

Дудаль В.О. Кузь Р.В.



Дудаль В.О.

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

**РОЗПОДІЛИ ТЕМПЕРАТУР У ГРУНТІ
І МОЖЛИВОСТІ ПІДЗЕМНИХ
ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ГЕНЕРАТОРІВ**



Кузь Р.В.

Створено комп'ютерну модель для визначення розподілу температури у ґрунті за динамічної дії на поверхню Землі теплової потужності сонячного випромінювання упродовж доби. Одержано розподіли температури у ґрунті для різних географічних широт і типів ґрунтів. Визначено максимальну питому електричну потужність підземного термоелектричного генератора, який використовує перепад температури у ґрунті.

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

Computer model is created for the determination of temperature distribution in soil with a dynamic effect on the Earth surface of the diurnal solar radiation thermal power. Temperature distributions in soil for different geographic latitudes and soil types are obtained. Maximum specific electric power of underground thermoelectric generator using temperature difference in soil is determined.

Key words: temperature distribution in soil, underground thermoelectric generator.

Вступ

Загальна характеристика проблеми. Сучасною проблемою людства є пошук нових джерел енергії. Відомі нині джерела енергії поділяються на відновлювані – енергія Сонця, вітру, гідроенергія річок, внутрішнє тепло Землі, й невідновлювані – викопне мінеральне паливо та ядерна енергія. Актуальність розвитку відновлювальної енергетики зумовлена обмеженням ресурсом невідновлюваних джерел енергії та їх негативним впливом на навколишнє середовище [1].

Аналіз літературних джерел [2–7] показав, що одним із перспективних малопотужних джерел електричної енергії є підземні термоелектричні генератори, які в якості джерела тепла використовують теплові процеси, що відбуваються у ґрунтах і на їх поверхні.

Основний показник теплового стану ґрунту – його температура, яка визначається надходженням сонячної енергії і тепловими властивостями самого ґрунту. Причому, ключові теплові процеси, як зазначено у [3], відбуваються у приповерхневому шарі ґрунту.

Температура ґрунту – динамічна величина, яка змінюється на різних глибинах ґрунтового профілю в різні періоди часу. Для неї характерна добова періодичність [8, 9], яка різко виражена на невеликій глибині. З глибиною амплітуда коливань температури знижується і добова динаміка на глибині 50 см практично повністю затухає. Крива добового ходу температури являє собою хвилеподібну лінію. В окремі дні правильний хід добової температури порушується неперіодичними змінами, викликаними проходженням атмосферних фронтів, впливом перемінної хмарності, випаданням опадів. Добовий хід температури ґрунту найкраще виражений в теплу пору року за ясної погоди.

З огляду на вище вказане можна зазначити, що ретельний аналіз закономірностей протікання

теплових процесів у ґрунтах дасть можливість зробити більш глибоку оцінку ефективності підземних термоелектричних генераторів.

Мета нашої роботи – отримання розподілів температур у різних типах ґрунтів на різних географічних широтах та визначення гранично можливої питомої електричної потужності підземного термоелектричного генератора.

Постановка задачі та спосіб її вирішення

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

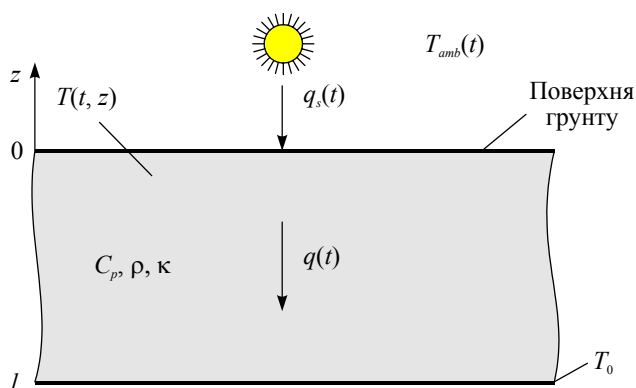


Рис. 1. Фізична модель ділянки ґрунту.

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 k .

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 .

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

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

Конвективний теплообмін на поверхні ґрунту описується рівнянням

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

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:

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

– при $z = l$ $T = T_0$.

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 скінчених 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 скінчених елементів.

Температура навколишнього середовища $T_{amb}(t)$ задавалась як функція часу за усередненими даними кліматичних спостережень за останні 10 років [11] для географічних точок різних широт. Для дослідження були обрані такі міста: Мурманськ (Росія) – 68⁰ пн. ш., 33⁰ сх. д.; Санкт-Петербург (Росія) – 60⁰ пн. ш., 30⁰ сх. д.; Чернівці (Україна) – 48⁰ пн. ш., 26⁰ сх. д.; Мадрид (Іспанія) – 40⁰ пн. ш., 3⁰ зх. д.; Каїр (Єгипет) – 30⁰ пн. ш., 31⁰ сх. д.; Яунде (Камерун) – 3⁰ пн. ш., 11⁰ сх. д.

У моделі температура ґрунту на глибині 2 м вважається сталою і рівною +7⁰С [8]. Розрахунки проведено для однієї доби – час літнього сонцестояння (21 червня).

У роботі проаналізовано кілька типів ґрунтів. Їхні теплофізичні характеристики наведено у таблиці:

Таблиця

Теплофізичні характеристики ґрунтів

Основна складова ґрунту	Теплопровідність, Вт/(м·К)	Теплоємність, Дж/(кг·К)	Густина, кг/м ³	Коефіцієнт відбивання (альbedo), %	Коефіцієнт випромінювання, %
Глина	0.45	775	1500	23	0.8
Пісок	0.52	770	1200	30 – 35	0.9
Чорнозем	0.63	960	1650	14	0.87

Аналіз результатів та їх обговорення

За допомогою комп'ютерного моделювання отримано розподіли температур у ґрунтах за динамічної дії на їх поверхню теплової потужності сонячного випромінювання на різних глибинах від поверхні до глибини 2 м через кожні 10 см.

На рис. 2 наведено приклад розподілів температур у піщаному ґрунті для географічного місцезнаходження м. Чернівці. Аналогічні залежності були отримані для інших географічних точок та типів ґрунтів. Аналізуючи розподіли температур, наведені на рис. 2, можна побачити, що найбільшу амплітуду коливань має температура на поверхні ґрунту. Зі збільшенням глибини ці коливання затухають і на глибині 50 см їх практично немає.

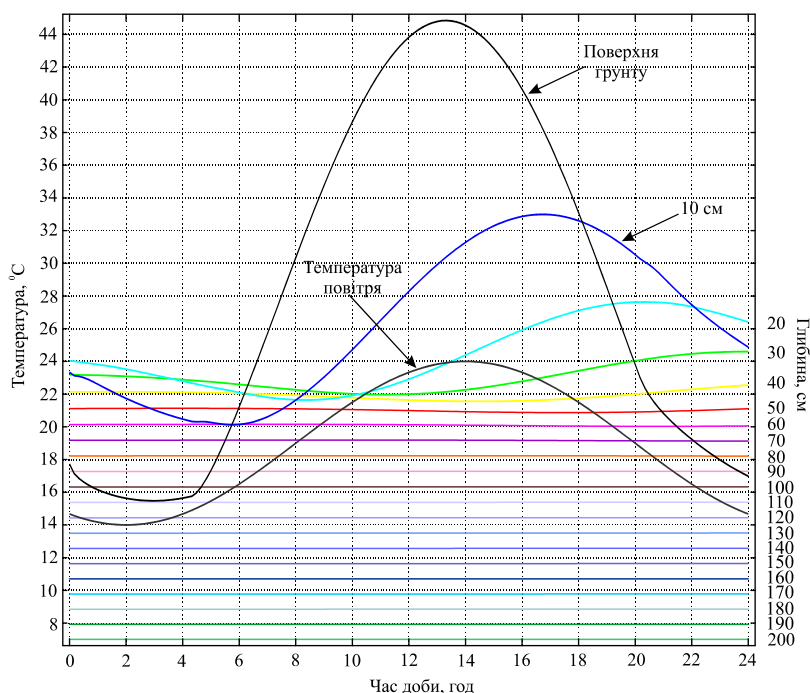


Рис. 2. Розподіл температури у піщаному ґрунті для географічного місцезнаходження м. Чернівці.

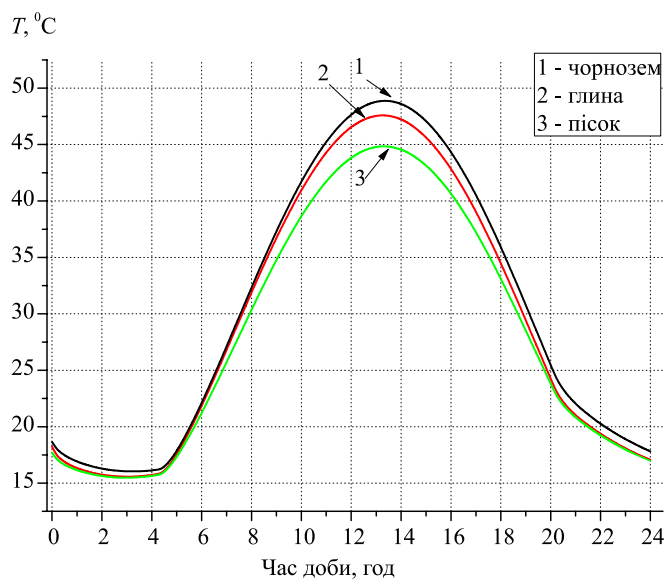


Рис. 3. Розподіл температур на поверхні ґрунту упродовж доби для різних типів ґрунтів.

На рис. 3 наведено криві розподілів температур на поверхнях піщаного ґрунту, глини та чорнозему упродовж доби. Найвища температура спостерігається близько першої години дня на поверхні чорнозему, що можна пояснити його кращими теплофізичними характеристиками порівняно з іншими розглядуваними типами ґрунтів. З огляду на це, дальший аналіз здійснювався для чорнозему.

На основі отриманих розподілів температур на різних глибинах були розраховані перепади температур між поверхнею ґрунту і її значеннями на глибинах 30, 40 та 50 см (рис. 4). Як видно з рис. 4, перепади температур на глибинах 30 – 50 см не істотно відрізняються між собою. Отже, конструкція

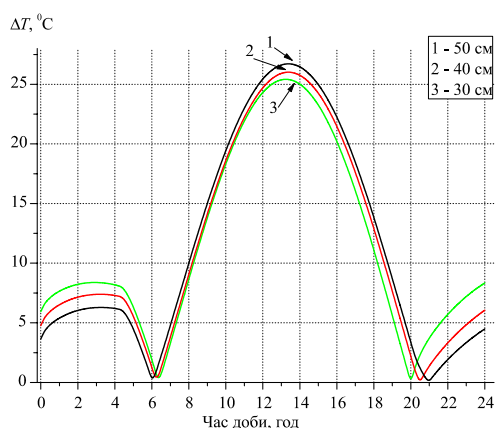


Рис. 4. Перепади температур між поверхнею ґрунту і глибинами 30, 40 та 50 см.

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

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

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

Для розрахунку ККД підземного термоелектричного генератора можна скористатись виразом

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

де Z – добротність термоелектричного матеріалу, яка для обчислень становила 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

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

можна визначити питому електричну потужність (W), яку можна отримати від підземного термоелектричного генератора.

На рис. 5 наведено добову зміну гранично можливої питомої електричної потужності, яку за вище розглянутих умов можна отримати від підземного термоелектричного генератора.

Аналізуючи рис. 5, можна сказати, що упродовж доби величина середньої питомої електричної потужності становить близько 300 мВт/м^2 . Здійснивши інтегрування кривої питомої електричної потужності, можна отримати сумарну питому енергію, яку отримуємо упродовж доби. На рис. 6 наведено результати розрахунку електричної енергії, яку може виробити підземний термоелектричний генератор упродовж доби в різних типах ґрунтів на різних широтах.

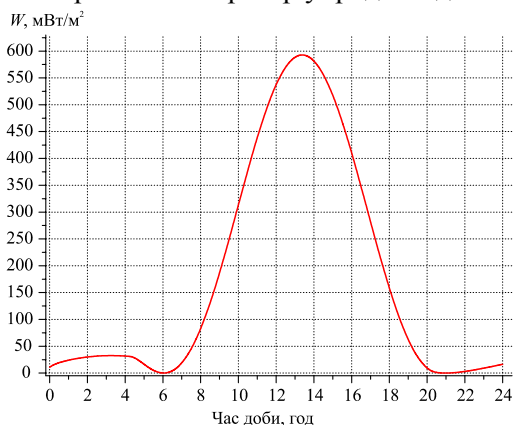


Рис. 5. Добовий хід гранично можливої електричної потужності підземного термоелектричного генератора.

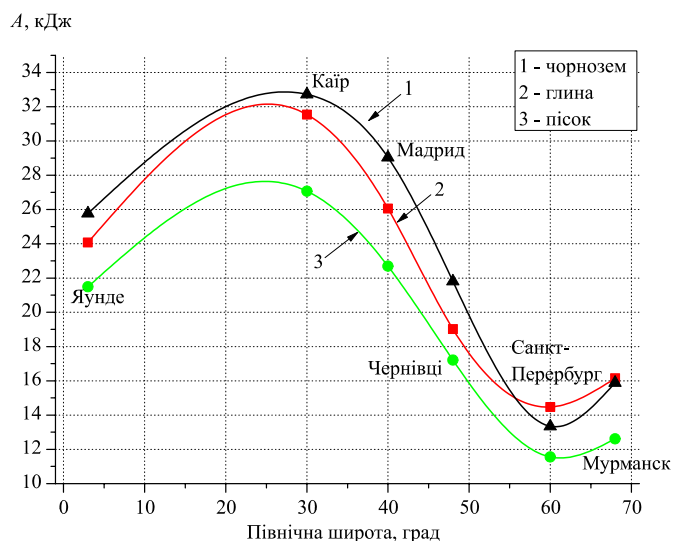


Рис. 6. Добовий хід гранично можливої електричної потужності підземного термоелектричного генератора.

Висновки

1. Створено комп'ютерну модель для визначення розподілу температури у ґрунті за динамічної дії на поверхню Землі теплової потужності сонячного випромінювання упродовж доби.
2. Встановлено, що зі збільшенням глибини добові коливання температури ґрунту затухають і на глибині 50 см вони становлять менше 1 %.
3. Розраховано значення температури поверхні для різних типів ґрунтів. Встановлено, що відхилення у значеннях температури поверхні досліджуваних ґрунтів різного типу не перевищує 7 %.
4. Розраховано гранично можливі величини питомої електричної енергії, яку можна отримати упродовж доби від підземного термоелектричного генератора у різних типах ґрунтів на різних географічних широтах. Найбільша величина становила 32.8 кДж/м^2 на 30° пн. ш.

Автори висловлюють щире подяку академіку НАН України Анатичуку Л.І. за постановку актуальної задачі та допомогу у її рішенні.

Література

1. https://uk.wikipedia.org/wiki/Відновлювана_енергетика.
2. Анатичук Л.І. Термогенератори, що використовують теплові потоки в ґрунтах / Анатичук Л.І., Микитюк П.Д. // Термоелектрика. – 2003. – №3. – С. 86 – 95.
3. Микитюк П.Д. Прилади термоелектричного перетворення теплової енергії ґрунту: Дисертація кандидата фізико-математичних наук: 01.04.01. Ч. 2004 р.
4. Микитюк П.Д. Термоелектричне джерело живлення, що використовує тепло ґрунту / Микитюк П.Д., Петренко Н.С. // Термоелектрика. – 2003. – №2. – С. 73 – 80.
5. 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.
6. 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.

7. Микитюк П.Д. Термогенераторы с возобновляемыми источниками тепловой энергии / Микитюк П.Д. // Автономная энергетика. – 2009. – № 26. – С. 61 – 68.
8. Ковда В.А., Розанова Б.Г. Почвоведение. Часть 1. Почва и почвообразование. – Москва: Высшая школа – 1988. – 400 с.
9. Ковда В.А., Розанова Б.Г. Почвоведение. Часть 2. Типы почв, их география и использование. – Москва: Высшая школа – 1988. – 368 с.
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. – 767 с.

Надійшла до редакції 18.04.2016.