

03;12

## Измерение теплового потока анизотропным термоэлементом в импульсных процессах

© П.А. Попов, Б.И. Резников, В.А. Сахаров, А.С. Штейнберг

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург  
Институт химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, Москва  
E-mail: boris.reznikov@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 5 августа 2010 г.

В рамках одномерной модели анизотропного термоэлемента получено соотношение, связывающее электрический сигнал с изменением температуры рабочей поверхности при импульсной тепловой нагрузке. Проведена обработка сигнала датчика из анизотропного монокристалла висмута, находящегося на стальной пластине в импульсном сверхзвуковом потоке. Выполнено сравнение результатов расчета теплового потока по сигналу этого датчика с данными прямого измерения теплового потока.

В анизотропном термоэлементе градиент температуры создает электрическое поле в направлении, не совпадающем с направлением теплового потока. Рассмотрим пластинку, вырезанную из анизотропного материала под некоторым углом к кристаллографическим осям. Длина и толщина термоэлемента соответственно равны  $L$  и  $h$  (рис. 1). Рабочая поверхность термоэлемента  $y = 0$  нагрета до температуры  $T_0$ , а его тыльная поверхность  $y = h$  имеет температуру  $T_h$ . Составляющая термоэлектрического поля  $E_x$  в направлении длины термоэлемента, согласно [1], выражается соотношением

$$E_x = -\frac{1}{h} \int_0^h \alpha_{xy} \frac{dT}{dy} dy = \alpha_{xy} \frac{T_0 - T_h}{h}, \quad (1)$$

где  $\alpha_{xy}$  — недиагональная компонента тензора термоэдс.

Как правило, в литературе [2] рассматривается случай, когда термоэлемент работает в стационарном тепловом режиме. При отсутствии внешней электрической цепи напряжение на торцах термоэлемента  $U$

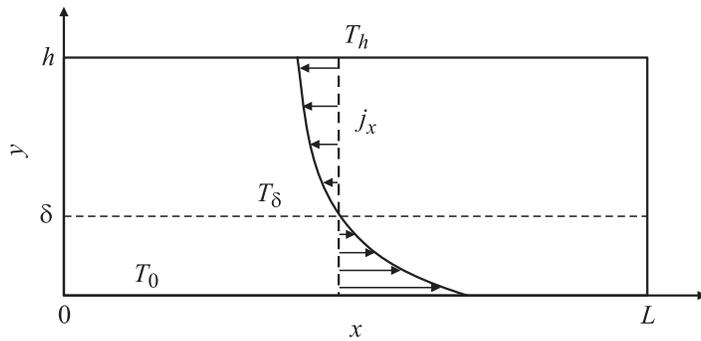


Рис. 1. Схема анизотропного элемента.

(сигнал теплового датчика) равно его ЭДС — работе сторонних (неэлектрических) сил по перемещению единичного заряда

$$U = \varepsilon = LE_x. \quad (2)$$

В экспериментальных исследованиях газодинамических процессов анизотропный термоэлемент применяется в качестве теплового датчика. При импульсной тепловой нагрузке в термоэлементе возникает переменный градиент температуры, что порождает в нем круговой электрический ток, поддерживающий однородное распределение потенциала в направлении оси  $y$  (рис. 1). Работу, затрачиваемую на перемещение заряда внутри термоэлемента, можно отнести к внутренним потерям в термоэлементе и сопоставить ей некоторое падение напряжения  $U_{in}$ . Тогда сигнал датчика  $U$  будет равен

$$U = \varepsilon - U_{in}. \quad (3)$$

Оценим величину  $U_{in}$ , предполагая, что электрическое поле в термоэлементе устанавливается мгновенно, а тепловые эффекты при протекании электрического тока пренебрежимо малы. Это позволяет рассматривать тепловые и электрические явления независимо друг от друга. Считая  $L \gg h$ , пренебрежем краевыми эффектами и составяющей электрического тока  $j_y$  в направлении теплового потока. Пусть  $y = \delta$  является линией, разделяющей области, в которых электрический ток  $j_x$  изменяет свое направление (рис. 1). Поскольку в области

$0 < y < \delta$  происходит перемещение заряда против внешнего поля  $E_x$ , то оценку внутренних потерь следует проводить для этого слоя:

$$U_{in} = R_\delta I_\delta. \quad (4)$$

Здесь  $R_\delta$  и  $I_\delta$  — сопротивление слоя и суммарный ток, проходящий через этот слой. Составляющая плотности тока  $j_x$  бесконечно длинной пластины, согласно обобщенному закону Ома, имеет вид

$$j_x = \frac{\alpha_{xy}}{\rho_x} \left( \frac{T_0 - T_h}{h} + \frac{dT}{dy} \right), \quad \rho_x = \frac{\sigma_{yy}}{\sigma_{xx}\sigma_{yy} - \sigma_{xy}^2}, \quad (5)$$

где  $\rho_x$  — удельное сопротивление в направлении оси  $x$ ,  $\sigma_{ik}$  — компоненты тензора электропроводности. С учетом (5) выражение (4) примет вид

$$U_{in} = \frac{L\rho_x}{\delta} \int_0^\delta \frac{\alpha_{xy}}{\rho_x} \left( \frac{T_0 - T_h}{h} + \frac{dT}{dy} \right) dy = \alpha_{xy}L \left( \frac{T_0 - T_h}{h} + \frac{T_\delta - T_0}{\delta} \right),$$

где  $T_\delta$  — температура на глубине  $y = \delta$ . Подставляя полученное выражение в (3) и учитывая равенство (1), находим напряжение на торцах термоэлемента

$$U = \alpha_{xy}L \frac{T_0 - T_\delta}{\delta}. \quad (6)$$

Приравняв нулю соотношение (5), находим условие для определения толщины слоя  $\delta$  с током одного направления

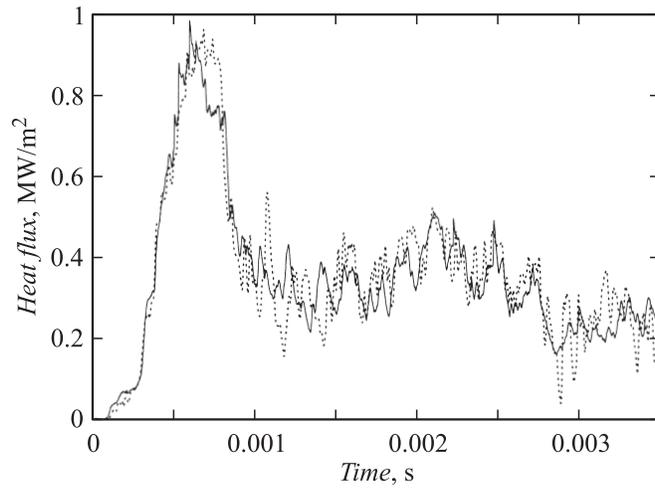
$$\left. \frac{dT}{dy} \right|_{y=\delta} = \frac{T_h - T_0}{h}. \quad (7)$$

Из соотношения (6) следует, что сигнал теплового датчика  $U$  определяется разностью температуры рабочей поверхности  $T_0$  и температуры  $T_\delta$  внутри термоэлемента на глубине  $y = \delta$ . Это позволяет при неравномерном распределении температуры в термоэлементе формально считать слой  $0 \leq y \leq \delta$  эффективной толщиной зоны генерации.

На практике восстановление изменения температуры рабочей поверхности осуществляется методом последовательных приближений

$$T_0^{i+1}(t) = \delta^i \frac{U(t)}{\alpha_{xy}L} + T_\delta^i(t), \quad (8)$$

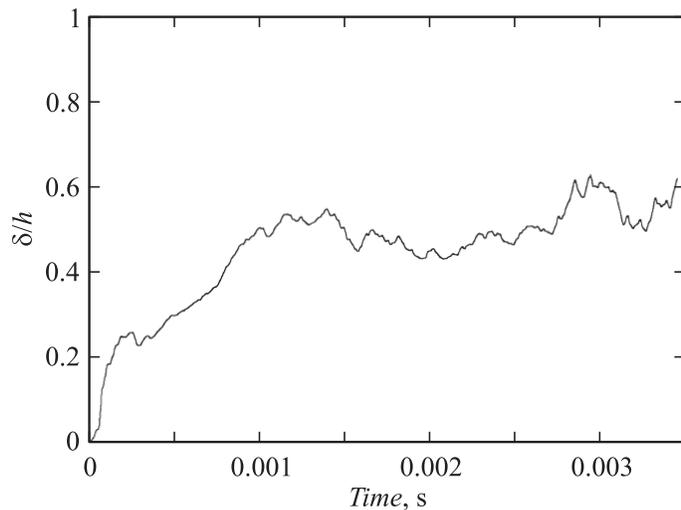
где  $i$  — номер итерации, причем в качестве первого приближения  $T_0(t)$  используется зависимость температуры, рассчитанная по сигналу гради-



**Рис. 2.** Зависимость теплового потока к поверхности датчиков от времени в эксперименте по обтеканию пластины [4]. Сплошная линия — данные прямого измерения теплового потока датчиком ALTP [6]; пунктирная — результаты расчета теплового потока по сигналу ГДТП [5].

ентного датчика теплового потока (ГДТП). Используя в качестве тепловой модели одномерное нестационарное уравнение теплопроводности для полупространства, можно по найденному значению температуры рабочей поверхности датчика рассчитать тепловой поток [3].

Аналогичная тепловая модель применялась при расчете теплового потока на пластине, обтекаемой импульсным гиперзвуковым потоком [4], однако при обработке сигнала ГДТП пренебрегалось падением напряжения, обусловленного наличием вихревых токов, и сигнал датчика считался пропорциональным разности температур  $T_0 - T_h$ . На пластине располагались два тепловых датчика ГДТП на основе анизотропного кристалла висмута [5] толщиной  $2 \cdot 10^{-4}$  м и датчик the Atomic Layer Thermo Pile (ALTP, фирма FORTECH HTS GmbH, Германия) толщиной  $\sim 5 \cdot 10^{-7}$  м [6]. В силу различия толщин датчик ALTP использовался для непосредственного измерения теплового потока, а ГДТП — в качестве измерителя разности температур. Сравнение результатов измерений, выполненных этими датчиками, показало удо-



**Рис. 3.** Зависимость от времени относительной толщины зоны генерации датчика ГДП в эксперименте по обтеканию пластины [4].

влетворительное совпадение тепловых потоков до времен менее 1 ms от начала процесса и значительное расхождение при больших временах.

На рис. 2 показано сравнение сигнала АЛТР с результатом расчета теплового потока по сигналу ГДП, обработанному в соответствии с выражением (6). Восстановление температуры рабочей поверхности проводилось методом последовательных приближений (8). Сплошная линия — данные прямого измерения теплового потока датчиком АЛТР; пунктирная — результаты расчета теплового потока по сигналу ГДП. Обе линии хорошо совпадают в интервале времени 3.5 ms от начала процесса.

На рис. 3 показано изменение во времени относительного размера зоны генерации для данного опыта. Видно, что в среднем толщина этой зоны составляет примерно половину толщины термоэлемента.

Полученные результаты позволяют утверждать, что предложенный способ обработки сигнала термоэлемента в одномерном приближении показывает хорошее совпадение с результатами измерения теплового

потока. Сравнительно простой алгоритм программной реализации дает экспериментаторам удобный инструмент для исследования.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 08-08-00414а) и Федеральной целевой программы „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ (гос. контракт № 02.740.11.0201).

Авторы выражают благодарность С.В. Бобашеву и Н.П. Менде за полезные обсуждения.

## Список литературы

- [1] *Самойлович А.Г., Слипченко В.П.* // ФТП. 1975. Т. 9. № 3. С. 594–596.
- [2] *Снарский А.А., Пальти А.М., Ащеулов А.А.* // ФТП. 1997. Т. 31. № 11. С. 1281–1298.
- [3] *Карслоу Г., Егер Д.* Теплопроводность твердых тел. М.: Наука, 1964. 487 с.
- [4] *Бобашев С.В., Менде Н.П., Попов П.А., Резников Б.И., Сахаров В.А., Сапожников С.З., Митяков В.Ю., Митяков А.В., Бунтин Д.А., Маслов А.А., Кнаусс Х., Редигер Т.* // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. В. 5. С. 36–42.
- [5] Patent Number: EP 1223411. Universal sensor for measuring shear stress, mass flow or velocity of 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.
- [6] *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.