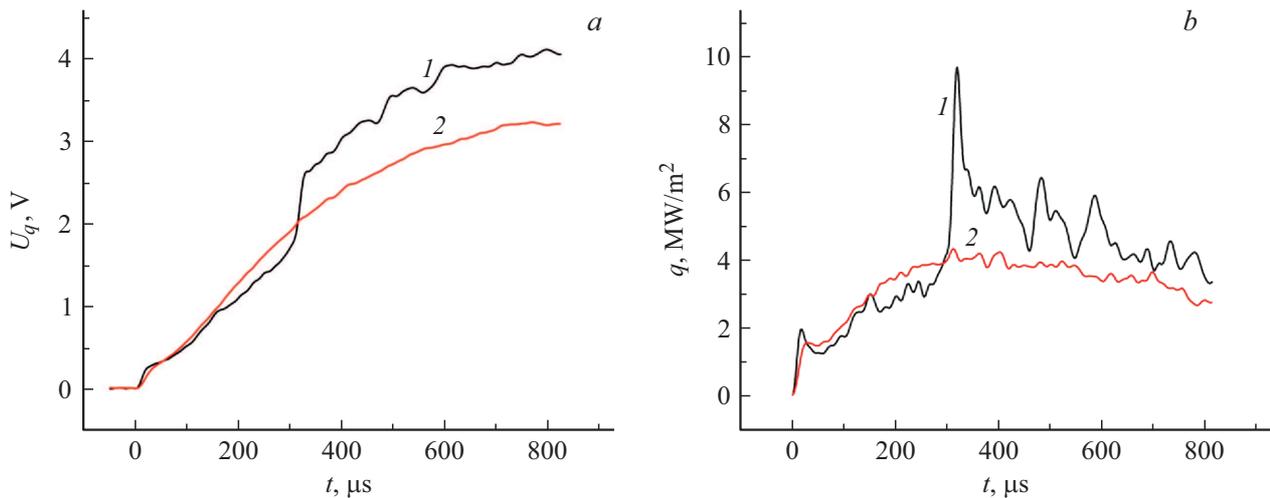
показаны соответственно электрический сигнал и приведенный тепловой поток при повторной калибровке после двух измерений из основной серии, когда рабочим газом являлся воздух, а датчик был установлен на расстоянии 0.5 mm перед цилиндрическим препятствием. В этом случае среднее значение теплового потока составило  $\sim 4 \text{ MW/m}^2$  при общей длительности нагрева  $\sim 1 \text{ ms}$ .

В основной серии экспериментов проводилось измерение теплового потока в передней отрывной зоне при обтекании цилиндрического препятствия сверхзвуковым потоком воздуха. Особенностью газодинамической структуры течений данного типа является образование протяженной области, внутри которой формируются подковообразные вихревые структуры, что приводит к более чем десятикратному увеличению теплового потока по сравнению с невозмущенным пограничным слоем [6]. Эксперименты проводились на прямоугольной ударной трубе ФТИ им. А.Ф. Иоффе с размером канала  $50 \times 150 \text{ mm}$ . Внутри камеры низкого давления горизонтально, боковой поверхностью навстречу набегающему потоку был установлен цилиндр диаметром 12 mm. Датчик теплового потока устанавливался на различных расстояниях перед цилиндром заподлицо с внутренней поверхностью трубы и был подключен через промежуточный усилитель на базе инструментального усилителя INA128 с коэффициентом  $\times 200$  без дополнительного фильтра. Для повышения пространственного разрешения анизотропный термоэлемент был ориентирован короткой стороной навстречу потоку. Его электрический сигнал регистрировался с помощью осциллографа Tektronix TDS 2014 с временным разрешением  $4 \cdot 10^{-7} \text{ s}$ . Обработка измерений проводилась согласно методике [7]. Начальное давление воздуха в камере низкого давления составляло  $p_1 = 10 \text{ Torr}$ , число Маха падающей волны  $M_1 = 4.8$ . Рассчитанные по начальным условиям эксперимента скорость потока за ударной волной  $V_2 = 1350 \text{ m/s}$ , плотность  $\rho_2 = 0.087 \text{ kg/m}^3$  и темпе-

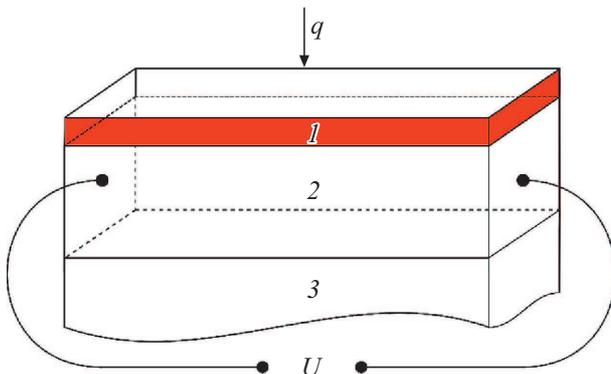
ратура  $T_2 = 1465 \text{ K}$ , число Маха  $M_2 = 1.8$ , рассчитанное по диаметру цилиндра число Рейнольдса  $Re_2 = 2.5 \cdot 10^4$ .

На рис. 2 показаны электрический сигнал и рассчитанный по нему тепловой поток при установке датчика на расстоянии 0.5 mm от цилиндрического препятствия в области максимальных значений тепловых потоков. Кривой 1 показаны результаты первого измерения датчиком без дефектного слоя на рабочей поверхности. В силу нестационарного характера течения колебания теплового потока имеют большую амплитуду ( $\sim 1 \text{ MW/m}^2$ ) и достаточно высокую частоту ( $\sim 10 \text{ kHz}$ ). Кривой 2 показаны результаты контрольного эксперимента, проведенного после нескольких измерений на различных расстояниях от цилиндра. Видно, что электрический сигнал сильно сглажен, а на кривой теплового потока отсутствуют высокочастотные пульсации, что указывает на появление дефектного слоя на рабочей поверхности анизотропных термоэлементов. Близкие средние значения теплового потока свидетельствуют о малом изменении вольт-ваттного коэффициента датчика после проведенных измерений.

Аналогичная ситуация наблюдается при повторной калибровке, проведенной сразу после эксперимента с измерением интенсивных тепловых потоков (кривые 2 на рис. 1). Время реакции заметно увеличилось, а амплитуда сигнала уменьшилась по сравнению с калибровкой нового датчика без дефектного слоя. Рассчитанная по сигналу датчика кривая приведенного теплового потока стала более гладкой, на ней нет участка, соответствующего стационарной фазе теплообмена. Проведенные численные расчеты, аналогичные [4], показали, что данное увеличение времени реакции на импульсный нагрев соответствует толщине дефектного слоя  $< 1 \mu\text{m}$ . Необходимо отметить, что ухудшение динамических характеристик будет сильнее проявляться при измерениях с малым характерным временем, например при калибровке по отраженной ударной волне.



**Рис. 2.** Электрический сигнал датчика (а) и тепловой поток (б) при первом (1) и повторном (2) измерении теплового потока в передней отрывной зоне перед цилиндром.



**Рис. 3.** Структура датчика теплового потока. 1 — дефектный слой с нарушенной монокристаллической структурой висмута, 2 — неповрежденная часть анизотропного термоэлемента, 3 — поверхность модели.

Проведенные эксперименты показали влияние плотности теплового потока на изменение динамических характеристик датчика. Многократные измерения на больших расстояниях от цилиндрического препятствия, где тепловой поток соизмерим со значением в невозмущенном турбулентном пограничном слое ( $\sim 500 \text{ kW/m}^2$ ), не привели к ухудшению динамических характеристик, что свидетельствует о пренебрежимо малой толщине дефектного слоя или его отсутствии. В то же время многократное повторение экспериментов на малых расстояниях, где тепловой поток максимален и достигает величины  $\sim 10 \text{ MW/m}^2$ , приводило к постепенному ухудшению динамических характеристик датчика, а следовательно, к нарастанию толщины дефектного слоя. Шлифовка рабочей поверхности анизотропных термоэлементов наждачной бумагой зернистостью P2500 с промежуточными калибровками показала, что датчик постепенно восстанавливал исходные динамические характеристики, а

значит, толщина дефектного слоя уменьшалась. Следует иметь в виду, что при этом происходит постепенное уменьшение толщины анизотропных термоэлементов и должно учитываться при расчете теплового потока. В экспериментах с максимальным тепловым воздействием температура рабочей поверхности анизотропных термоэлементов не превышала  $320 \text{ K}$ , что значительно меньше температуры плавления висмута  $544 \text{ K}$ . В силу большого количества неконтролируемых факторов воздействия установить механизм нарушения монокристаллической структуры висмута в данных условиях без привлечения детального анализа весьма затруднительно.

Электрический сигнал датчика на анизотропных термоэлементах в одномерном приближении пропорционален отношению разности температур на его рабочей и тыльной поверхности к его толщине при условии, что генерация термоэдс происходит во всем объеме:  $U(t) \sim (T_h - T_0)S_0/h$ , где  $S_0$  — вольт-ваттный коэффициент [2]. Преобразование монокристаллического висмута в тонком приповерхностном слое внутри термоэлемента в структуру, где не возникает термоэдс, переносит верхнюю границу области генерации в глубину термоэлемента (рис. 3) и уменьшает толщину  $h$ . Наличие такого слоя с заметным тепловым сопротивлением приводит к увеличению времени реакции на тепловое воздействие и уменьшению градиентов температуры вблизи верхней границы области генерации. В итоге это выражается в искажении рассчитываемого теплового потока и его заметном отличии от действующего на рабочую поверхность датчика.

Проведенные эксперименты показали, что при измерении интенсивных тепловых потоков ( $> 1 \text{ MW/m}^2$ ) в ударных трубах в атмосфере воздуха возможно образование дефектного слоя толщиной  $< 1 \mu\text{m}$  вблизи рабочей поверхности анизотропных термоэлементов из монокристалла висмута, не участвующего в генерации

термоэдс. Это приводит к снижению динамических характеристик и невозможности регистрации высокочастотных составляющих теплового потока. Для контроля состояния рабочей поверхности датчика необходима периодическая калибровка датчика по отраженной ударной волне. При многократных измерениях, сопровождающихся образованием дефектного слоя и его периодическим удалением путем шлифовки рабочей поверхности, толщина датчика может заметно уменьшаться. Для корректного учета изменения толщины необходима периодическая калибровка по отраженной ударной волне и коррекция вольт-ваттного коэффициента.

### Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 23-29-00286.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] S.Z. Sapozhnikov, V.Yu. Mityakov, A.V. Mityakov, *Heatmetry. The science and practice of heat flux measurement* (Springer International Publ., 2020).
- [2] П.А. Попов, Н.А. Монахов, Т.А. Лапушкина, С.А. Поняев, *ЖТФ*, **92** (9), 1334 (2022). DOI: 10.21883/JTF.2022.09.52924.54-22 [P.A. Popov, N.A. Monakhov, T.A. Lapushkina, S.A. Poniaev, *Tech. Phys.*, **67** (9), 1144 (2022). DOI: 10.21883/TP.2022.09.54677.54-22].
- [3] P.A. Popov, V.A. Sakharov, T.A. Lapushkina, S.A. Poniaev, N.A. Monakhov, *Fluid Dyn.*, **58** (4), 779 (2023). DOI: 10.1134/S0015462823601092
- [4] P.A. Popov, S.A. Poniaev, V.A. Sakharov, B.I. Reznikov, N.A. Monakhov, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **1697**, 012227 (2020). DOI: 10.1088/1742-6596/1697/1/012227
- [5] П.А. Попов, Н.А. Монахов, Т.А. Лапушкина, С.А. Поняев, Р.О. Куракин, *Письма в ЖТФ*, **48** (20), 7 (2022). DOI: 10.21883/PJTF.2022.20.53688.19297 [P.A. Popov, N.A. Monakhov, T.A. Lapushkina, S.A. Poniaev, R.O. Kurakin, *Tech. Phys. Lett.*, **48** (10), 46 (2022). DOI: 10.21883/TPL.2022.10.54798.19297].
- [6] O.R. Tutty, G.T. Roberts, P.H. Schuricht, *J. Fluid Mech.*, **737**, 19 (2013). DOI: 10.1017/jfm.2013.541
- [7] 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].