



Дудаль В.А.

Дудаль В.А.

Институт термоэлектричества НАН и МОН Украины,  
ул. Науки, 1, Черновцы, 58029, Украина

## ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ ПОД АСФАЛЬТНЫМ ПОКРЫТИЕМ

*Приведена схема и принцип действия термоэлектрического преобразователя тепловой энергии почвы. Рассмотрены описания физических и математических моделей термогенератора, использующего в качестве концентратора тепловой энергии солнечного излучения асфальтное покрытие, и термогенератора в почве. Созданы компьютерные модели для таких случаев. Проведен анализ результатов моделирования и показана перспективность применения термоэлектрических генераторов под асфальтным покрытием в качестве маломощных источников электричества.*

**Ключевые слова:** термоэлектрический генератор, асфальтное покрытие, маломощный источник питания.

*This paper presents the schematic and operating principle of thermoelectric converter of thermal energy of soils. The physical and mathematical models of thermal generator using asphalt pavement as a concentrator of solar radiation thermal energy and those of soil thermal generator have been described. Computer models for such cases have been created. Analysis of simulation results has been made and a promising outlook for using thermoelectric generators under asphalt pavement as low-power supplies has been shown.*

**Key words:** thermoelectric generator, asphalt pavement, low-power supply.

### Введение

Общая характеристика проблемы. Достижение существенных изменений в энергосбережении является одной из ключевых задач экономической политики подавляющего большинства стран мира. При условиях роста цен на энергоресурсы применение современных энергоэффективных технологий дает ощутимые экономические выгоды и конкурентные преимущества.

Уровень энергопотребления многих современных электронных устройств (сенсорные датчики, светодиодные лампы и др.) составляет от десятков милливатт до нескольких ватт, что приводит к поиску эффективных источников питания малой мощности.

Одним из вариантов решения такой задачи является применение термоэлектрических источников питания, использующих тепловую энергию почвы [1, 2].

Физические основы создания таких почвенных термоэлектрических генераторов (ПТЭГ) разработаны в Институте термоэлектричества [3]. С учетом результатов теоретических исследований разработаны и изготовлены образцы ПТЭГ [3]. Один из вариантов ПТЭГ

показан на рис. 1.

Мощности, генерируемые почвенным термоэлектрическими генераторами, становятся соразмерными с энергопотреблением маломощных электронных устройств. С учетом известных преимуществ ПТЭГ, их применение в качестве источников питания с ресурсом работы до 30 лет становится все более привлекательным [3, 4].

В работах [5, 6] приведено описание систем аккумулирования и преобразования тепловой энергии в электрическую, которые могут быть установлены на поверхности дорожного покрытия, и использоваться для питания различных сенсорных датчиков, подсветки дорожных знаков и др.

Целью данной работы является исследование возможности улучшения термоэлектрических генераторов с концентратором тепловой энергии солнечного излучения, в качестве которого рассмотрено асфальтное покрытие.



Рис. 1. Внешний вид ПТЭГ Алтек-8027.

### Физическая модель ТЭГ в почве

Физическая модель и схема принципа действия термоэлектрического генератора, использующего тепловую энергию почвы, показаны на рис. 2. Термоэлектрический генератор, расположенный в почве, состоит из теплоприемного коллектора 1, теплопровода 2, высокоэффективной многоэлементной батареи 3, теплоотвода 4, радиатора 5, корпуса 6 и теплоизоляции 7. Принцип действия термогенератора состоит в следующем: тепловой поток  $q$ , существующий в почве, попадает на теплоприемную площадку 1, теплопроводом 2 передается к горячим спаям термобатареи 3, теплопроводом 4 отводится к радиатору 5 и рассеивается в нижние слои почвы.

Для уменьшения тепловых потерь корпус 6 термогенератора заполнен теплоизоляционным материалом. При прохождении тепла через термобатарею, на ней создается градиент температуры, вызывающий генерацию электрической мощности  $W$ . Следует отметить, что с течением времени направление движения теплового потока может изменяться на противоположное. Поэтому конструкционные элементы 1, 2 и 4, 5 генератора могут функционально заменять друг друга. В данной модели рассматривается квазистационарный случай, при котором динамические процессы в почве полагают медленными. В этих условиях теплоемкостью источника электричества пренебрегают.

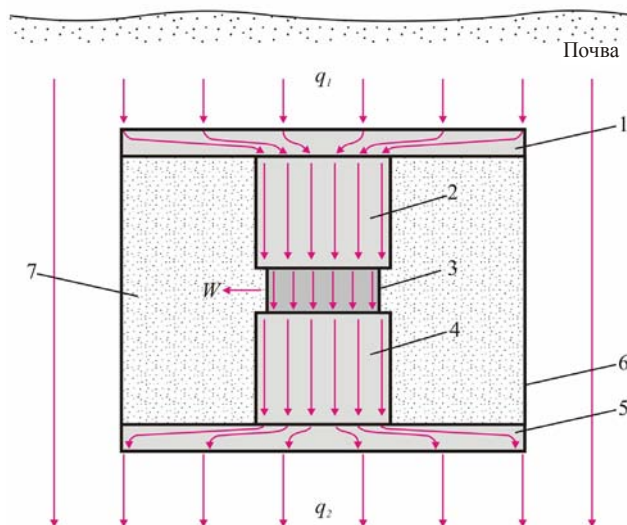


Рис. 2. Физическая модель термогенератора, расположенного в почве.

### Математическое описание физической модели ТЭГ в почве

Рассмотрим почвенный термогенератор цилиндрической формы, высотой  $H$  и диаметром  $D$ , теплоприемная площадка которого расположена на глубине  $h$  под поверхностью почвы [3].

С целью упрощения математического описания физической модели термогенератора в почве будем рассматривать нашу модель в цилиндрической системе координат  $r, z$ , в которой ось  $z$  направлена от поверхности вглубь почвы.

Для нахождения распределения температур  $T(r, z)$  и теплового потока  $q$  в почве в присутствии ПТЭГ необходимо сначала решить уравнение теплопроводности

$$\frac{1}{\chi} \frac{\partial T(r, z)}{\partial t} = \frac{\partial^2 T(r, z)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(r, z)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T(r, z)}{\partial z^2} \quad (1)$$

с граничными условиями

$$-k_0 \frac{\partial T(r, z)}{\partial z} = q_0, \quad z = 0, \quad (2)$$

$$T(h, r < D/2) = T_n, \quad (3)$$

$$T(H+h, r < D/2) = T_l, \quad (4)$$

$$-k_0 \int_s \frac{\partial T(r, z)}{\partial z} dS = \frac{1}{R_{\text{птэг}}} (T_n - T_l), \quad z = h, \quad (5)$$

$$-k_0 \frac{\partial T(r, z)}{\partial r} = 0, \quad h < z < h+H, \quad r = D/2, \quad (6)$$

где  $q_0$  – величина удельного теплового потока на поверхности;  $T_n, T_l$  – неизвестные температуры приемной площадки и нижнего торца ПТЭГ, подлежащие определению;  $R_{\text{птэг}}$  – тепловое сопротивление ПТЭГ.

Приведенные выше граничные условия имеют следующий физический смысл: условие (2) задает тепловой поток на поверхности почвы; (3), (4) выражают условия изотермичности торцов цилиндрического ПТЭГ, (5) является условием теплового баланса приемной площадки ПТЭГ, а (6) – условие адиабатической изоляции его боковой поверхности. Распределение температур  $T(r, z)$  в почве в этом случае является решением внешней краевой задачи для уравнения (1).

Исходную электрическую мощность ПТЭГ в общем виде можно подать как

$$W = f \left[ T(r, z), k_0(r, z), \sum_{i=1}^N B_i, Z^*, L(r, z) \right], \quad (7)$$

где  $T(r, z)$  – распределение температуры в почве с расположенным в нем ПТЭГ;  $k_0(r, z)$  – коэффициент теплопроводности почвы;  $\sum_{i=1}^N B_i$  – алгебраическая сумма  $N$  компонентов теплового баланса в почве;  $Z^*$  – термоэлектрическая эффективность термобатареи в ПТЭГ;  $L(r, z)$  – пространственная координата расположения ПТЭГ в почве, характеризующая его геометрические размеры.

### Компьютерное моделирование ТЭГ в почве

Для исследования работы термоэлектрического генератора в почве в стационарном режиме (температура на поверхности почвы составляла 300 К, а на глубине 55 см – 285 К) была создана трехмерная компьютерная его модель. Для построения компьютерной модели использован пакет прикладных программ Comsol Multiphysics [7], позволяющий осуществлять моделирование теплофизических процессов, которые будут происходить в почве и ТЭГ.

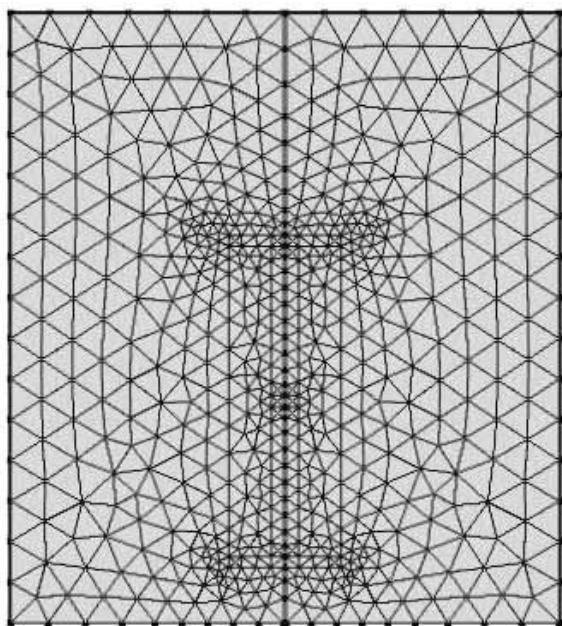


Рис. 3. Сетка метода конечных элементов.

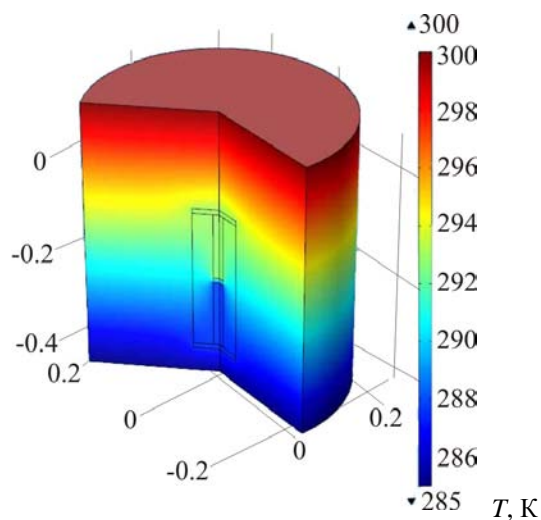


Рис. 4. Распределение температуры в ТЭГ в почве.

Расчет распределений температур и плотностей тепловых потоков в термоэлектрическом генераторе и почве осуществлялся методом конечных элементов, суть которого заключается в том, что исследуемый объект разбивается на большое количество конечных элементов (рис. 3) и в каждом из них ищется значение функции, удовлетворяющее заданным дифференциальным уравнениям второго порядка с соответствующими граничными условиями. Точность решения поставленной задачи зависит от уровня разбивки и обеспечивается использованием большого количества конечных элементов [7].

С помощью объектно-ориентированного компьютерного моделирования получены распределения температуры (рис. 4) в термоэлектрическом генераторе в почве в стационарном режиме.

### Физическая модель ТЭГ под асфальтным покрытием

Одним из простейших вариантов повышения эффективности работы ПТЭГ представляется его размещение под асфальтом, который имеет значительно лучший коэффициент поглощения солнечной энергии по сравнению с почвой.

Физическая модель термоэлектрического генератора под асфальтным покрытием представлена на рис. 5.

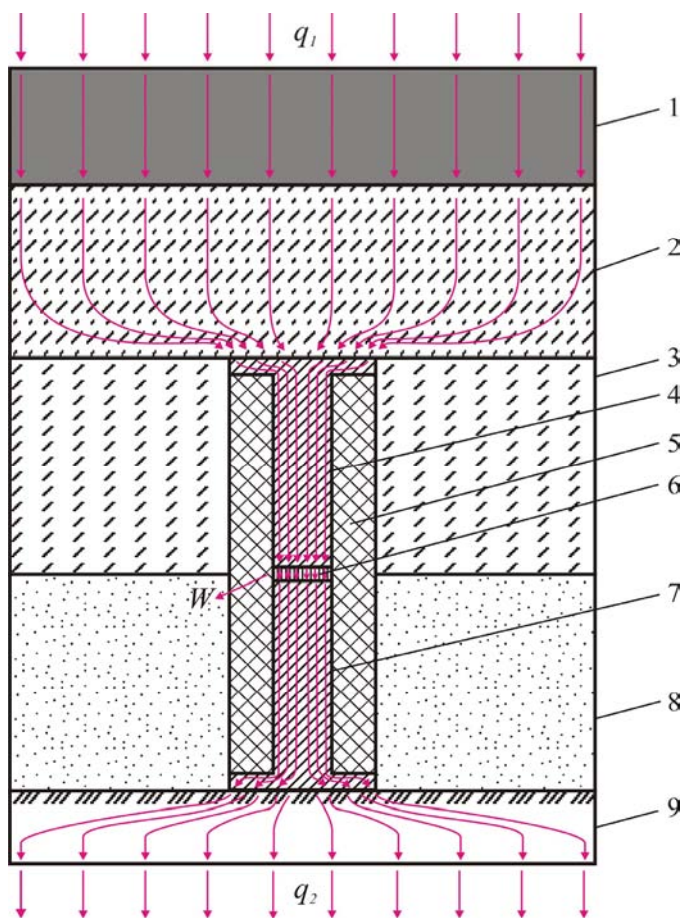


Рис. 5. Физическая модель ПТЭГ под асфальтным покрытием:  
 1 – асфальтное покрытие, 2 – бетонное покрытие, 3 – слой щебня,  
 4 – теплоприемный коллектор, 5 – теплоизоляция, 6 – термоэлектрическая батарея,  
 7 – теплорассеивающий радиатор, 8 – слой песка, 9 – почва.

Согласно физической модели участок дорожного покрытия представляет собой структуру из пяти слоев (асфальтное покрытие 1, бетонное покрытие 2, слой щебня 3, слой песка 8, почва 9), теплофизические характеристики (теплопроводность  $k$ , плотность  $\rho$ ) и толщины которых приведены в таблице 1.

Таблица 1

Теплофизические свойства элементов физической модели

	Теплопроводность, $k$ ( $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ )	Плотность, $\rho$ ( $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$ )	Толщина слоя, м
Асфальтное покрытие	1.05	2100	0.08
Бетонное покрытие	1.51	2400	0.12
Щебень	0.064	2000	0.15
Песок	0.35	1600	0.15
Почва	0.4	1800	0.05



Почвенный термоэлектрический генератор представляет собой цилиндрический брусок, состоящий из теплопринимающего коллектора 4, теплоизоляции 5, термоэлектрической батареи 6 и теплорассеивающего радиатора 7. Размеры генератора:  $\varnothing 10 \times 30$  (см).

Коллектор и радиатор ПТЭГ изготовлены из алюминия и состоят из теплоприемной (теплорассеивающей, соответственно) пластин размерами  $\varnothing 10 \times 1$  (см) и теплопровода размером  $\varnothing 2.256 \times 13.48$  (см). Для теплоизоляции используется минеральная вата с коэффициентом теплопроводности  $\kappa_{\text{изол}} = 0.032 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ .

Как известно, основное влияние на величину ЭДС термоэлектрической батареи имеет перепад температур  $\Delta t$  между ее гранями. Поэтому для достижения поставленной в данной работе цели в качестве батареи был рассмотрен монолитный однородный образец из полупроводникового материала  $Bi_2Te_3$  с теплопроводностью  $\kappa_6 = 1.8 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ . Термоэлектрический преобразователь представляет собой цилиндрический брусок с геометрическими размерами  $\varnothing 2.256 \times 1.04$  (см). В данной физической модели асфальтное и бетонное покрытия, щебень, песок и почву будем считать однородными средами и не учитываем того, что их теплопроводность изменяется в зависимости от внешних условий (влажности, температуры, строения материала и др.). Полагаем, что тепловые процессы являются медленными, поэтому рассматривается квазистационарный режим, при котором пренебрегается теплоемкостью ТЭГ.

### Математическое описание физической модели ТЭГ под асфальтным покрытием

Количество тепла, которое проходит сквозь асфальтное покрытие ( $Q_1$ ), является разностью количества тепла, поступающего на поверхность асфальта ( $Q_0$ ), и тепла, которое отражается от нее. Коэффициент отражения асфальтного покрытия составляет 7 %, поэтому

$$Q_1 = 0.93 \cdot Q_0. \quad (8)$$

Тепловые потоки, проходящие сквозь асфальт ( $Q_2$ ), бетон ( $Q_3$ ) и алюминиевый теплопровод ( $Q_4$ ) задаются выражениями

$$\begin{aligned} Q_2 &= \kappa_{\text{asf}} \cdot \frac{S_{\text{asf}}}{L_{\text{asf}}} \cdot (T_2 - T_1), \\ Q_3 &= \kappa_{\text{bet}} \cdot \frac{S_{\text{bet}}}{L_{\text{bet}}} \cdot (T_3 - T_2), \\ Q_4 &= \kappa_{\text{Al}} \cdot \frac{S_{\text{Al}}}{L_{\text{Al}}} \cdot (T_4 - T_3), \end{aligned} \quad (9)$$

где  $S_{\text{asf}}$ ,  $S_{\text{bet}}$ ,  $S_{\text{al}}$ ,  $L_{\text{asf}}$ ,  $L_{\text{bet}}$ ,  $L_{\text{al}}$ ,  $\kappa_{\text{asf}}$ ,  $\kappa_{\text{bet}}$ ,  $\kappa_{\text{al}}$  – площади теплопроникающих площадок, толщины слоев и теплопроводности асфальта, бетона и алюминиевого теплопровода, соответственно;  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ ,  $T_4$  – температуры теплопринимающей площадки асфальта, контакта «асфальт-бетон», контакта «бетон-теплопринимающая площадка алюминиевого теплопровода», контакта «теплопринимающая площадка алюминиевого теплопровода-термоэлектрический преобразователь», соответственно.

Тепловые потоки на горячей  $Q_{\text{hеb}}$  и холодной  $Q_{\text{стеb}}$  стороне термоэлектрического преобразователя, для случая однородного изотропного материала:

$$Q_{hтеб} = \alpha_{теб} \cdot T_4 \cdot I - \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot \sigma_{теб} \cdot \frac{L_{теб}}{S_{теб}} - \kappa_{теб} \cdot \frac{S_{теб}}{L_{теб}} \cdot (T_4 - T_5), \quad (10)$$

$$Q_{стеб} = \alpha_{теб} \cdot T_5 \cdot I + \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot \sigma_{теб} \cdot \frac{L_{теб}}{S_{теб}} - \kappa_{теб} \cdot \frac{S_{теб}}{L_{теб}} \cdot (T_4 - T_5), \quad (11)$$

где  $\alpha_{теб}$ ,  $\sigma_{теб}$ ,  $\kappa_{теб}$  – коэффициенты термоЭДС, электропроводности и теплопроводности термоэлектрического преобразователя, соответственно;  $I$  – сила тока, генерируемого преобразователем;  $S_{теб}$ ,  $L_{теб}$  – площадь и высота преобразователя, соответственно;  $T_4$ ,  $T_5$  – температуры «горячей» и «холодной» сторон термоэлектрического преобразователя, соответственно.

При известных температурах горячей и холодной стороны термоэлектрического преобразователя можно получить величины тепловых потоков на этих сторонах, а через известные потоки – рассчитать мощность ( $W$ ) преобразователя

$$W = Q_{hтеб} - Q_{стеб}. \quad (12)$$

### Компьютерное моделирование ТЭГ под асфальтным покрытием

Для исследования работы термоэлектрического генератора под асфальтным покрытием в стационарном режиме (температура на поверхности почвы 300 К, а на глубине 55 см – 285 К) с помощью пакета прикладных программ Comsol Multiphysics создана трехмерная компьютерная модель, с помощью которой получено распределение температуры (рис. 6) в термоэлектрическом генераторе под асфальтным покрытием в стационарном режиме.

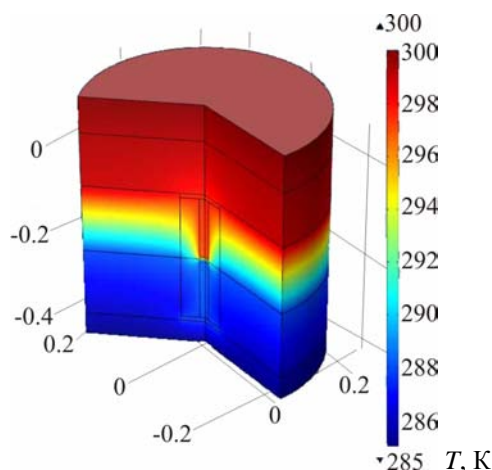


Рис. 6. Распределение температуры в ТЭГ под асфальтовым покрытием.

### Результаты моделирования и их обсуждение

На рис. 7 и рис. 8 приведены полученные с помощью компьютерного моделирования линии изотерм для термоэлектрического генератора в почве и под асфальтным покрытием.

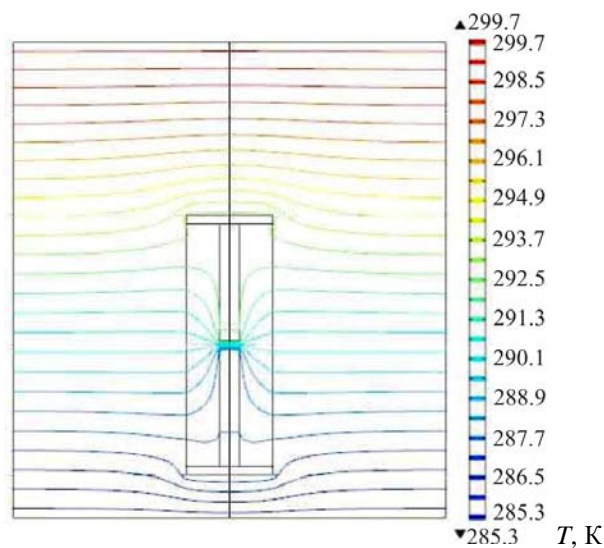


Рис. 7. Линии изотерм для термоэлектрического генератора в почке.

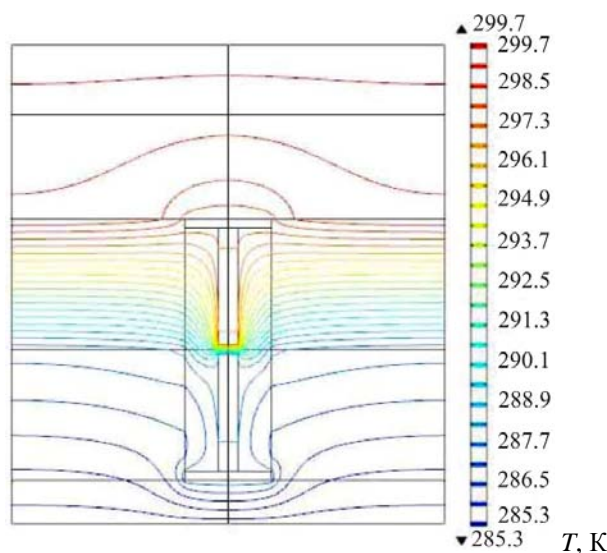


Рис. 8. Линии изотерм для термоэлектрического генератора под асфальтным покрытием.

Сравнивая данные рис. 7 и рис. 8 видим, что наличие асфальтного покрытия приводит к росту концентрации изотермических линий, проходящих сквозь термоэлектрический преобразователь. Таким образом, достигается большее значение перепада температуры, что позволяет получить более высокие значения термоЭДС генератора. Так, величина перепада температуры на преобразователе термогенератора под асфальтным покрытием составила  $\Delta T = 7.73 \text{ K}$  (при общем перепаде в 15 K), а у термоэлектрического генератора в почке при идентичных условиях  $\Delta T = 4.43 \text{ K}$ . Как известно, величина генерируемой электрической мощности термоэлектрического преобразователя прямо пропорциональна величине его термоЭДС, что задается соотношением

$$E = \alpha \cdot \Delta T, \tag{13}$$



$\alpha$  – коэффициент термоЭДС,  $\Delta T$  – перепад температуры между верхней и нижней гранями термопреобразователя.

Таким образом, величина электрической мощности термоэлектрического генератора под асфальтным покрытием составила 1.55 мВт, что почти вдвое больше электрической мощности генератора в почве ( $\approx 0.8$  мВт) в аналогичных условиях.

Итак, использование на поверхности теплопринимающей площадки ПТЭГ теплоконцентрирующих материалов, таких как асфальт, позволяет значительно увеличить его мощность, что важно для питания маломощной электронной аппаратуры. Установка таких генераторов открывает перспективы для их использования в дорожном асфальтном покрытии с целью питания различных сенсорных датчиков, светодиодных ламп дорожного освещения, подсветки дорожных знаков и др.

## Выводы

1. Разработаны физическая модель и компьютерное моделирование в стационарном режиме термоэлектрического генератора, использующего перепады температур в почве, для случая расположения генератора под асфальтным покрытием.
2. На примере конкретного варианта генератора Алтек-8027 подтверждено, что наличие асфальтного покрытия улучшает энергетические параметры генератора, напряжение и мощность ориентировочно в 1.9 раза.

## Литература

1. Анатичук Л.І. Термогенератори, що використовують теплові потоки в ґрунтах / Анатичук Л.І., Микитюк П.Д. // Термоелектрика. – 2003. – №3. – С. 86-95.
2. Микитюк П.Д. Термоелектричне джерело живлення, що використовує тепло ґрунту / Микитюк П.Д., Петренко Н.С. // Термоелектрика. – 2003. – №2. – С. 73-80.
3. Микитюк П.Д. Прилади термоелектричного перетворення теплової енергії ґрунту: Дисертація кандидата фізико-математичних наук: 01.04.01. Ч. 2004 р.
4. Анатичук Л.І. Термоелементи и термоелектрические устройства. Справочник / Л.І. Анатичук. – К.: Наук. думка, 1979. – 768 с.
5. Guangxi Wu, Xiong (Bill) Yu Thermal energy harvesting system to harvest thermal energy across pavement structure // International Journal of Pavement Research and Technology, Vol. 5, № 5, 2012. – pp. 311-316.
6. Kanghwi Lee, Seunghoon Kim, Jaejun Lee, Cheolmin Baek Fundamental study of apply energy harvesting technology in asphalt pavement.
7. Comsol Multiphysics User's Guide // COMSOLAB. – 2010. – 804 p.

Поступила в редакцию 09.12.2014.