



Дудаль В.А.

Дудаль В.А.

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

ПРЕДЕЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОДЗЕМНЫХ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ

Создана компьютерная модель для определения распределения температуры в почве при динамическом воздействии на поверхность Земли тепловой мощности солнечного излучения. Получены распределения температуры в песчаной почве для разных географических координат. Определена величина удельной электрической мощности подземного термоэлектрического генератора, использующего перепад температуры в почве, который можно получить за год и ежемесячно в разных географических зонах.

Ключевые слова: распределение температур в почве, подземный термоэлектрический генератор, удельная электрическая мощность.

Computer model was created for the determination of temperature distribution in soil with a dynamic effect on the Earth surface of solar radiation thermal power. Temperature distributions in sandy soil for different geographic coordinates were obtained. Specific electric power of underground thermoelectric generator using temperature difference in soil which can be obtained throughout the year and on a monthly basis in different geographic coordinates was determined.

Key words: temperature distribution in the soil, underground thermoelectric generator, specific integrated electric power.

Введение

Общая характеристика проблемы. Подземные источники электрической энергии являются привлекательными для обеспечения автономного питания аппаратуры небольших мощностей. В первую очередь это касается отдаленных и труднодоступных мест, где обслуживание специальной аппаратуры затруднено. Несмотря на существенно малые электрические мощности такие источники энергии могут стать незаменимыми для питания аппаратуры специального назначения, защитных и охранных систем, электронных приборов автономных метеостанций и прочее. Их преимуществом является то, что они скрыты от посторонних лиц, которые могут повлиять на их работоспособность или вывести из строя. На них не имеют существенного влияния погодные условия, что является преимуществом подземных источников электрической энергии по сравнению с фотоэлектрическими.

Перспективные маломощные источники электрической энергии – подземные термоэлектрические генераторы [1 – 6], использующие в качестве источника тепла тепловые процессы, происходящие в почве и на её поверхности.

Основным показателем теплового состояния почвы является её температура, которая определяется поступлением солнечной энергии и тепловыми свойствами самой почвы. Причем,

ключевые тепловые процессы, как указано в [2], происходят в приповерхностном слое.

Температура почвы – динамическая величина, изменяющаяся на разных глубинах почвенного профиля в разные периоды времени. Для нее характерны суточная и годовая периодичности [7, 8]. С глубиной амплитуда колебаний температуры снижается и суточная динамика на глубине 50 см практически полностью затухает. Годовой ход, как и суточный, связан с поступлением и расходом тепла и определяется, главным образом, радиационными факторами. Чаще всего за годовым ходом температуры почвы следят по данным среднемесячных ее значений.

В северном полушарии максимальные среднемесячные температуры поверхности почвы наблюдаются в июле-августе, когда отмечается самый большой приток тепла, а минимальные – в январе-феврале. Различие между максимальной и минимальной среднемесячными температурами за год называют амплитудой годового хода и она наиболее зависит от географической широты. Годовой режим температуры почв имеет большую амплитуду колебаний и выражен на большей глубине, чем суточный.

В работе [9] проведен анализ закономерностей протекания тепловых процессов в почвах для оценки эффективности подземных термоэлектрических генераторов. Полученные распределения температур в разных типах почв на разных географических широтах дали возможность определить предельно возможные удельные электрические мощности подземного термоэлектрического генератора

Цель данной работы – получение распределений температур в песчаной почве в разных географических координатах (широта, долгота) и определение удельной электрической мощности подземного термоэлектрического генератора, которую можно получить за год и ежемесячно.

Постановка задачи и способ ее решения

Для получения распределений температур в почве рассмотрена физическая модель её участка, приведенная на рис. 1.

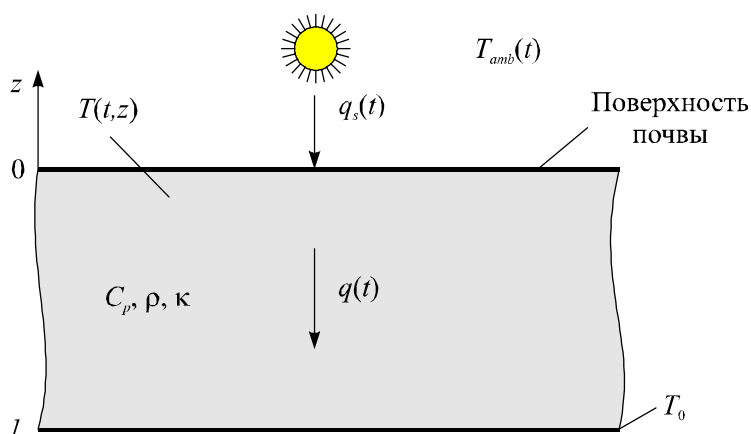


Рис. 1. Физическая модель участка почвы.

В модели рассмотрены тепловые процессы в почве под влиянием динамического воздействия на ее поверхность тепловой мощности солнечного излучения $q_s(t)$ ($\text{Вт}/\text{м}^2$) в течение суток. Свойства почвы характеризуются величинами её теплоемкости C_p , плотности ρ

и теплопроводности k .

В модели учтено суточное изменение температуры окружающей среды $T_{amb}(t)$, теплообмен участка почвы с окружающей средой путем теплопередачи, конвекции и излучения. На определенной глубине l температуру почвы T_0 считаем постоянной.

Искомыми величинами являются распределение температуры в почве $T(t, z)$ и плотности теплового потока $q(t)$ в зависимости от глубины z и времени t .

Распределение температуры в толще почвы описывается нестационарным законом Фурье:

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} + \nabla(-\kappa \nabla T) = 0. \quad (1)$$

Конвективный теплообмен на поверхности почвы описывается уравнением

$$-\vec{n} \vec{q} = q_0, \quad (2)$$

где \vec{n} – нормаль к поверхности почвы, \vec{q} – тепловой поток через поверхность почвы, q_0 – тепловой поток с поверхности почвы за счет конвекции:

$$q_0 = h(T_{amb} - T) \quad (3)$$

(h – коэффициент конвекции).

Излучение с поверхности почвы описывается законом Стефана-Больцмана

$$q_r = \sigma \varepsilon (T_{amb}^4 - T^4), \quad (4)$$

где σ – постоянная Стефана-Больцмана, ε – степень черноты поверхности.

Граничными условиями для уравнений (1) – (4) являются:

– при $z = 0$: тепловой поток на поверхности почвы $q = (1 - k_s) q_s(t)$, где k_s – альбедо почвы, $q_s(t)$ – тепловая мощность солнечного излучения [10];

– при $z = l$: $T = T_0$.

Компьютерная модель, позволяющая решить уравнения (1) – (4), была создана в Comsol Multiphysics [10]. Расчет распределений температур в почве осуществлялся методом конечных элементов, суть которого заключается в том, что исследуемый объект разбивается на большое количество элементов, и в каждом из них ищется значение функции, которое удовлетворяет заданным дифференциальным уравнениям второго порядка с соответствующими граничными условиями. Точность решения поставленной задачи зависит от уровня разбивки и обеспечивается использованием большого количества конечных элементов.

Для решения поставленной задачи использовался компьютерный модуль передачи тепла от поверхности к поверхности излучением (heat transfer with surface-to-surface radiation), который предназначен для моделирования процессов переноса тепла за счет теплопроводности, конвекции и излучения. Положение Солнца и его мощность задавались в модуле внешнего источника излучения (external radiation source) с указанием географических координат исследуемого объекта, даты и времени исследования.

Температура окружающей среды $T_{amb}(t)$ задавалась как функция времени по усредненным данным климатических наблюдений за 2015 год [11] для географических точек на

разных широтах и долготах. В качестве исследуемых точек были избраны населенные пункты с соответствующими географическими координатами, которые приведены в таблице 1.

В модели температуру почвы на глубине 2 м считаем постоянной и равной + 7 °С [8]. Расчеты проведены для одних суток каждого месяца года (15 число).

Таблица 1

*Географические координаты исследуемых точек и населенные пункты,
 для которых брались данные климатических наблюдений*

№ точки	Широта, град		Долгота, град		Временной пояс, UTC	Населенный пункт	Страна
	Св.	Юж.	Зп.	Вс.			
1.	60		150		-9	Сьюард	США
2.	60		120		-7	Эдмонтон	Канада
3.	30		90		-6	Новый Орлеан	США
4.	0		60		-3	Боа-Виста	Бразилия
5.		30	60		-3	Реконкиста	Аргентина
6.	30			0	+0	Адрар	Алжир
7.	60			30	+3	Санкт-Петербург	Российская Федерация
8.	30			30	+2	Каир	Египет
9.		0		30	+3	Кампала	Уганда
10.		30		30	+2	Дурбан	ЮАР
11.	60			60	+5	Пермь	Российская Федерация
12.	30			60	+3	Захедан	Иран
13.	60			90	+7	Красноярск	Российская Федерация
14.	30			90	+8	Тхимпху	Бутан
15.	60			120	+9	Якутск	Российская Федерация
16.	30			120	+8	Ханчжоу	КНР
17.	0			120	+8	Макасар	Индонезия
18.		30		120	+8	Калгурли	Австралия
19.	60			150	+11	Магадан	Российская Федерация
20.		30		150	+10	Даббо	Австралия

В работе анализ проводился для песчаной почвы, теплофизические характеристики которой приведены в таблице 2.

Таблица 2

Теплофизические характеристики песчаной почвы

Теплопроводность, Вт/(м·К)	Теплоемкость, Дж/(кг·К)	Плотность, кг/м ³	Коэффициент отражения (альбедо), %	Коэффициент излучения
0.52	770	1200	30-35	0.9

Анализ результатов и их обсуждение

С помощью компьютерного моделирования получены распределения в песчаной почве при динамическом действии на его поверхность тепловой мощности солнечного излучения на разных глубинах от поверхности до глубины 2 м через каждые 10 см в разных географических координатах.

Как было указано в [9], самую большую амплитуду колебаний имеет температура на поверхности почвы. С увеличением глубины эти колебания затухают и на глубине 50 см они практически отсутствуют. Поэтому дальнейшие расчеты проводились именно для перепада температуры, возникающего между поверхностью почвы и ее значением на глубине 50 см.

Удельный тепловой поток, который проходит через поверхность почвы на глубину 50 см, можно определить с помощью выражения:

$$q = \kappa \frac{(T_2 - T_1)}{L}, \quad (5)$$

где κ , L – теплопроводность и толщина слоя песчаной почвы соответственно; T_2 , T_1 – температуры поверхности почвы и на глубине 50 см соответственно.

Для расчетов КПД подземного термоэлектрического генератора можно воспользоваться выражением

$$\eta = \frac{1}{4} \frac{(T_2 - T_1)}{T_2} Z \frac{(T_2 + T_1)}{2}, \quad (6)$$

где Z – добротность термоэлектрического материала, которая для вычислений составляла величину $3 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$. Согласно [12], расхождение КПД, рассчитанными по формуле (6), с точными значениями обычно не превышает 10 %.

Таким образом по формуле

$$W = \eta q, \quad (7)$$

определяем удельную электрическую мощность (W), которую можно получить от подземного термоэлектрического генератора.

Проинтегрировав по формуле

$$A = \int_0^{\tau} \eta q(t) dt, \quad (8)$$

электрическую мощность (7), получим значение суммарной удельной энергии (A), которую можно получить от подземного генератора в течение времени ($\tau = 24$ ч). При расчетах использовались среднемесячные значения температуры окружающей среды, поэтому удельная энергия в течение месяца определялась как произведение полученной суточной энергии на количество дней в соответствующем месяце. На рис. 2 приведены результаты расчетов удельной электрической энергии, которую может выработать подземный термоэлектрический генератор, в течение года в песчаной почве на разных широтах. Видно, что четко наблюдаются годовые амплитудные колебания и сезонность на разных географических широтах.

На рис. 3 приведены среднемесячные значения удельной электрической энергии, которую можно получить от подземного термоэлектрического генератора, вдоль экваториальной зоны на разных географических долготах (а) и вдоль широты для 30° и 120° восточной долготы (б), где знак «-» соответствует западной долготе и южной широте.

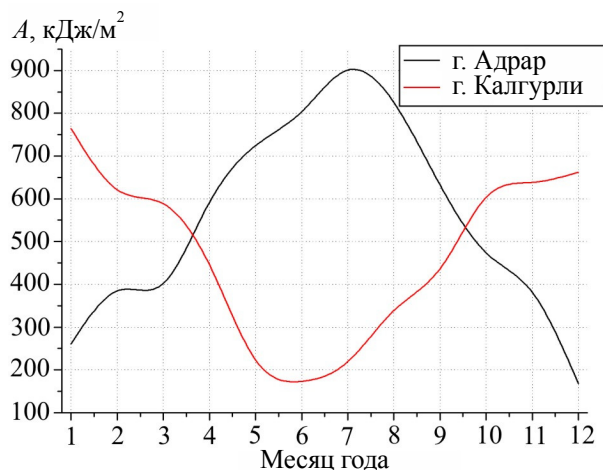


Рис. 2. Годовой ход удельной электрической энергии подземного термоэлектрического генератора на северной (г. Адрар) и южной широтах (г. Калгурли).

Анализируя рис. 3а можно заметить, что среднее значение удельной электрической энергии составляет 538 кДж/м², при этом отклонение вдоль экваториальной зоны не превышает 4 %. На рис. 3б наблюдается четкая зависимость удельной электрической энергии от широты, которая объясняется величиной полученного теплового излучения в течение года вследствие расположения Солнца. Незначительное отклонение значений от долготы можно объяснить климатическими условиями определенного региона.

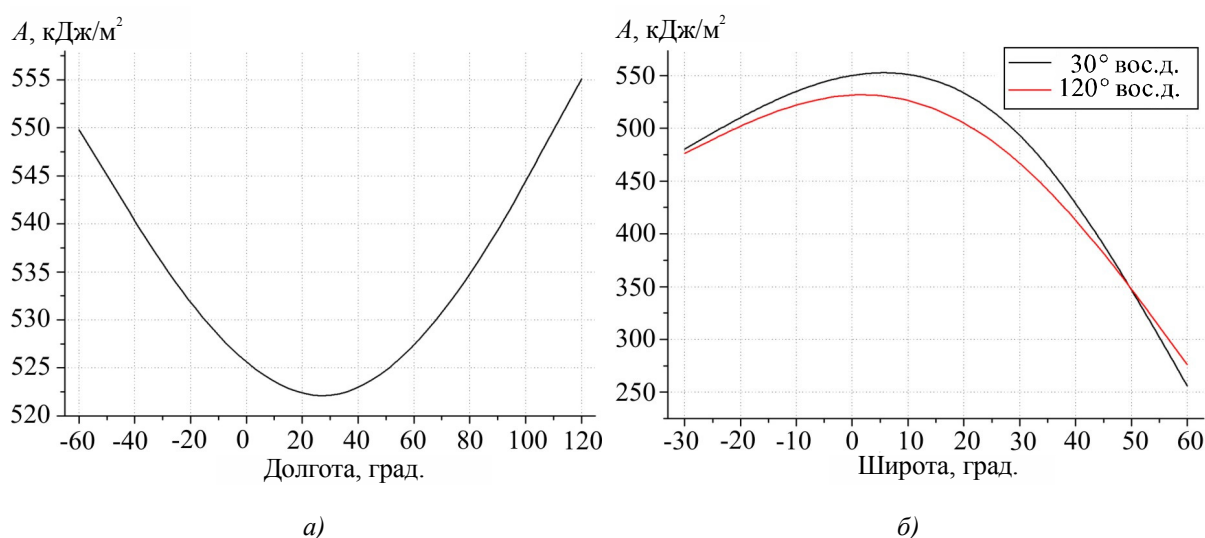


Рис. 3. Среднемесячные значения удельной электрической энергии, которую можно получить от подземного термоэлектрического генератора, вдоль экваториальной зоны на разных географических долготах (а) и вдоль широты для 30° и 120° восточной долготы (б).

На рис. 4 приведено распределение удельной электрической энергии, которую можно получить от подземного термоэлектрического генератора, в течение года в разных географических координатах.

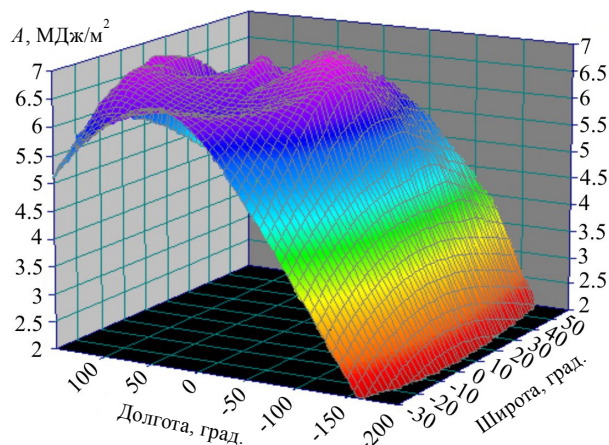


Рис. 4. Удельная электрическая энергия, которую можно получить от подземного термоэлектрического генератора, в течение года в разных географических координатах.

На основе рис. 4 можно определить приближенные значения электрической энергии, которую можно получить от подземного термоэлектрического генератора в любом регионе, что позволяет сделать предварительную оценку эффективности и целесообразности их использования.

Выводы

1. Рассчитаны предельно возможные величины удельной электрической энергии, которую можно получить в течение года и ежемесячно от подземного термоэлектрического генератора, в разных географических координатах, что позволяет делать оценку эффективности их использования.
2. Установлено, что среднее значение удельной электрической энергии в течение года вдоль экваториальной зоны составляет 538 кДж/м^2 при этом отклонение на разных широтах не превышает 4 %.

Определено, что среднее значение удельной электрической энергии вдоль широты составляет 400 кДж/м^2 , а отклонение на разных долготах не превышает 6 %.

Литература

1. Анатычук Л.И. Термогенераторы, использующие тепловые потоки в почвах / Анатычук Л.И., Микитюк П.Д. // Термоэлектричество. – 2003. – №3. – С. 91 – 100.
2. Микитюк П.Д. Прилади термоелектричного перетворення теплової енергії ґрунту: Дисертація кандидата фізико-математичних наук: 01.04.01. Ч. 2004 р.
3. Микитюк П.Д. Термоэлектрический источник питания, использующий тепло почвы / Микитюк П.Д., Петренко М.С. // Термоэлектричество. – 2003. – №2. – С. 75 – 82.
4. Микитюк П.Д. Полігон для досліджень відновлювальних термоелектричних генераторів у ґрунті / Микитюк П.Д., Дудаль В.О. // Науковий вісник Чернівецького університету: збірник наук. праць. Фізика. Електроніка. – Т. 4, Вип. 1. – Чернівці: Чернівецький національний університет, 2015. – С. 54 – 59.

5. Дудаль В.О. Особливості використання ґрунтових термоелектричних генераторів та термоелектричних перетворювачів для них // Науковий вісник Чернівецького університету: збірник наук. праць. Фізика. Електроніка. – Т. 3, Вип. 2. – Чернівці: Чернівецький національний університет, 2014. – С. 75 – 81.
6. Микитюк П.Д. Термогенераторы с возобновляемыми источниками тепловой энергии / Микитюк П.Д. // Автономная энергетика. – 2009. – № 26. – С. 61 – 68.
7. Ковда В.А., Розанова Б.Г. Почвоведение. Часть 1. Почва и почвообразование. – М.: Высшая школа, 1988. – 400 с.
8. Ковда В.А., Розанова Б.Г. Почвоведение. Часть 2. Типы почв, их география и использование. – М.: Высшая школа, 1988. – 368 с.
9. Дудаль В.О. Распределения температур в почве и возможности подземных термоэлектрических генераторов / Дудаль В.О., Кузь Р.В. // Термоэлектричество. – 2016. – № 2. – С. 89 – 95.
10. Comsol Multiphysics User's Guide // COMSOLAB. – 2010. – 804 p.
11. <https://rp5.ua>.
12. Анатычук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства. Справочник / Л.И. Анатычук. – К.: Наук. думка, 1979. – 768 с.

Поступила в редакцию 25.05.16.