

01.1

## **Влияние теплофизических свойств подложки анизотропного термоэлемента на величину термоэдс в стационарном тепловом режиме**

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

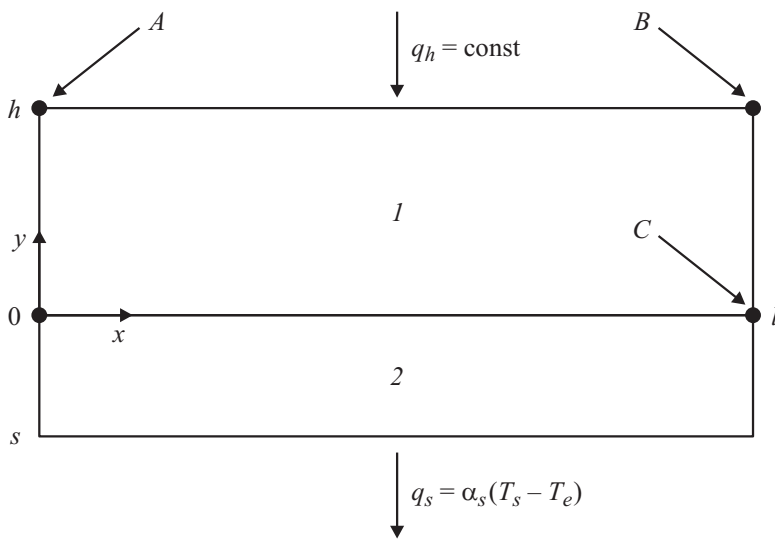
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург  
E-mail: pavel.popov@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 29 ноября 2015 г.

Выполнено численное моделирование тепловых и термоэлектрических процессов в анизотропных термоэлементах, расположенных на подложках из различных материалов. Показано, что при неизменном тепловом потоке, проходящем через термоэлемент, теплофизические свойства подложки и коэффициент теплоотдачи на ее тыльной поверхности существенно влияют на распределение температуры и величину генерируемой термоэдс.

Анизотропные термоэлементы широко применяются в генераторах термоэдс, устройствах охлаждения [1,2], тепловых датчиках [3,4] и приемниках лучистых потоков [5]. Большое количество работ посвящено исследованию влияния анизотропии свойств материала термоэлемента на генерируемую им термоэдс [6]. Традиционно считается, что влияние анизотропии теплопроводности пренебрежимо мало. Данное утверждение можно считать справедливым только для определенных граничных условий на поверхности термоэлемента, при которых распределение температуры близко к одномерному. В данной работе анализируется влияние анизотропии теплопроводности, когда термоэлементы применяются в качестве тепловых датчиков. Это определяет тип граничных условий и выбор материала подложки, на которой закреплен термоэлемент.

Рассмотрим сборку, состоящую из анизотропного термоэлемента (1) прямоугольной формы длиной  $l$  и толщиной  $h$ , расположенного на непроводящей подложке (2) толщиной  $s$  (рис. 1). Через рабочую поверхность термоэлемента  $y = h$  проходит постоянный тепловой поток плотностью  $q_h$ , боковые поверхности термоэлемента и подложки  $x = 0$



**Рис. 1.** Расчетная область: 1 — анизотропный термоэлемент, (2) — подложка, A, B и C — точки регистрации генерируемой термоэдс.

и  $x = l$  теплоизолированы. На тыльной поверхности подложки  $y = -s$  осуществляется конвективный теплообмен  $q_s = \alpha_s(T_s - T_e)$ , где  $\alpha_s$  — коэффициент теплоотдачи,  $T_s$  и  $T_e$  — температура подложки и окружающей среды. На всех поверхностях термоэлемента задается условие электроизоляции. Генерируемая термоэдс регистрируется между точками A и B, расположенных на рабочей поверхности  $y = h$ .

Стационарное распределение температуры и электрического потенциала находится из решения системы уравнений теплопроводности и электропроводности [5].

$$\operatorname{div} j = 0,$$

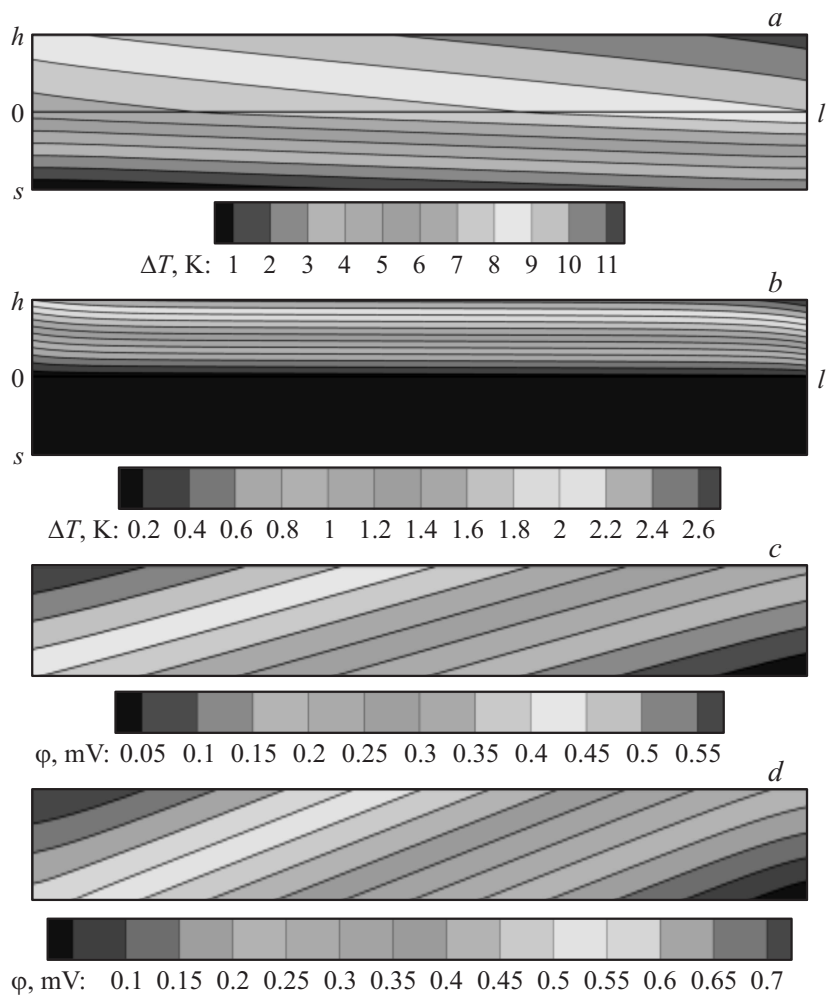
$$\operatorname{div} q = 0,$$

где  $j = -\sigma \nabla \varphi - \sigma \alpha \nabla T$ ,  $q = -\lambda \nabla T$  — плотность электрического тока и потока тепла,  $T$  — температура,  $\varphi$  — электрический потенциал,  $\sigma$ ,  $\alpha$ ,  $\lambda$  — тензоры электропроводности, термоэдс и теплопроводности. Учитывается анизотропия теплопроводности, электропроводности и термоэдс материала термоэлемента, свойства подложки изотропны.

Физические свойства материалов задавались постоянными. В модели не учитывается выделение теплоты Джоуля, Томсона и Бриджмена в силу их пренебрежимо малого влияния на распределение температуры. Численное решение системы уравнений с заданными граничными условиями проведено в пакете COMSOL Multiphysics в коэффициентной форме.

Для верификации расчетной модели термоэлемента использовались экспериментальные данные, полученные при стационарной калибровке градиентного датчика теплового потока (ГДТП) [3]. Датчик размером в плане  $2.2 \times 2.2$  mm представлял собой батарею из 10 последовательно соединенных термоэлементов из висмута длиной  $l = 2.2$  mm и толщиной  $h = 0.2$  mm, закрепленных на подложке из слюды. Калибровка проводилась на специальном стенде при заданной плотности теплового потока  $q_h = 100$  kW/m<sup>2</sup>, проходящего через рабочую поверхность датчика. Выходной сигнал ГДТП составил  $U = 6.8$  mV. По результатам расчета, соответствующего условиям данного эксперимента, разность потенциалов между точками *A* и *B* составила  $\Delta\varphi_{AB} = 0.43$  mV, а суммарная разность потенциалов батареи  $\Delta\varphi = 4.3$  mV. Поскольку в силу анизотропии свойств материала термоэлемента изопотенциальные линии имеют некоторый наклон относительно рабочей поверхности, то максимальная разность потенциалов создается между диагонально расположенными точками *A* и *C* (рис. 1). В этом случае разность потенциалов батареи составила  $\Delta\varphi = 6.5$  mV. Отличие результатов расчета от экспериментальных данных не превышает 35%, и полученные в тестовом расчете результаты можно признать удовлетворительно совпадающими с опытными данными.

Рассмотрим влияние теплофизических свойств подложки на распределение температуры в термоэлементе и генерируемую им термоэдс. Через рабочую поверхность термоэлемента проходит постоянный тепловой поток  $q_h = 10^5$  kW/m<sup>2</sup>. Рассмотрим два случая, когда температуропроводность  $a = \lambda/C\rho$  (здесь  $C$  — теплоемкость,  $\rho$  — плотность) термоэлемента и подложки близки  $a_{(1)} \approx a_{(2)}$  и значительно различаются  $a_{(1)} \ll a_{(2)}$ . Первый случай соответствует расположению термоэлемента на теплоизоляционном материале, например слюде с  $a \sim 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s, а второй — расположению на металле, например, на меди с  $a \sim 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s. Рассматриваемый диапазон теплофизических свойств материала подложки соответствует возможным условиям использования теплового датчика на анизотропных термоэлементах.

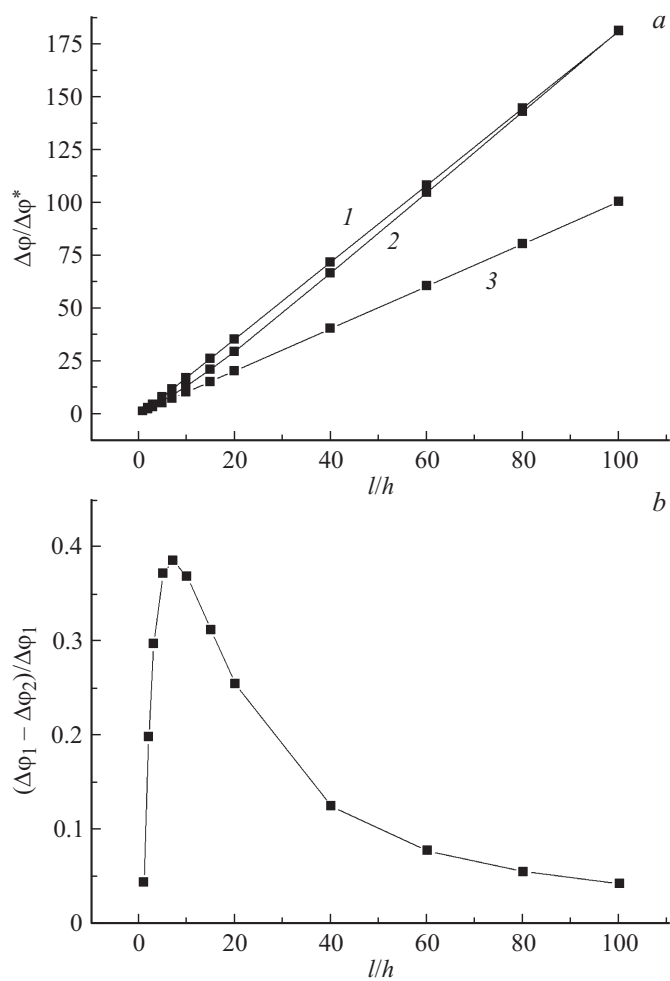


**Рис. 2.** Поле температуры (*a*, *b*) в сборке анизотропный термоэлемент — подложка и поле потенциала в термоэлементе (*c*, *d*) в случае подложки с низкой (*a*, *c*) и высокой теплопроводностью (*b*, *d*).

На рис. 2 показаны рассчитанные поля температуры и электрического потенциала в случае термоэлемента из висмута с соотношением сторон  $l/h = 10$  для рассматриваемых вариантов материала подложки. В качестве точки отсчета использовалась минимальная температура во всей расчетной области. Видно, что при одинаковой плотности теплового потока  $q_h$  распределение температуры различно. В случае подложки с малой теплопроводностью во всем термоэлементе изотермы имеют практически одинаковый наклон относительно рабочей поверхности, определяемый анизотропией теплопроводности. Подложка с большой теплопроводностью существенно влияет на распределение температуры в термоэлементе, и оно становится близко к одномерному. В этом случае влияние анизотропии теплопроводности сказывается только вблизи его торцов. Различается также и распределение теплового потока  $q_0$  на тыльной поверхности термоэлемента  $y = 0$ , в случае подложки с большой теплопроводностью оно существенно неоднородно. Поскольку поля температуры различны, то будут отличаться направление и величина вектора градиента температуры, определяющего термоэлектрическое поле  $\mathbf{E}^T = -\alpha \nabla T$  (рис. 2). В силу анизотропии термоэда изменится соотношение между его продольной и поперечной компонентами, что в итоге приводит к изменению суммарной термоэда, генерируемой термоэлементом.

Рассмотрим теперь влияние отношения длины к толщине термоэлемента  $l/h$  на генерируемую термоэда. Остальные параметры расчета аналогичны предыдущему. На рис. 3, *a* показана зависимость  $\Delta\varphi/\Delta\varphi^*$  от отношения сторон  $l/h$ . В качестве масштаба выбрана термоэда квадратного термоэлемента единичной длины  $\Delta\varphi^*$ . Линии 1 и 2 соответствуют расположению термоэлемента на подложке с высокой и низкой теплопроводностью соответственно. Видно, что при одинаковых геометрических размерах в силу различного распределения температуры различается и величина термоэда. На рис. 3, *b* показано относительное изменение термоэда  $(\Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2)/\Delta\varphi_1$  на подложках с различной теплопроводностью. Видно, что при практически важном соотношении сторон  $l/h = 10-20$  отличие генерируемой термоэда достигает 40%.

В работе [7] предлагается рассчитывать генерируемую термоэда по формуле  $\Delta\varphi = q_h \Delta\varphi^* l$ , где  $\Delta\varphi^*$  — термоэда термоэлемента единичной длины,  $l$  — длина рабочей поверхности термоэлемента. Линия 3 на рис. 3 соответствует расчету генерируемой термоэда по этой формуле. Видно, что данный способ расчета дает существенные погрешности в



**Рис. 3.** *a* — зависимость генерируемой термоэдс  $\Delta\varphi/\Delta\varphi^*$  от отношения сторон  $l/h$  термоэлемента при постоянном проходящем через него тепловом потоке. Линии 1 и 2 — случай подложки с высокой и низкой теплопроводностью, линия 3 — расчет термоэдс по формуле  $\Delta\varphi = q_n S \Delta\varphi^*$ . *b* — относительное изменение термоэдс  $(\Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2)/\Delta\varphi_1$  для различных соотношений сторон термоэлемента  $l/h$  и расположенных на подложках с различными теплофизическими свойствами.

случае достаточно длинных термоэлементов, поскольку с увеличением отношения  $l/h$  изменяется вклад продольной и поперечной термоэдс. Кроме того данный подход не позволяет учесть влияние теплофизических свойств материала подложки на распределение температуры в термоэлементе и соответственно генерируемую им термоэдс.

Необходимо также отметить, что для подложки с малой температуропроводностью при неизменной плотности теплового потока  $q_n$  генерируемая термоэдс существенно зависит от интенсивности теплообмена на тыльной поверхности. При соотношении сторон термоэлемента  $l/h = 10$  и изменении коэффициента теплоотдачи  $\alpha_s = 10-1000 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  уменьшение термоэдс не превышает 5%, а при  $l/h = 100$  достигает 30%. Это также является следствием перестроения поля температуры в силу анизотропии теплопроводности материала термоэлемента. Для подложек с большой температуропроводностью данный эффект не наблюдается.

Результаты расчетов показывают, что при одном и том же тепловом потоке, проходящем через термоэлемент, теплофизические свойства материала подложки и интенсивность теплообмена на ее тыльной поверхности существенно влияют на распределение температуры и генерируемую термоэдс. При использовании термоэлементов в качестве генераторов термоэдс расположение их на подложках с высокой температуропроводностью вместо изоляционных материалов позволяет увеличить до 40% генерируемую термоэдс. В случае тепловых датчиков на анизотропных термоэлементах при высоких требованиях к точности измерений стационарная калибровка датчика должна проводиться на подложке с теплофизическими свойствами, близкими к свойствам поверхности, на которой предполагается проводить измерения. Также следует отметить, что датчики с различными размерами термоэлементов необходимо калибровать индивидуально, в силу различного вклада продольной и поперечной термоэдс. Полученные результаты применимы к различным материалам, обладающим анизотропией теплопроводности и термоэдс.

## Список литературы

- [1] *Анатычук Л.И.* Термоэлементы и термоэлектрические устройства. Справочник. Киев: Наук. думка, 1979. 768 с.
- [2] *Анатычук Л.И.* Термоэлектричество. Т. 2. Термоэлектрические преобразователи энергии. Киев: Институт термоэлектричества, 2003. 376 с.

- [3] *Andrey V. Mityakov, Sergey Z. Sapozhnikov, Vladimir Y. Mityakov, Andrei A. Snarskii, Maxim I. Zhenirovsky, Juha J. Pyrhönen* // *Sen. Actuators, A: Physical*. 2012. V. 176. P. 1–9.
- [4] *Сапожников С.З., Митяков В.Ю., Митяков А.В.* Основы градиентной теплотометрии. СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2012. 203 с.
- [5] *Ащеулов А.А., Гуцул И.В.* // *ФТП*. 2006. Т. 40. В. 8. С. 995–1003.
- [6] *Снарский А.А., Пальти А.М., Ащеулов А.А.* // *ФТП*. 1997. Т. 31. В. 11. С. 1281–1298.
- [7] *Королюк С.Л., Пилат И.М.* и др. // *ФТП*. 1973. Т. 7. В. 4. С. 725–734.