



Дудаль В.О.

Дудаль В.О.

Інститут термоелектрики НАН і МОН України,
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна

ГРАНИЧНІ МОЖЛИВОСТІ ПІДЗЕМНИХ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ГЕНЕРАТОРІВ

Створено комп'ютерну модель для визначення розподілу температури у ґрунті за динамічної дії на поверхню Землі теплової потужності сонячного випромінювання. Одержано розподіли температури у піщаному ґрунті для різних географічних координат. Визначено величину питомої електричної потужності підземного термоелектричного генератора, що використовує перепад температури у ґрунті, яку можна одержати за рік та помісячно в різних географічних координатах.

Ключові слова: розподіл температур у ґрунті, підземний термоелектричний генератор, питома електрична потужність.

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 soil, underground thermoelectric generator, specific electric power.

Вступ

Загальна характеристика проблеми. Підземні джерела електричної енергії привабливі для забезпечення автономного живлення апаратури невеликих потужностей. В першу чергу це стосується віддалених та важкодоступних місць, де обслуговування спеціальної апаратури утруднене. Незважаючи на істотно малі електричні потужності, такі джерела енергії можуть стати незамінними для живлення апаратури спеціального призначення, захисних і охоронних систем, електронних приладів автономних метеостанцій та інше. Їхня перевага в тому, що вони приховані від сторонніх осіб, які можуть вплинути на їх працездатність чи вивести з ладу. На них не мають істотного впливу погодні умови, що робить підземні джерела електричної енергії більш привабливими порівняно із фотоелектричними.

Перспективними малопотужними джерелами електричної енергії є підземні термоелектричні генератори [1 – 6], які як джерело тепла використовують теплові процеси, що відбуваються у ґрунтах і на їх поверхні.

Основним показником теплового стану ґрунту є його температура, яка визначається надходженням сонячної енергії і тепловими властивостями самого ґрунту. Причому, ключові теплові процеси, як зазначено у [2], відбуваються у приповерхневому шарі ґрунту.

Температура ґрунту – динамічна величина, яка змінюється на різних глибинах ґрунтового

профілю в різні періоди часу. Для неї характерна добова і річна періодичність [7, 8]. З глибиною амплітуда коливань температури знижується і добова динаміка на глибині 50 см практично повністю затухає. Річний хід, як і добовий, пов'язаний з приходом і витратою тепла та визначається головним чином радіаційними факторами. Найчастіше за річним ходом температури ґрунту стежать за даними середньомісячних її значень.

У північній півкулі максимальні середньомісячні температури поверхні ґрунту спостерігаються в липні-серпні, коли відмічається найбільший притік тепла, а мінімальні – в січні-лютому. Різниця між максимальною та мінімальною середньомісячною температурою за рік називають амплітудою річного ходу, і вона найбільше залежить від географічної широти. Річний режим температури ґрунтів має велику амплітуду коливань і виражений на більшу глибину, ніж добовий.

У роботі [9] зроблено аналіз закономірностей протікання теплових процесів у ґрунтах для оцінки ефективності підземних термоелектричних генераторів. Отримані розподіли температур у різних типах ґрунтів на різних географічних широтах дали можливість визначити гранично можливі питомі електричні потужності підземного термоелектричного генератора.

Мета пропонованої роботи – отримання розподілів температур у піщаному ґрунті в різних географічних координатах (широта, довгота) та визначення питомої електричної потужності підземного термоелектричного генератора, яку можна одержати за рік та помісячно.

Постановка задачі та спосіб її вирішення

Для отримання розподілів температур у ґрунті розглянуто фізичну модель ділянки ґрунту, наведену на рис. 1.

У моделі розглянуто теплові процеси у ґрунті під впливом динамічної дії на його поверхню теплової потужності сонячного випромінювання $q_s(t)$ (Вт/м²) упродовж доби. Властивості ґрунту характеризуються величинами його теплоємності C_p , густини ρ та теплопровідності κ .

У моделі враховано добову зміну температури навколишнього середовища $T_{amb}(t)$, теплообмін ділянки ґрунту з навколишнім середовищем шляхом теплопередачі, конвекції та випромінювання. На певній глибині l температура ґрунту T_0 вважається постійною.

Шуканими величинами є розподіл температури у ґрунті $T(t, z)$ та густини теплового потоку $q(t)$ залежно від глибини z і часу доби t .

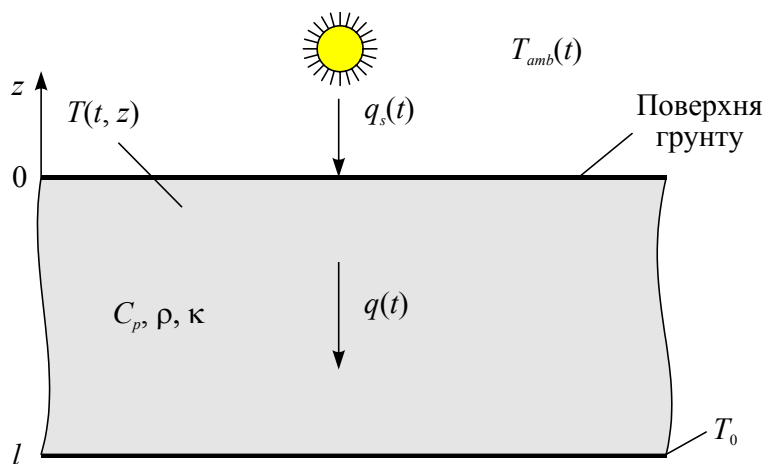


Рис. 1. Фізична модель ділянки ґрунту.

Розподіл температури у товщі ґрунту описується нестационарним законом Фур'є:

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

Конвективний теплообмін на поверхні ґрунту описується рівнянням

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

де \vec{n} – нормаль до поверхні ґрунту, \vec{q} – тепловий потік через поверхню ґрунту, q_0 – тепловий потік з поверхні ґрунту за рахунок конвекції

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

де h – коефіцієнт конвекції.

Випромінювання з поверхні ґрунту описується законом Стефана-Больцмана

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

де σ – стала Стефана-Больцмана, ε – ступінь чорноти поверхні.

Граничними умовами для рівнянь (1) – (4) є:

– за $z = 0$ тепловий потік на поверхні ґрунту $q = (1 - k_s)q_s(t)$, де k_s – альbedo ґрунту, $q_s(t)$ – теплова потужність сонячного випромінювання [10];

– за $z = l$: $T = T_0$.

Комп'ютерну модель, яка дає можливість розв'язати рівняння (1) – (4), було створено у середовищі Comsol Multiphysics [10]. Розрахунок розподілів температур у ґрунті здійснювався методом скінченних елементів, суть якого полягає в тому, що досліджуваний об'єкт розбивається на велику кількість елементів, і в кожному з них шукається значення функції, яке задовольняє заданим диференціальним рівнянням другого порядку з відповідними граничними умовами.

Точність розв'язання поставленої задачі залежить від рівня розбиття і забезпечується використанням великої кількості скінченних елементів.

Для розв'язку поставленої задачі використовувався комп'ютерний модуль передачі тепла від поверхні до поверхні випромінюванням (heat transfer with surface-to-surface radiation), який призначений для моделювання процесів переносу тепла за рахунок теплопровідності, конвекції і випромінювання. Положення Сонця та його потужність задавались в модулі зовнішнього джерела випромінювання (external radiation source) із зазначенням географічних координат досліджуваного об'єкта, дати та часу дослідження.

Температура навколишнього середовища $T_{amb}(t)$ задавалась як функція часу за усередненими даними кліматичних спостережень за 2015 рік [11] для географічних точок на різних широтах і довготах. Як досліджувані точки були обрані населені пункти з відповідними географічними координатами, які наведені у табл. 1.

В моделі температура ґрунту на глибині 2 м вважається сталою і рівною $+7$ °C [8]. Розрахунки проведено для однієї доби кожного місяця року (15 число).

Таблиця 1

*Географічні координати досліджуваних точок і населені пункти,
для яких брались дані кліматичних спостережень*

№ точки	Широта, град		Довгота, град		Часовий пояс, UTC	Населений пункт	Країна
	Пн.	Пд.	Зх.	Сх.			
1	2	3	4	5	6	7	8
1.	60		150		-9	Сьюард	США
2.	60		120		-7	Едмонтон	Канада
3.	30		90		-6	Новий Орлеан	США
4.	0		60		-3	Боа-Віста	Бразилія
5.		30	60		-3	Реконкіста	Аргентина
6.	30			0	+0	Адрар	Алжир
7.	60			30	+3	Санкт-Петербург	Російська Федерація
8.	30			30	+2	Каїр	Єгипет
9.		0		30	+3	Кампала	Уганда
10.		30		30	+2	Дурбан	ПАР
11.	60			60	+5	Перм	Російська Федерація
12.	30			60	+3	Захедан	Іран
13.	60			90	+7	Красноярськ	Російська Федерація
14.	30			90	+8	Тхімпху	Бутан
15.	60			120	+9	Якутськ	Російська Федерація
16.	30			120	+8	Ханчжоу	КНР
17.	0			120	+8	Макасар	Індонезія
18.		30		120	+8	Калгурлі	Австралія
19.	60			150	+11	Магадан	Російська Федерація
20.		30		150	+10	Даббо	Австралія

В роботі аналіз проводився для піщаного ґрунту, теплофізичні характеристики якого наведено у табл. 2.

Таблиця 2

Теплофізичні характеристики піщаного ґрунту

Теплопровідність, Вт/(м·К)	Теплоємність, Дж/(кг·К)	Густина, кг/м ³	Коефіцієнт відбивання (альbedo), %	Коефіцієнт випромінювання, %
0.52	770	1200	30 – 35	0.9

Аналіз результатів та їх обговорення

За допомогою комп'ютерного моделювання отримано розподіли температур у піщаному ґрунті при динамічній дії на його поверхню теплової потужності сонячного випромінювання на різних глибинах від поверхні до глибини 2 м через кожні 10 см у різних географічних координатах.

Як було зазначено у [9], найбільшу амплітуду коливань має температура на поверхні ґрунту. Зі збільшенням глибини ці коливання згасають і на глибині 50 см вони практично відсутні. Тому подальші розрахунки робилися саме для перепаду температури, який виникає між поверхнею ґрунту і її значенням на глибині 50 см.

Питомий тепловий потік, який проходить через поверхню ґрунту до глибини 50 см, можна визначити за допомогою виразу

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

де κ , L – теплопровідність і товщина шару піщаного ґрунту відповідно; T_2 , T_1 – температури поверхні ґрунту і на глибині 50 см, відповідно.

Для розрахунку ККД підземного термоелектричного генератора можна скористатись виразом

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

де Z – добротність термоелектричного матеріалу, яка для обчислень складала величину $3 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$. Згідно з [12] розбіжність ККД за формулою (6) з точними значеннями зазвичай не перевищує 10 %.

Таким чином за формулою

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

визначаємо питому електричну потужність (W), яку можна отримати від підземного термоелектричного генератора. Проінтегрувавши за формулою

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

електричну потужність (7), одержимо значення сумарної питомої енергії, яку можна отримати від підземного генератора впродовж доби ($\tau = 24$ год). У розрахунках використовувались середньомісячні значення температури навколишнього середовища, тому питома енергія упродовж місяця визначалась як добуток одержаної добової енергії на кількість днів у відповідному місяці. На рис. 2 наведено результати розрахунку питомої електричної енергії, яку може виробити підземний термоелектричний генератор, упродовж року в піщаному ґрунті на різних широтах.

На рис. 2 чітко спостерігаються річні амплітудні коливання і сезонність на різних географічних широтах.

На рис. 3 наведено середньомісячні значення питомої електричної енергії, яку можна отримати від підземного термоелектричного генератора, вздовж екваторіальної зони на різних географічних довготах (a) та вздовж широти для 30° і 120° східної довготи (b), де знак «-» відповідає західній довготі і південній широті.

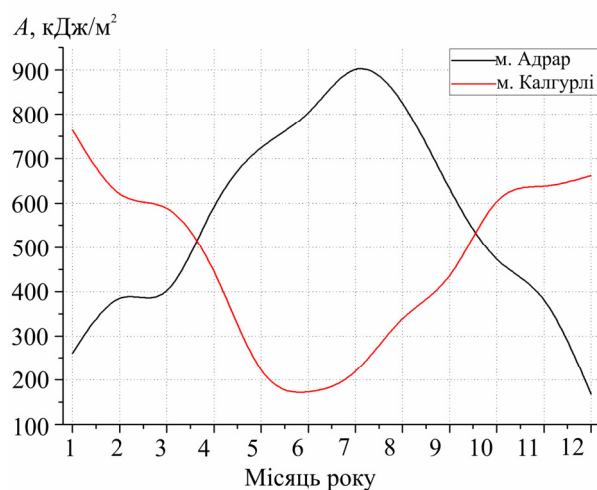
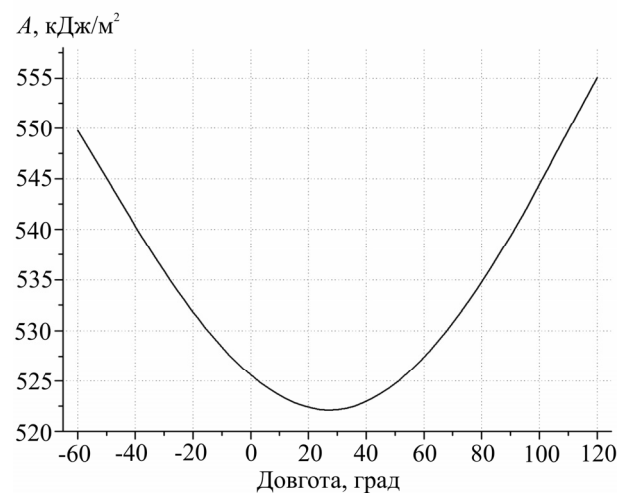
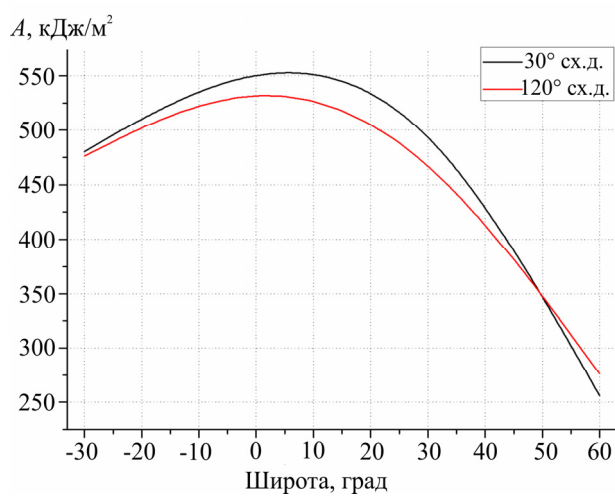


Рис. 2. Річний хід питомої електричної енергії підземного термоелектричного генератора в північній (м. Адрар) і південній широтах (м. Калгурлі).



а)



б)

Рис. 3. Середньомісячні значення питомої електричної енергії, яку можна отримати від підземного термоелектричного генератора, вздовж екваторіальної зони на різних географічних довготах (а) та вздовж широти для 30° і 120° східної довготи (б).

Аналізуючи рис. 3 а) можна зазначити, що середнє значення питомої електричної енергії становить 538 кДж/м^2 , при цьому відхилення вздовж екваторіальної зони не перевищує 4 %. На рис. 3 б) спостерігається чітка залежність питомої електричної енергії від широти, що пояснюється величиною отриманого теплового випромінювання упродовж року внаслідок розташування Сонця. Незначне відхилення значень від довготи можна пояснити кліматичними умовами певного регіону.

На рис. 4 наведено розподіл питомої електричної енергії, яку можна отримати від підземного термоелектричного генератора, упродовж року на різних географічних координатах.

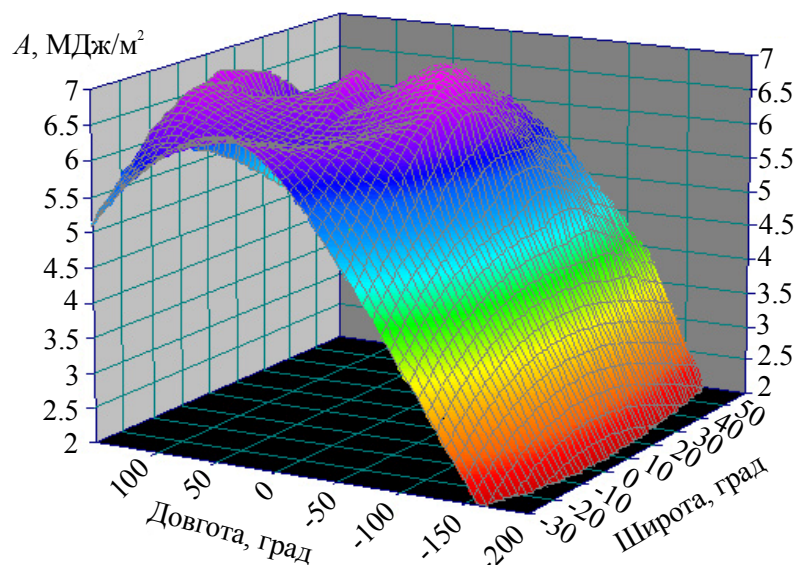


Рис. 4. Питома електрична енергія, яку можна отримати від підземного термоелектричного генератора, упродовж року на різних географічних координатах.

На основі рис. 4 можна визначити наближені значення електричної енергії, яку можна отримати від підземного термоелектричного генератора, в будь-якому регіоні, що дає можливість зробити попередню оцінку ефективності та доцільності їх використання.

Висновки

1. Розраховано гранично можливі величини питомої електричної енергії, яку можна отримати упродовж року і помісячно від підземного термоелектричного генератора, на різних географічних координатах, що дає можливість робити оцінку ефективності їх використання.
2. Встановлено, що середнє значення питомої електричної енергії упродовж року вздовж екваторіальної зони становить 538 кДж/м^2 , при цьому відхилення на різних широтах не перевищує 4 %.
3. Визначено, що середнє значення питомої електричної енергії вздовж широти становить 400 кДж/м^2 , а відхилення на різних довготах не перевищує 6 %.

Література

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. Прилади термоелектричного перетворення теплової енергії ґрунту: Дисертація кандидата фізико-математичних наук: 01.04.01. Ч. 2004 р.

3. Микитюк П.Д. Термоелектричне джерело живлення, що використовує тепло ґрунту / Микитюк П.Д., Петренко Н.С. // Термоелектрика. – 2003. – №2. – С. 73 – 80.
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. Розподіли температур у ґрунті і можливості підземних термоелектричних генераторів / Дудаль В.О., Кузь Р.В. // Термоелектрика. – 2016. – № 2. – С. 89 – 95.
10. Comsol Multiphysics User's Guide // COMSOLAB. – 2010. – 804 p.
11. <https://tp5.ua>.
12. Анатычук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства. Справочник / Л.И. Анатычук. – К.: Наук. думка, 1979. – 767 с.

Надійшла до редакції 25.05.2016