

<sup>1</sup>Институт термоэлектричества НАН и МОН Украины, ул. Науки, 1,  
Черновцы, 58029, Украина;

<sup>2</sup>Черновицкий национальный университет им. Ю. Федьковича, ул. Коцюбинского, 2,  
Черновцы, 58000, Украина

## О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ ПРИМЕНЕНИЯ МЕДИЦИНСКИХ ТЕПЛОМЕРОВ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ЛОКАЛЬНЫХ ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЙ ЧЕЛОВЕКА

---

*В работе приведены результаты компьютерного моделирования и экспериментальных исследований влияния тепловой изоляции и пространственной ориентации термоэлектрического тепломера на его показания при исследовании локальных тепловыделений человека. Экспериментально подтверждено, что наличие медицинской тепловой изоляции на термоэлектрическом тепломере не всегда приводит к уменьшению его показаний, а в некоторых случаях вызывает их увеличение, поскольку тепловая изоляция служит своеобразным теплообменником.*

**Ключевые слова:** компьютерное моделирование, термоэлектрический тепломер, медицинская тепловая изоляция, локальное тепловыделение человека.

*This paper presents the results of computer simulation and experimental research on the effect of thermal insulation and spatial orientation of thermoelectric heat meter on its readings in the investigation of local human heat release. It has been proved experimentally that the presence of thermal insulation on thermoelectric heat meter does not always cause a decrease in its readings. In some cases it leads to their increase, since thermal insulation serves as a peculiar heat exchanger.*

**Key words:** computer simulation, thermoelectric heat meter, medical thermal insulation, local human heat release.

### Введение

Известно, что перспективными для исследования локальных тепловыделений человека являются полупроводниковые термоэлектрические тепломеры [1 – 13], которые сочетают в себе миниатюрность, высокую чувствительность, стабильность параметров в широком интервале рабочих температур и согласуются с современной регистрирующей аппаратурой [14, 15]. Использование таких тепломеров позволяет достигать высокой локальности и точности теплотметрических измерений. Это, в свою очередь, дает возможность получать информацию о характеристиках исследуемых объектов и подробно их анализировать с целью выявления на ранних стадиях воспалительных процессов организма человека. Однако, важным при этом остается вопрос влияния различных факторов на показания термоэлектрических тепломеров.

Влияние таких тепломеров на объект исследования изучался аналитически в работе [2] и для случая живых объектов – с помощью компьютерного моделирования, – в работах [16, 17]. Было установлено, что минимизировать влияние термоэлектрического тепломера на

определение тепловыделения человека можно при условии равенства коэффициентов теплообмена  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  и коэффициентов излучения  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$ , соответственно, тепломера и поверхности кожи человека. Также в работе [18] с помощью компьютерного моделирования было исследовано влияние тепловой изоляции на показания термоэлектрического тепломера в условиях реальной эксплуатации. Однако, важную роль при исследовании тепловыделения человека также играет пространственная ориентация тепломера, способ его крепления к поверхности исследуемого участка и увеличение толщины тепловой изоляции на тепломере, что может существенно влиять на показания термоэлектрического тепломера.

Целью данной работы является создание усовершенствованной компьютерной модели для определения влияния тепловой изоляции и пространственной ориентации термоэлектрического тепломера на его показания, а также экспериментальное подтверждение полученных результатов при исследовании локальных тепловыделений человека.

### Результаты компьютерного моделирования

С целью определения влияния тепловой изоляции на показания термоэлектрического тепломера была усовершенствована разработанная в работе [18] модель биологической ткани, на поверхности которой находится термоэлектрический тепломер с медицинской тепловой изоляцией. Усовершенствование физической модели состоит в том, что форма и расположение медицинской тепловой изоляции были более приближены к реальной ситуации (рис. 1). Для построения усовершенствованной трехмерной компьютерной модели использован пакет прикладных программ Comsol Multiphysics [19], что дает возможность проводить моделирование теплофизических процессов в биологической ткани тела человека с учетом кровообращения и метаболизма. Расчет распределений температур и плотности тепловых потоков в биологической ткани, термоэлектрическом тепломере и тепловой изоляции осуществлялся методом конечных элементов (рис. 2).

С помощью компьютерного моделирования были получены распределения температуры и линий плотности теплового потока в биологической ткани тела человека и термоэлектрическом тепломере (рис. 3 – 5), а также построены изотермические поверхности в биологической ткани (рис. 6) с учетом краевых эффектов в трехмерной компьютерной модели.

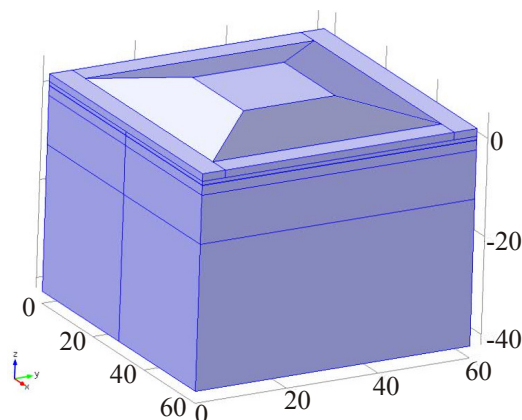


Рис. 1. Усовершенствованная модель биологической ткани, на поверхности которой находится термоэлектрический тепломер с медицинской тепловой изоляцией.

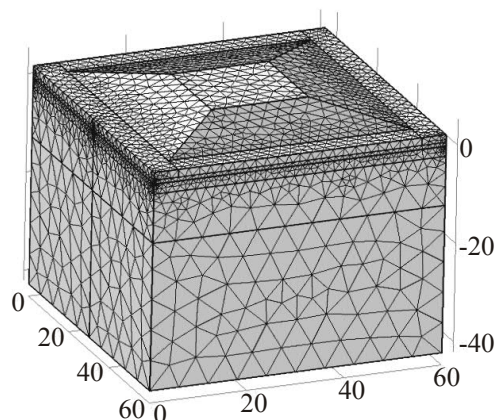


Рис. 2. Сетка метода конечных элементов.

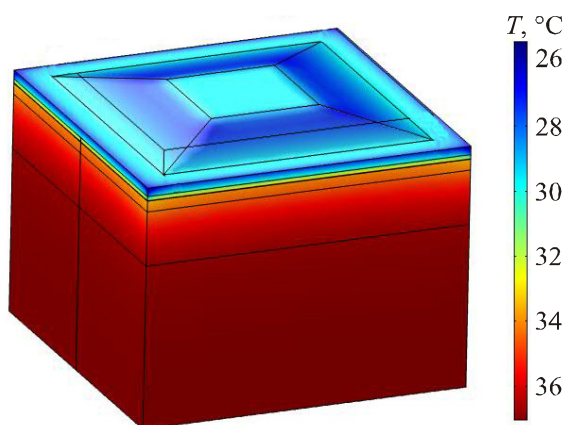


Рис. 3. Распределение температуры в биологической ткани, на поверхности которой находится термоэлектрический тепломер с медицинской тепловой изоляцией.

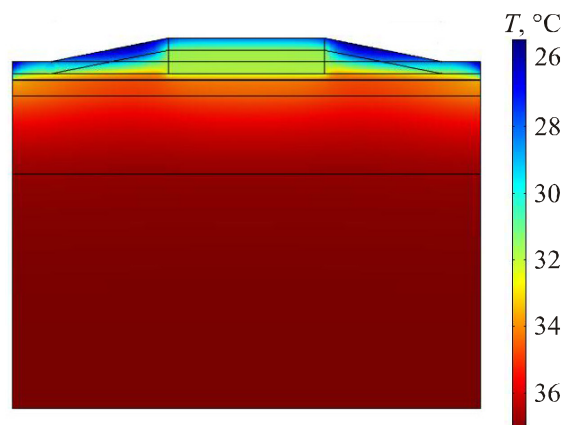


Рис. 4. Распределение температуры в разрезе биологической ткани, на поверхности которой находится термоэлектрический тепломер с медицинской тепловой изоляцией.

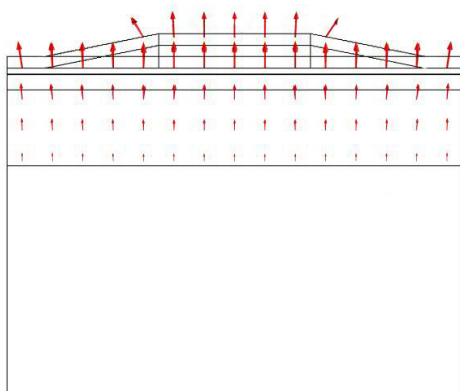


Рис. 5. Распределение линий плотности теплового потока в биологической ткани, на поверхности которой находится термоэлектрический тепломер с тепловой изоляцией.

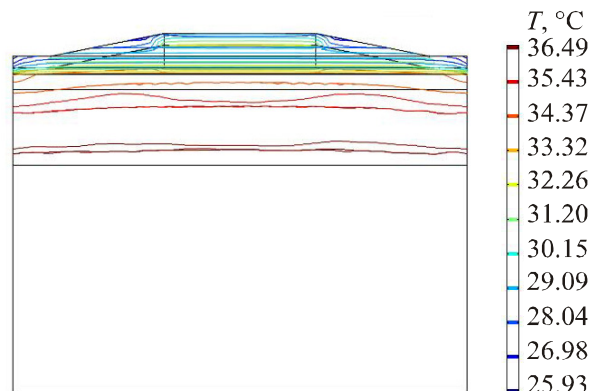


Рис. 6. Изотермические поверхности в биологической ткани, на поверхности которой находится термоэлектрический тепломер с медицинской тепловой изоляцией.

Для определения перепада температур между гранями термоэлектрического тепломера было выполнено усреднение полученных распределений температуры на верхней и нижней поверхностях тепломера, поскольку такие распределения являются неравномерными.

Методом компьютерного моделирования определено влияние тепловой изоляции на показания термоэлектрического тепломера в условиях реальной эксплуатации. Установлена зависимость перепада температур на термоэлектрическом тепломере от толщины тепловой изоляции на тепломере (количества наружных слоев бинта  $N_{внеш}$ ) при различной толщине тепловой изоляции между биологической тканью и тепломером (количества внутренних слоев бинта  $N_{вн}$ ) (рис. 7).

Из рис. 7 видно, что увеличение толщины тепловой изоляции между биологической тканью и термоэлектрическим тепломером однозначно приводит к уменьшению перепада температур между гранями тепломера. Однако увеличение при этом толщины внешней изоляции на тепломере не всегда приводит к уменьшению его показаний, а в некоторых случаях вызывает их увеличение, поскольку тепловая изоляция играет роль своеобразного теплообменника. Этот факт необходимо учитывать при измерении локальных тепловыделений человека путем создания тождественных условий при повторных измерениях.

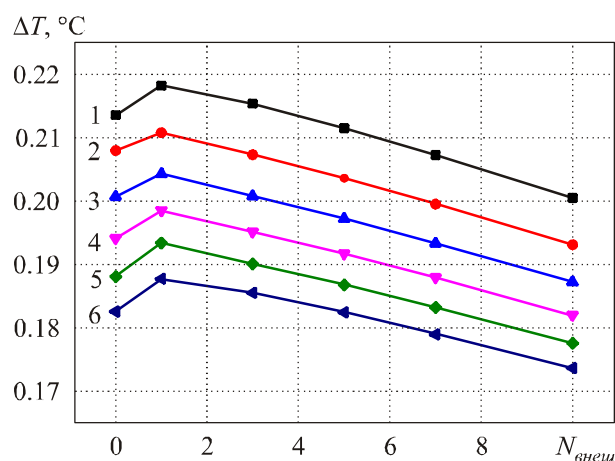


Рис. 7. Зависимость перепада температур на термоэлектрическом тепломере от толщины тепловой изоляции на тепломере (количества наружных слоев бинта  $N_{\text{внеш}}$ ) при различной толщине тепловой изоляции между биологической тканью и тепломером (количества внутренних слоев бинта  $N_{\text{вн}}$ ).

1 –  $N_{\text{вн}} = 0$ ; 2 –  $N_{\text{вн}} = 1$ ; 3 –  $N_{\text{вн}} = 2$ ; 4 –  $N_{\text{вн}} = 3$ ; 5 –  $N_{\text{вн}} = 4$ ; 6 –  $N_{\text{вн}} = 5$ .

### Экспериментальные исследования влияния тепловой изоляции на показания термоэлектрического тепломера

Для определения влияния тепловой изоляции на показания термоэлектрического тепломера была проведена серия экспериментальных измерений локальных тепловых потоков тела человека при разном количестве внешних  $N_{\text{внеш}}$  и внутренних  $N_{\text{вн}}$  слоев бинта (рис. 8). Измерение проводилось на участке левой руки человека при температуре тела  $T_{\text{тела}} = 36.6 \text{ } ^\circ\text{C}$  и температуре окружающей среды  $T_{\text{ком}} = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$  при горизонтальном размещении тепломера на поверхности исследуемого участка.

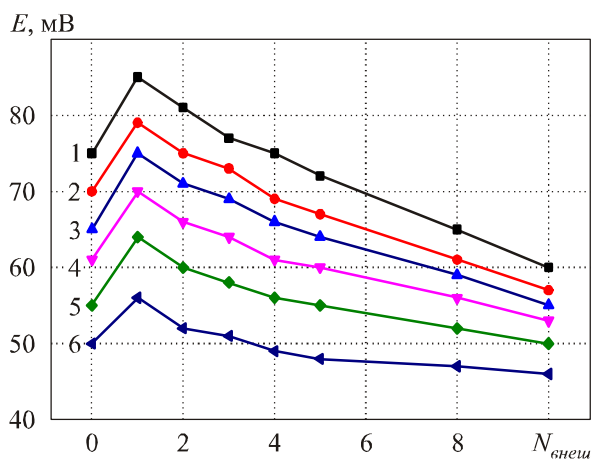


Рис. 8. Зависимость показаний термоэлектрического тепломера от толщины тепловой изоляции (количества внешних  $N_{\text{внеш}}$  и внутренних  $N_{\text{вн}}$  слоев бинта) при горизонтальном размещении тепломера ( $\varphi = 0^\circ$ ) на поверхности исследуемого участка тела человека:  $N_{\text{внеш}}$  – количество слоев бинта на термоэлектрическом тепломере,  $N_{\text{вн}}$  – количество слоев бинта между поверхностью кожи и поверхностью тепломера.

1 –  $N_{\text{вн}} = 0$ ; 2 –  $N_{\text{вн}} = 1$ ; 3 –  $N_{\text{вн}} = 2$ ; 4 –  $N_{\text{вн}} = 3$ ; 5 –  $N_{\text{вн}} = 4$ ; 6 –  $N_{\text{вн}} = 5$ .

Установлено, что наличие тепловой изоляции на биологической ткани и термоэлектрическом тепломере действительно влияет на показания тепломера. Из рис. 8 видно, что небольшое количество внешних слоев медицинской тепловой изоляции ( $N_{\text{внеш}} = 1 \div 4$ ) приводит к увеличению показаний термоэлектрического тепломера на 15 %, а дальнейшее увеличение

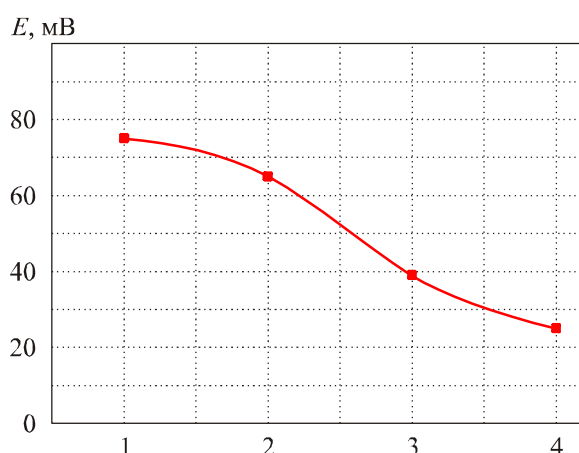
тепловой изоляции (количества внешних и внутренних слоев бинта) уменьшает его показания на 40 % по сравнению со случаем, когда тепловая изоляция отсутствует. Таким образом, полученные результаты экспериментальных исследований подтверждают предположение, что тепловая медицинская изоляция служит своеобразным теплообменником и в некоторых случаях приводит к увеличению показаний тепломера.

Также было исследовано влияние на показания термоэлектрического тепломера характера тепловой изоляции, т.е. случаи, когда на поверхности тепломера отсутствует тепловая изоляция, размещена одежда или пуховое одеяло (табл. 1). Результаты измерений представлены на рис. 9.

*Таблица 1*

*Зависимость показаний термоэлектрического тепломера от характера тепловой изоляции*

№	Условия измерений	$E$ , мВ
1.	$N_{вн} = 0, N_{внеш} = 0$	75
2.	Обычная кофта	65
3.	Вязаная кофта	39
4.	Пуховое одеяло	25



*Рис. 9. Зависимость показаний термоэлектрического тепломера от характера тепловой изоляции при исследовании локальных тепловыделений человека: 1 – отсутствует тепловая изоляция на поверхности тепломера, 2 – обычная кофта, 3 – вязаная кофта, 4 – пуховое одеяло.*

Из рис. 9 видно, что наличие тепловой изоляции на поверхности термоэлектрического тепломера оказывает существенное влияние на его показания, которые могут уменьшаться в несколько раз по сравнению со случаем, когда тепловая изоляция отсутствует. Это обстоятельство обязательно необходимо учитывать путем создания тождественных условий при измерении локальных тепловых потоков тела человека.

### **Зависимость показаний термоэлектрического тепломера от его пространственной ориентации**

С целью определения влияния пространственной ориентации термоэлектрического тепломера на его показания была проведена серия экспериментальных измерений тепловых потоков с соответствующего участка левой руки тела человека ( $T_{тела} = 36.7$  °С,  $T_{ком} = 20$  °С). Результаты измерений представлены в табл. 2 и на рис. 10 соответственно, где  $\varphi$  – угол наклона руки с термоэлектрическим тепломером.

Таблица 2

Зависимость показаний термоэлектрического тепломера  
 от его пространственной ориентации

$\varphi, ^\circ$	$N_{вн} = 1$ $N_{внеш} = 1$	$N_{вн} = 2$ $N_{внеш} = 2$	$N_{вн} = 3$ $N_{внеш} = 3$	$N_{вн} = 4$ $N_{внеш} = 4$	$N_{вн} = 5$ $N_{внеш} = 5$
0	79	71	64	57	48
45	74	66	58	52	46
90	70	61	54	49	45

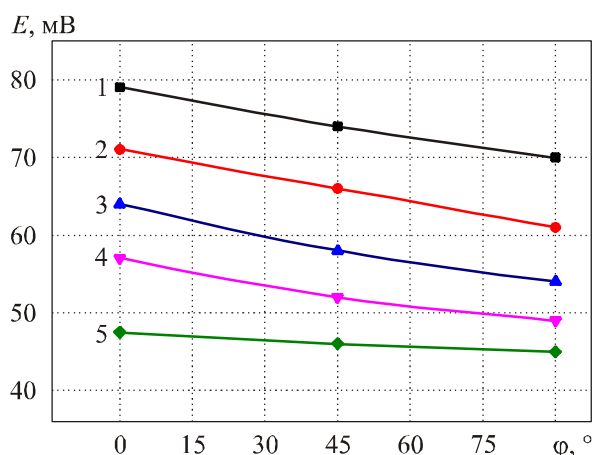


Рис. 10. Зависимость показаний термоэлектрического тепломера от его пространственной ориентации на поверхности исследуемого участка тела человека:  $N_{внеш}$  – количество слоев бинта на термоэлектрическом тепломере,  $N_{вн}$  – количество слоев бинта между поверхностью кожи и поверхностью тепломера.

1 –  $N_{вн, внешне} = 1$ ; 2 –  $N_{вн, внешне} = 2$ ; 3 –  $N_{вн, внешне} = 3$ ; 4 –  $N_{вн, внешне} = 4$ ; 5 –  $N_{вн, внешне} = 5$ .

Из рис. 10 видно, что при увеличении угла наклона левой руки с термоэлектрическим тепломером показания тепломера уменьшаются на 12 % при количестве слоев бинта  $N_{внеш} = N_{вн} = 1$  и соответственно на 46 % при дальнейшем увеличении количества слоев бинта  $N_{внеш} = N_{вн} = 5$ .

Таким образом, выявлены особенности применения медицинских тепломеров при исследовании локальных тепловыделений человека. Установлено, что пространственная ориентация термоэлектрического тепломера существенно влияет на его показания, которые могут изменяться до 15 % в зависимости от толщины медицинской тепловой изоляции на поверхности тепломера.

## Выводы

1. Экспериментально подтверждены результаты компьютерного моделирования. Установлено, что наличие медицинской тепловой изоляции на термоэлектрическом тепломере не всегда приводит к уменьшению его показаний, а в некоторых случаях вызывает их увеличение, поскольку тепловая изоляция служит своеобразным теплообменником. Однако дальнейшее увеличение толщины медицинской тепловой изоляции однозначно приводит к уменьшению показаний тепломера примерно до 40 % по сравнению со случаем, когда тепловая изоляция отсутствует.
2. Установлено, что в зависимости от пространственной ориентации термоэлектрического тепломера на исследуемом участке тела человека показания тепломера могут изменяться до 15 %. Это обстоятельство необходимо учитывать путем создания тождественных условий при измерении локальных тепловыделений тела человека.

## **Литература**

1. Анатычук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства: Справочник. / Л.И. Анатычук – К.: Наукова думка, 1979. – 766 с.
2. Геращенко О.А. Основы теплотриии. / О.А. Геращенко – К.: Наукова думка, 1971. – 192 с.
3. Термоэлектрический полупроводниковый тепломер / Л.И. Анатычук, Н.Г. Лозинский, П.Д. Микитюк [и др.] // Приборы и техника эксперимента. – 1983. – №5. – С. 236.
4. Термоэлектрический тепломер / Л.И. Анатычук, Л.П. Булат, Д.Д. Гуцал [и др.] // Приборы и техника эксперимента. – 1989. – №4. – С. 248.
5. 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.
6. 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.
7. Демчук Б.Н. Термоэлектрические датчики для ортопедии / Б.Н. Демчук, Л.Я. Кушнерик, И.М. Рубленик // Термоэлектричество. – 2002. – №4. – С. 80 – 85.
8. 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. Demchuk V.M. Primary thermoelectric converters based on semiconductor materials for gradient heat meters / V.M. Demchuk, R.R. Kobylansky, A.V. Prybyla // The 31-st International and 10-th European Conference on Thermoelectrics. – 2012. – Aalborg, Denmark. – P. 277.
10. Анатычук Л.И., Кобылянский Р.Р. Термоэлектрические преобразователи для градиентных тепломеров // Материалы XIII Межгосударственного семинара “Термоэлектрики и их применения” 13-14 ноября 2012 г. – Санкт-Петербург, Россия. – 2012. – С. 1 – 5.
11. Патент Украины № 71619. Термоэлектрический медицинский тепломер // Анатычук Л.И., Кобылянский Р.Р. – 2012.
12. Патент Украины № 72032. Термоэлектрический сенсор для измерения температуры и теплового потока // Анатычук Л.И., Кобылянский Р.Р. – 2012.
13. Патент Украины № 73037. Термоэлектрический медицинский прибор // Анатычук Л.И., Кобылянский Р.Р. – 2012.
14. Гыщук В.С. Электронный регистратор сигналов сенсоров теплового потока человека / В.С. Гыщук // Термоэлектричество. – № 4. – 2012. – С. 109 – 112.
15. Гыщук В.С. Электронный регистратор с обработкой сигналов термоэлектрического сенсора теплового потока / В.С. Гыщук // Термоэлектричество. – № 1. – 2013. – С. 84 – 86.
16. Анатычук Л.И. Исследование влияния термоэлектрического тепломера на определение тепловыделения человека / Л.И. Анатычук, Р.Р. Кобылянский // Термоэлектричество. – 2012. – №4. – С. 64 – 70.
17. Анатычук Л.И. 3D-модель для определения влияния термоэлектрического тепломера на точность измерения тепловыделения человека / Л.И. Анатычук, Р.Р. Кобылянский // Научный вестник Черновицкого университета: сборник науч. трудов. Физика. Электроника. – 2012. – Т. 2, Вып. 1. – С. 15 – 20.
18. Анатычук Л.И. Компьютерное моделирование показаний термоэлектрического тепломера в условиях реальной эксплуатации / Л.И. Анатычук, Р.Р. Кобылянский // Термоэлектричество. – 2013. – № 1. – С. 53 – 61.
19. COMSOL Multiphysics User’s Guide // COMSOLAB. – 2010. – 804 p.

Поступила в редакцию 20.02.2013.