



*Анатычук Л.И.*

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТЕПЛОМЕРА НА ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОТЫДЕЛЕНИЯ ЧЕЛОВЕКА

*Анатычук Л.И., Кобылянский Р.Р.  
(Институт термоэлектричества, ул. Науки, 1,  
Черновцы, 58029, Украина)*



*Кобылянский Р.Р.*

- *В работе приведены результаты исследований влияния термоэлектрического тепломера на точность определения тепловыделения человека методами компьютерного моделирования. Установлено, что минимизировать влияние термоэлектрического тепломера на определение тепловыделения человека можно при условии равенства коэффициентов теплообмена и коэффициентов излучения соответственно тепломера и поверхности кожи человека. В случае, когда эти теплофизические характеристики будут значительно отличаться, то погрешность в определении теплового потока тела человека может превышать 200%.*

#### **Введение**

*Общая характеристика проблемы.* Своевременная и качественная диагностика является залогом успешного лечения разных заболеваний человека. Для ее проведения важной является информация о тепловыделении человека, поскольку именно плотность теплового потока наиболее адекватно отображает степень выражения воспалительных процессов организма человека [1, 2]. Поэтому для диагностики заболеваний на ранних стадиях эффективным является измерение теплового потока тела человека. Перспективными для таких измерений являются термоэлектрические тепломеры, которые имеют высокую чувствительность, точность, быстроедействие, стабильность параметров в широком интервале рабочих температур и согласовываются с современной регистрационной аппаратурой [3, 4]. Указанные преимущества дают возможность использовать термоэлектрические тепломеры для диагностики здоровых и поврежденных участков организма человека [5-8].

Однако до сих пор не в полной мере исследована проблема воздействия термоэлектрического тепломера на точность измерения тепловых потоков с поверхности человека. Влияние тепломеров изучалось для случаев, когда перенос тепла тепломеров осуществлялся теплопроводностью от источников тепла [4]. Однако для живых объектов такая задача значительно усложняется, поскольку в каждом слое биологической ткани кровь переносит тепло и дополнительно выделяется тепло метаболизма [9, 10]. Решить эту задачу аналитически очень сложно, поэтому нужно использовать методы объектно-ориентированного компьютерного моделирования [11]. Кроме того, до сих пор неизвестно, какой может быть погрешность в определении теплового потока тела человека в случае, когда теплофизические характеристики термоэлектрического тепломера значительно отличаются от аналогичных характеристик биологической ткани. Таким образом, актуальной является проблема исследования влияния термоэлектрического тепломера на определение теплового потока и изменение температуры поверхности кожи человека при медико-биологических исследованиях.

*Целью данной работы* является определение погрешностей измерения теплового потока тела человека, связанных с влиянием термоэлектрического тепломера на объект исследования.

### Физическая, математическая и компьютерная модели биологической ткани находящейся в контакте с термоэлектрическим тепломером

Согласно физической модели (рис. 1) участок биологической ткани тела человека представляет собой структуру из трех слоев кожи (эпидермис 1, дермис 2, подкожный слой 3), внутренней ткани 4 и характеризуется теплопроводностью  $\kappa_i$ , удельной теплоемкостью  $C_i$ , плотностью  $\rho_i$ , скоростью перфузии крови  $\omega_i$ , плотностью крови  $\rho_b$ , теплоемкостью крови  $C_b$  и удельным тепловыделением  $q_{met}$  вследствие процессов метаболизма (табл. 1). Соответствующие слои биологической ткани 1 – 4 рассматриваются как объемные источники тепла  $q_i$ , где

$$q_i = q_{met} + \rho_b \cdot C_b \cdot \omega_i \cdot (T_b - T), \quad i=1..4., \quad (1)$$

Толщина каждого такого слоя составляет  $l_i$ . Температуры на границах слоев биологической ткани составляют  $T_4, T_5, T_6, T_7$  соответственно.

Термоэлектрический тепломер 5 представляет собой прямоугольный брусок толщиной  $l_5$ , характеризующийся коэффициентом теплопроводности  $\kappa$  и удельной теплоемкостью  $C$ .

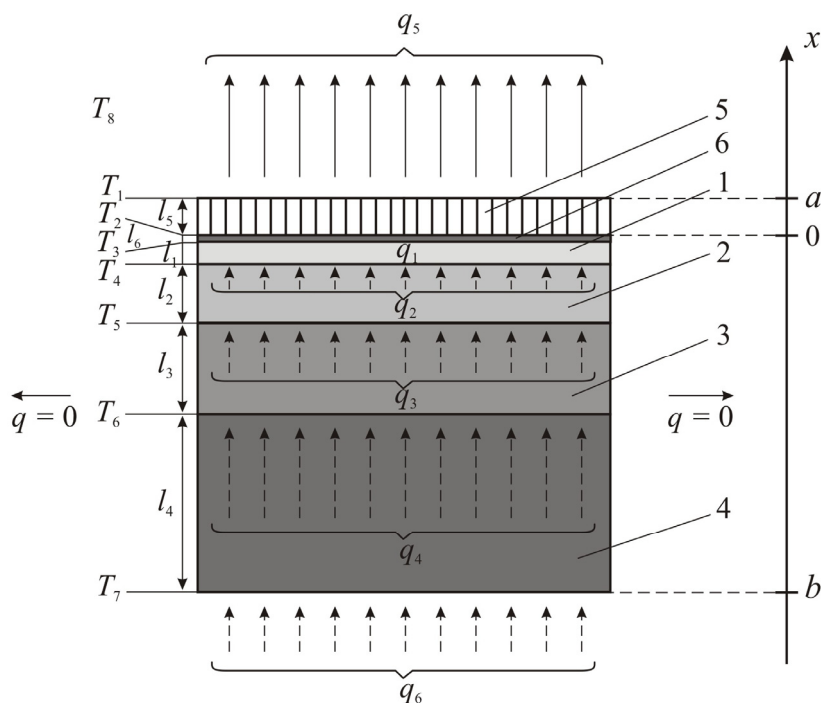


Рис. 1. Физическая модель биологической ткани находящейся в контакте с термоэлектрическим тепломером 1 – эпидермис, 2 – дермис, 3 – подкожный слой, 4 – внутренняя ткань, 5 – термоэлектрический тепломер, 6 – дополнительный слой, который характеризует тепловое сопротивление контакта термоэлектрического тепломера с поверхностным слоем кожи (эпидермисом).

Поверхностный слой участка кожи (эпидермис 1) с температурой  $T_3$  находится в состоянии теплообмена с термоэлектрическим тепломером 5 с температурой на поверхности контакта  $T_2$  (теплообмен кожи путем потовыделения не учитывается). Тепловое сопротивление контакта термоэлектрического тепломера 5 со слоем эпидермиса 1 учтено дополнительным слоем 6 толщиной  $l_6$  с тепловым сопротивлением  $R_m$ . Свободная поверхность тепломера 5 с температурой  $T_1$  находится в состоянии теплообмена с окружающей средой с температурой  $T_8$ , что учтено коэффициентом теплообмена  $\alpha_1$  и коэффициентом излучения  $\varepsilon_1$ . Удельный тепловой поток с поверхности термоэлектрического тепломера в окружающую среду составляет  $q_5$ , а удельный тепловой поток внутренних органов человека –  $q_6$ .

Таблица 1

Теплофизические свойства биологической ткани тела человека [9, 10]

Слои биологической ткани	Толщина (мм)	Удельная теплоемкость (Дж·кг <sup>-1</sup> ·К <sup>-1</sup> )	Скорость перфузии крови ткани (м <sup>3</sup> ·с <sup>-1</sup> ·м <sup>-3</sup> )	Теплопроводность (Вт·м <sup>-1</sup> ·К <sup>-1</sup> )	Плотность (кг·м <sup>-3</sup> )
Эпидермис	0.08	3590	0	0.24	1200
Дермис	2	3300	0.00125	0.45	1200
Подкожный слой	10	2500	0.00125	0.19	1000
Внутренняя ткань	30	4000	0.00125	0.5	1000

Плотность крови  $\rho_b = 1060 \text{ кг·м}^{-3}$ , теплоемкость крови  $C_b = 3770 \text{ Дж·кг}^{-1}·\text{К}^{-1}$ .

Поскольку физическая модель представляет собой участок биологической ткани из четверых слоев, причем в других соседних пластах происходят одинаковые биохимические процессы, то можем считать, что перетекание тепла вдоль кожи не происходит ( $q = 0$ ).

В случае отсутствия термоэлектрического тепломера 5 на коже конвективный теплообмен кожи с окружающей средой учитывается коэффициентом теплообмена  $\alpha_2$ , а теплообмен путем излучения –  $\varepsilon_2$ .

С целью определения воздействия термоэлектрического тепломера на тепловыделение человека было выполнено компьютерное моделирование путем использования пакета прикладных программ Comsol Multiphysics [11], что дает возможность проводить моделирование теплофизических процессов в биологических тканях с учетом кровообращения и метаболизма. Уравнение теплообмена в биологической ткани имеет следующий вид [9, 10]:

$$\rho \cdot C \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k \cdot \nabla T) + \rho_b \cdot C_b \cdot \omega_b \cdot (T_b - T) + q_{met}, \quad (2)$$

где  $\rho$  – плотность соответствующих слоев биологической ткани (кг/м<sup>3</sup>),  $C_b$  – удельная теплоемкость слоев биологической ткани (Дж/кг·К),  $\rho_b$  – плотность крови (кг/м<sup>3</sup>),  $C_b$  – удельная теплоемкость крови (Дж/кг·К),  $\omega_b$  – скорость кровообращения (1/с),  $T_b$  – температура крови человека (К), причем  $T_b = 310.15 \text{ К}$ ,  $q_{met}$  – количество тепла от метаболизма (Вт/м<sup>3</sup>).

Слагаемое в левой части уравнения (2) представляет собой скорость изменения тепловой энергии, которая содержится в единице объема биологической ткани. Три слагаемых в правой части этого уравнения представляют собой соответственно скорость изменения тепловой энергии за счет теплопроводности, перфузии и тепла метаболизма. Для данной упрощенной физической модели (рис. 1), тепло метаболизма принимается равным нулю, по сравнению с другими тепловыми потоками этого участка.

Для решения поставленной в данной работе задачи достаточно рассмотреть одномерную стационарную модель. Тогда уравнение (2) упрощается к виду (3):

$$\frac{d}{dx} \left( k \cdot \frac{dT}{dx} \right) + \rho_b \cdot C_b \cdot \omega_b \cdot (T_b - T) = 0. \quad (3)$$

Уравнение теплообмена в биологической ткани (3) решалось с соответствующими граничными условиями (4) методом конечных элементов, который используется в компьютерной программе Comsol Multiphysics (рис. 2):

$$\begin{cases} T|_{x=b} = 310.15 \text{ К}, \\ q|_{x=0, x=a} = \alpha \cdot (T_0 - T) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_0^4 - T^4), \end{cases} \quad (4)$$

где  $q$  – плотность теплового потока,  $T$  – абсолютная температура,  $T_0$  – температура окружающей среды,  $\alpha$  – коэффициент теплообмена,  $\varepsilon$  – коэффициент излучения,  $\sigma$  – постоянная Больцмана.

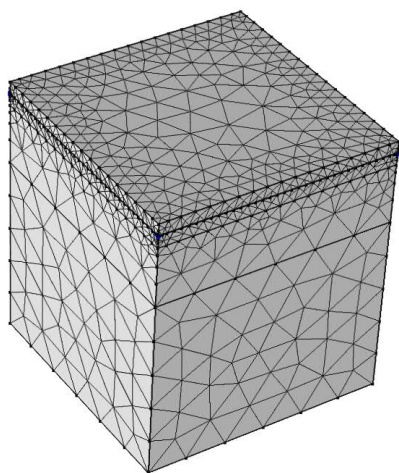


Рис. 2. Сетка метода конечных элементов.

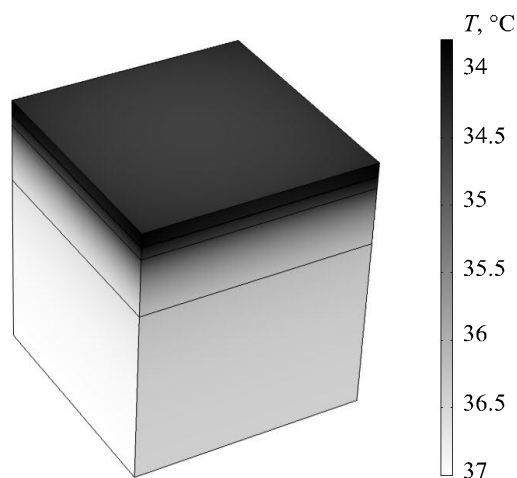


Рис. 3. Распределение температуры в биологической ткани, на поверхности которой находится термоэлектрический тепломер.

Компьютерным моделированием были получены распределения температуры в объеме биологической ткани тела человека и термоэлектрическом тепломере (рис. 3), а также построены изотермические поверхности и линии плотности теплового потока для этого участка (рис. 4).

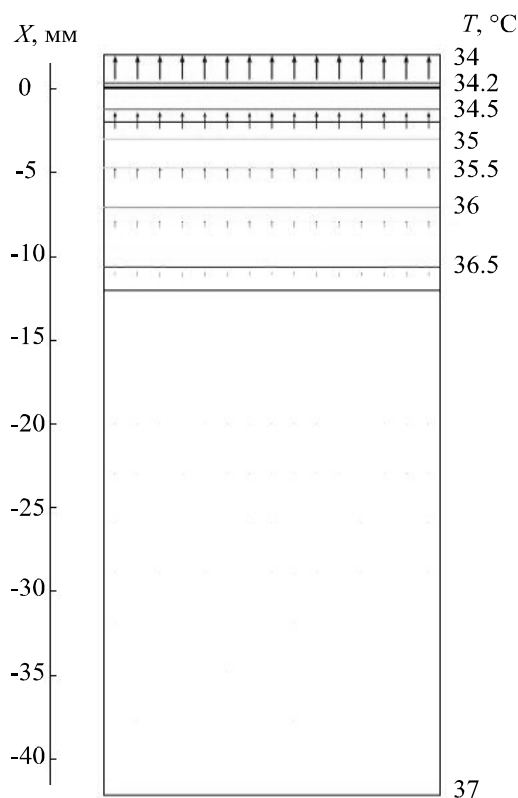


Рис. 4. Изотермические поверхности и линии плотности теплового потока в биологической ткани, на поверхности, которой находится термоэлектрический тепломер.

## Результаты компьютерного моделирования

С помощью компьютерного моделирования была установлена зависимость погрешностей в определении теплового потока тела человека  $\delta q$  от коэффициента теплообмена кожи  $\alpha_2$  при разных значениях коэффициента излучения  $\varepsilon_2$  (рис. 5) и от коэффициента излучения кожи  $\varepsilon_2$  при разных значениях коэффициента теплообмена кожи  $\alpha_2$  (рис. 6) для случая термоэлектрического тепломера с теплофизическими характеристиками  $\alpha_1 = 5.6 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ ,  $\varepsilon_1 = 0.7$ .

$\delta q$  – это разность тепловых потоков участка тела человека, имеющих место при наличии и отсутствии термоэлектрического тепломера на поверхности этого участка.

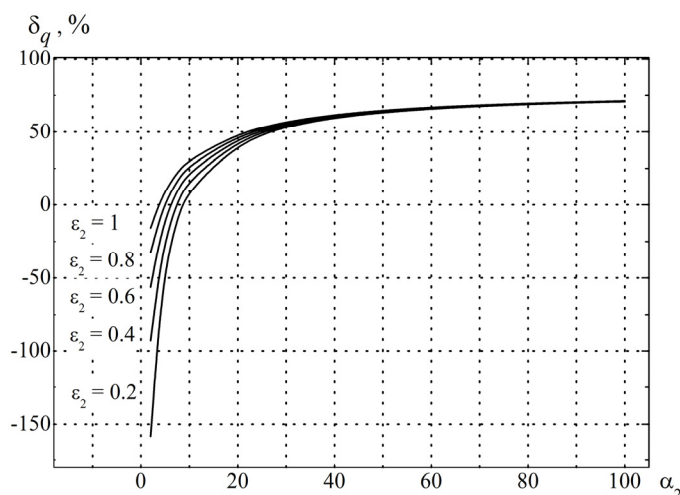


Рис. 5. Зависимость погрешности в определении теплового потока тела человека от коэффициента теплообмена кожи  $\alpha_2$  при разных значениях коэффициента излучения  $\varepsilon_2$  для случая термоэлектрического тепломера с параметрами  $\alpha_1 = 5.6 \text{ (Вт/м}^2\cdot\text{К)}$ ,  $\varepsilon_1 = 0.7$ .

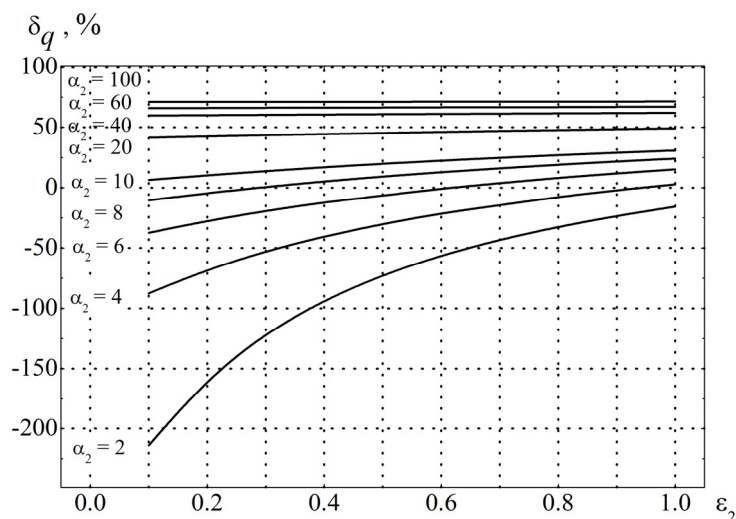


Рис. 6. Зависимость погрешности в определении теплового потока тела человека от коэффициента излучения  $\varepsilon_2$  при разных значениях коэффициента теплообмена кожи  $\alpha_2$  для случая термоэлектрического тепломера с параметрами  $\alpha_1 = 5.6 \text{ (Вт/м}^2\cdot\text{К)}$ ,  $\varepsilon_1 = 0.7$ .

Установлено, что минимизировать влияние термоэлектрического тепломера на определение тепловыделения человека можно при условии равенства коэффициентов теплообмена  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  и коэффициентов излучения  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  соответственно тепломера и поверхности кожи человека. В случае, когда эти теплофизические характеристики будут значительно

отличаться, погрешность в определении теплового потока тела человека может превышать свыше 200%, поскольку тепломер создает тепловые условия, отличные от тех, которые имеют место без него.

Была исследована также зависимость перепада температур на термоэлектрическом тепломере при разных значениях коэффициентов теплообмена и излучения (рис. 7). Установлено, что максимальный перепад температур на термоэлектрическом тепломере из материала на основе *Bi-Te* составляет лишь  $\Delta T_{\max} = 0.2$  °C при теплофизических характеристиках тепломера  $\varepsilon_1 = 0.5$ ,  $\alpha_1 = 10$  (Вт/м<sup>2</sup>·К) и температуре окружающей среды  $T_0 = 20$  °C.

Однако, несмотря на небольшой перепад температур, термоэлектрический тепломер существенным образом влияет на изменение температуры поверхности кожи человека и температуры внутри биологической ткани. Распределение температуры внутри и на поверхности кожи человека при наличии термоэлектрического тепломера с разными коэффициентами теплообмена представлены на рис. 8.

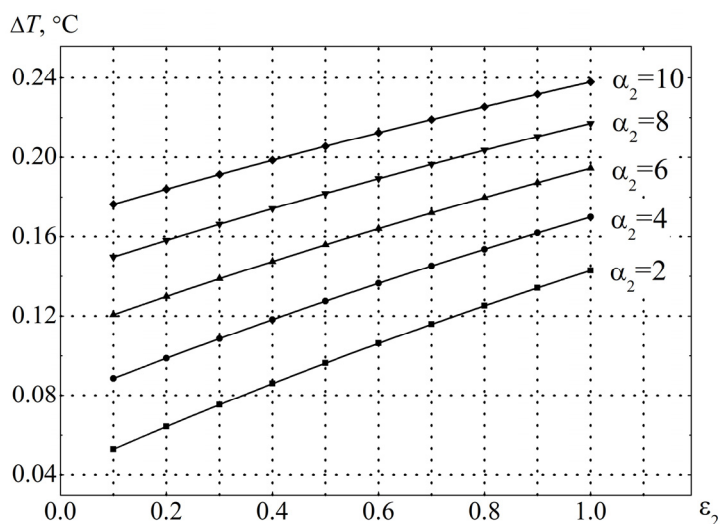


Рис. 7. Зависимость перепада температур на термоэлектрическом тепломере при разных значениях коэффициентов теплообмена и излучения.

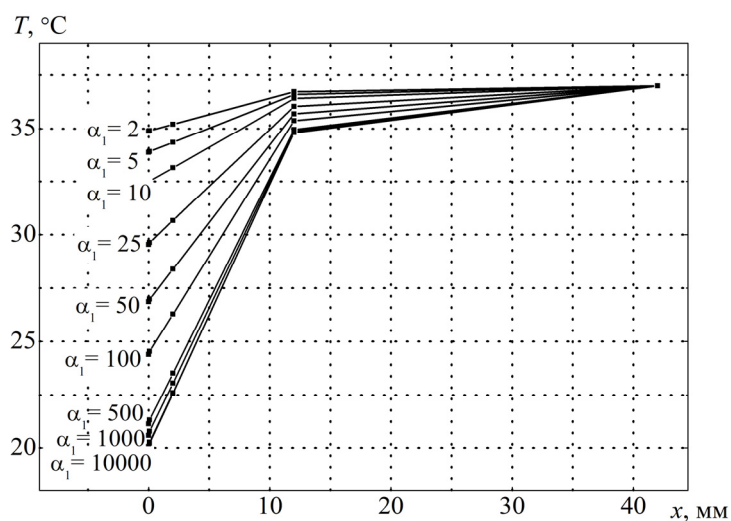


Рис. 8. Распределение температуры внутри и на поверхности кожи человека при наличии термоэлектрического тепломера с разными коэффициентами теплообмена  $\alpha_1$  (коэффициент излучения  $\varepsilon_1 = 0.5$ , температура окружающей среды  $T_0 = 20$  °C).

Из рис. 8 видно, что температура поверхности кожи человека при наличии термоэлектрического тепломера уменьшается от значения  $T = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $T = 32.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  при изменении коэффициента теплообмена  $\alpha_1 = 2 \div 10\text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ , фиксированных значениях коэффициента излучения  $\varepsilon_1 = 0.5$  и температуры окружающей среды  $T_0 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При этом, дальнейшее увеличение коэффициента теплообмена приводит к уменьшению температуры поверхности кожи человека, которое может значительно исказить определение тепловыделения человека при медико-биологических исследованиях.

## Выводы

1. С помощью компьютерного моделирования исследовано влияние термоэлектрического тепломера на точность определения тепловыделения человека. Установлено, что погрешность в определении теплового потока тела человека может превышать 200%.
2. Установлено, что минимизировать влияние термоэлектрического тепломера на определение тепловыделения человека можно при условии равенства коэффициентов теплообмена и коэффициентов излучения тепломера и поверхности кожи человека.

## Литература

1. Ладыка Р.Б. Полупроводниковые тепломеры в диагностике и лечении заболеваний суставов / Р.Б. Ладыка, Д.Н. Москаль, В.Д. Дидух // Медицинская техника. – 1992. – №6. – С. 34 – 35.
2. Применение полупроводниковых тепломеров в диагностике и лечении / Р.Б. Ладыка, О.Н. Дакалюк, Л.П. Булат [и др.] // Медицинская техника. – 1996. – №6. – С. 36 – 37.
3. Анатычук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства: Справочник / Л.И. Анатычук – К.: Наукова думка, 1979. – 766 с.
4. Геращенко О.А. Основы теплотрии / О.А. Геращенко – К.: Наукова думка, 1971. – 192 с.
5. Термоэлектрический полупроводниковый тепломер / Л.И. Анатычук, Н.Г. Лозинский, П.Д. Микитюк [и др.] // Приборы и техника эксперимента. – 1983. – №5. – С. 236.
6. Термоэлектрический тепломер / Л.И. Анатычук, Л.П. Булат, Д.Д. Гуцал [и др.] // Приборы и техника эксперимента. – 1989. – №4. – С. 248.
7. Демчук Б.М. Термоэлектрические датчики для ортопедии / Б.М. Демчук, Л.Я. Кушнерик, И.М. Рубленик // Термоэлектричество. – 2002. – №4. – С. 80 – 85.
8. Ащеулов А.А. Термоэлектрический прибор для медико-биологической экспресс-диагностики / А.А. Ащеулов, Л.Я. Кушнерик // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – №4. – 2004. – С. 38 – 39.
9. Jiang S.C., Ma N., Li H.J., Zhang X.X. Effects of thermal properties and geometrical dimensions on skin burn injuries // Burns. – 28. – 2002. – p. 713-717.
10. Cetingul M.P., Herman C. Identification of skin lesions from the transient thermal response using infrared imaging technique // IEEE. – 2008. – p. 1219-1222.
11. COMSOL Multiphysics User's Guide // COMSOLAB. – 2010. – 804 p.

Поступила в редакцию 29.11.2012.