

УДК 621.362



Анатичук Л.І.

Анатичук Л.І., *акад. НАН України*<sup>1,2</sup>  
Прибила А.В., *канд. фіз.-мат. наук*<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Інститут термоелектрики НАН та МОН України,  
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна;

<sup>2</sup> Чернівецький національний університет  
імені Юрія Федьковича,  
вул. Коцюбинського 2, Чернівці, 58012, Україна  
*e-mail: anatyuch@gmail.com*



Прибила А.В.

## ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИЙ ГЕНЕРАТОР, ЩО ВИКОРИСТОВУЄ ПЕРЕПАДИ ТЕМПЕРАТУР У МІСЯЧНОМУ ҐРУНТІ

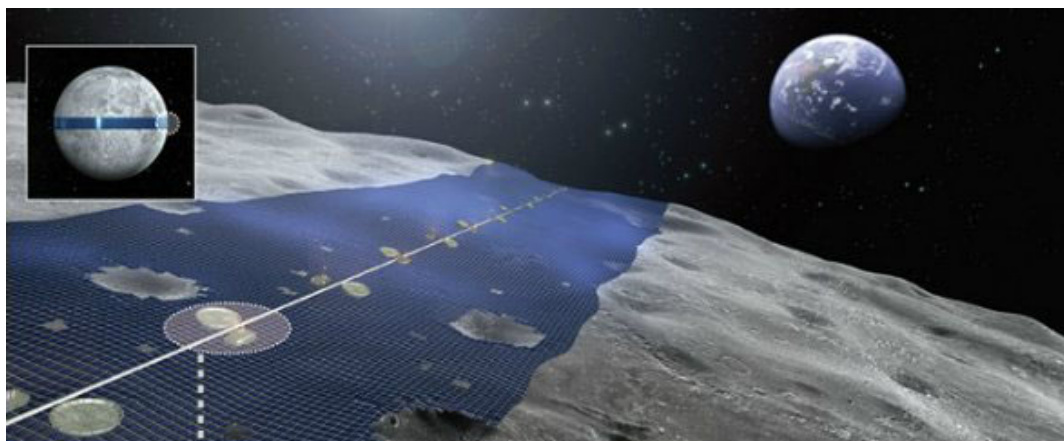
*У роботі виконано дослідження можливостей створення термоелектричного генератора на Місяці. Проаналізовано температурні і теплові умови у місячному ґрунті. Розраховані питомі потужність, вагу і вартість такого генератора. Здійснено порівняння термоелектричного генератора і сонячних батарей в умовах їх використання на Місяці.*

**Ключові слова:** термоелектричний ґрунтовий генератор, Місяць, проектування.

### Вступ

*Загальна характеристика проблеми.* Прогрес людства пов'язаний з постійним пошуком і вдосконаленням технологій, що забезпечують йому нові можливості як на Землі, так і при освоєнні оточуючого космічного простору. Вже давно погляди вчених спрямовані на колонізацію найближчих планет сонячної системи. Першим кроком для цього є спроба створення космічної бази на поверхні найближчого сателіта Землі – Місяця.

Забезпечення функціонування місячної бази пов'язане з потребами її живлення електричною енергією. Відомі нині людству основні джерела енергії поділяються на відновлювані – енергія Сонця, вітру, гідроенергія річок, внутрішнє тепло Землі, й невідновлювані – викопне мінеральне паливо та ядерна енергія. Із зрозумілих причин далеко не всі із цих джерел можна використати на поверхні Місяця.



*Рис. 1. Варіант сонячної електростанції на поверхні Місяця, запропонований Японською корпорацією Shimizu [1].*

Одним із найбільш цікавих джерел в даному контексті є енергія Сонця. Для її перетворення використовуються сонячні батареї, що при коефіцієнті перетворення 10–30% забезпечують непогані можливості для генерації електричної енергії (рис. 1). Проте вони мають і низку недоліків. Це, зокрема, відносно невеликий строк служби, особливо в умовах жорсткого космічного випромінювання, залежність від наявності сонячної радіації (місячний «день» і «ніч»), а також відносно великі масогабаритні показники, що значно підвищує вартість реалізації такого проекту.

Альтернативним способом перетворення енергії є використання перепадів температур в місячному ґрунті, які виникають внаслідок теплової дії сонячного випромінювання, шляхом термоелектричного перетворення енергії [2]. Такі генератори вже розроблені і працюють в умовах Землі [3–5]. Вони мають тривалий ресурс роботи (близько 30 років), низькі масогабаритні показники, а також є стійкими до механічних навантажень і космічного випромінювання, що особливо актуально в умовах даної задачі. Характеристики таких термоелектричних перетворювачів у значній мірі залежать від величини перепаду температур у ґрунті. В умовах Місяця перепад температури у метровому приповерхневому прошарку ґрунту складає близько 164 К (температура поверхні +127 °С, температура на глибині 1 м – 37 °С) для місячного «дня» і 136 К (температура поверхні –173 °С, температура на глибині 1 м – 37 °С) для місячної «ночі». Це є значно сприятливішими для термоелектрики показниками ніж у аналогічних генераторів на Землі (приповерхневі перепади температур у Земному ґрунті складають від кількох до десятка градусів).

Отже, метою даної роботи є вивчення можливостей створення термоелектричного генератора, що використовує перепади у місячному ґрунті.

## Генератори, що використовують перепади температур Землі

В Інституті термоелектрики НАН і МОН України розроблено серію ґрунтових термоелектричних генераторів (ГТЕГ), які вже протягом десятків років успішно функціонують і забезпечують живлення різноманітних малопотужних пристроїв, зокрема апаратури спеціального призначення, захисних і охоронних систем, електронних приладів автономних метеостанцій та інше. (рис. 2). Питома потужність таких термогенераторів складає близько 5 Вт / м<sup>2</sup> при перепаді температур < 10 К.

Фізичну модель та схему принципу дії термоелектричного генератора, що використовує теплову енергію ґрунту, показано на рис. 3.

Термоелектричний генератор, розташований у ґрунті, складається з теплоприймального колектора 1, теплопроводу 2, високоефективної багатоелементної батареї 3, тепловідводу 4, радіатора 5, корпусу 6 і теплоізоляції 7. Принцип дії термогенератора полягає ось у чому: тепловий потік  $q$ , наявний у ґрунті, потрапляє на теплоприймальну площадку 1, теплопроводом 2 підводиться до гарячих спаїв термобатареї 3, теплопроводом 4 відводиться до радіатора 5 і розсіюється у нижні шари ґрунту. Для зменшення теплових втрат корпус 6 термогенератора заповнено теплоізоляційним матеріалом. Із проходженням тепла через термобатарею на ній створюється градієнт температури, що зумовлює генерацію електричної потужності  $W$ . Слід зазначити, що впродовж



Рис. 2. Зовнішній вигляд ГТЕГ Алтек-8027.

доби напрямок руху теплового потоку може змінюватися на протилежний. Це дозволяє використовувати такий перетворювач не тільки вдень але і вночі, коли немає прямого потоку сонячної радіації на поверхню Землі.

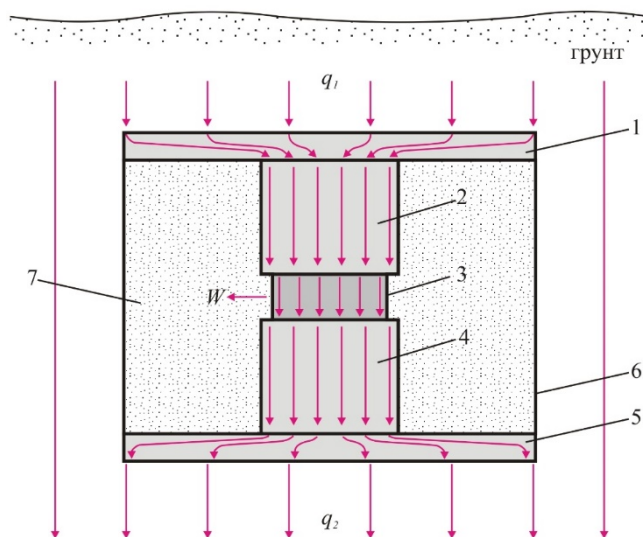


Рис. 3. Фізична модель термогенератора, розташованого в ґрунті.

Вказана фізична модель, із врахуванням деяких відмінностей, може бути використана для опису термоелектричного генератора на Місяці.

### Використання ідеї ґрунтового генератора на Місяці

Як було зазначено вище, температурні умови у метровому приповерхневому прошарку місячного ґрунту наступні :

- для місячного «дня»  
температура поверхні + 127 °С;  
температура на глибині 1 м – 37 °С;
- для місячної «ночі»  
температура поверхні – 173 °С;  
температура на глибині 1 м – 37 °С.

Такий перепад температур сприятливий для термоелектричного перетворення енергії, тому при проектуванні генератора були забезпечені умови рівності теплових опорів ІТЕГ і зазначеного прошарку місячного ґрунту.

На рис.4 представлено фізичну модель термоелектричного генератора на поверхні Місяця.

Джерелом тепла для генератора є потік сонячної радіації  $q_1$ , що потрапляє поверхню із алюмінієвої фольги 1 зі спеціальним селективним покриттям, яке забезпечує найкраще поглинання теплової енергії. Алюмінієва фольга слугує концентратором теплової енергії до віток термоелектричного матеріалу на основі телуриду вісмуту ( $BiTe$ )  $n$ - 2 і  $p$ - 3 типу провідності. Алюмінієвий концентратор 4 слугує для відведення теплової енергії  $q_2$  від термоелектричного матеріалу в місячний ґрунт. Проміжок між алюмінієвими пластинами заповнено вакуумом і в ньому відбуваються втрати теплового потоку  $q_{впр}$  шляхом випромінювання. Для їх зменшення в конструкцію генератора введено дзеркальну тонку пластину 5. На рисунку представлено елементарну секцію такого генератора для однієї пари віто термоелектричного матеріалу.

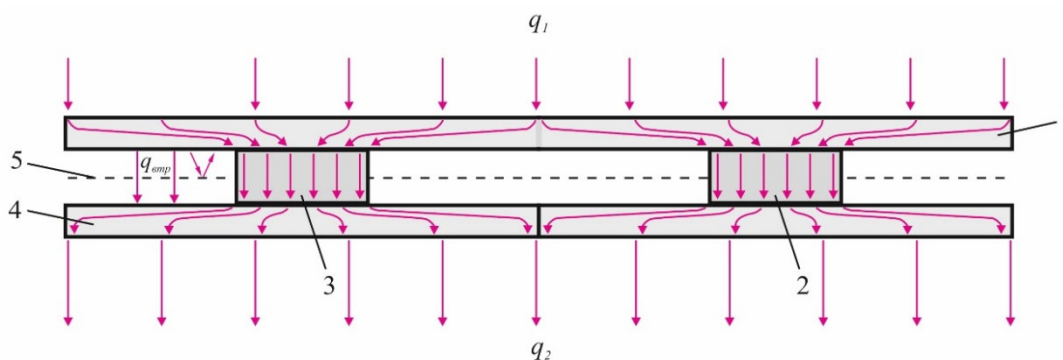


Рис. 4. Фізична модель термогенератора, розташованого в місячному ґрунті.

Відповідно до запропонованої фізичної моделі розраховано конструкцію генератора, а також його питомі показники. Розрахунки виконані із використанням методів комп'ютерного моделювання за допомогою пакету прикладних програм Comsol Multiphysics.

Розміри теплового концентратора визначалися із умов забезпечення рівномірності теплового потоку при мінімально можливій товщині. Отже, розрахункова товщина теплового концентратора становить 50 мкм.

Додатково проведено оцінку теплових втрат у проміжках між тепловими концентраторами шляхом випромінювання. Вони становлять  $\sim 16\%$  від величини корисного теплового потоку і призводять до зниження ефективності перетворення енергії. Для їх зменшення в конструкцію генератора введено дзеркальну тонку пластину (5 на рис.4), що дозволяє знизити втрати до  $7\%$ , а введення двох аналогічних пластин знижує теплові втрати до  $5\%$ .

Таким чином, остаточно конструкція ГТЕГ в розрахунку на  $1\text{ м}^2$  площі Місяця наступна:

- кількість віток термоелектричного матеріалу – 3124;
- висота віток – 2 мм;
- поперечний переріз віток –  $1 \times 1$  мм;
- товщина теплових концентраторів – 50 мкм.

В такому випадку за умов місячного «дня» генерована ГТЕГ електрична потужність становить  $W_e = 96\text{ Вт/м}^2$  (для порівняння варіант сонячного генератора продукує електричну потужність  $W_e = 100\text{ Вт/м}^2$ ).

Питома потужність генератора у відношенні до його маси становить  $W_p = 230\text{ Вт/кг}$  (для порівняння варіант сонячного фотоелектричного генератора має питому потужність  $W_p = 21\text{ Вт/кг}$ ).

Отже, по енергетичним показникам ГТЕГ знаходиться на одному рівні із фотоелектричним сонячним, проте має нижчу в 6 разів питому масу, що важливо в умовах значних витрат на доставку вантажу на Місяць. Крім того, ресурс роботи ГТЕГ становить до 30 років, що значно переважає можливості сонячного генератора, ресурс якого складає 5 – 10 років.

Крім того, на відміну від фотоелектричного сонячного генератора, ГТЕГ можна використовувати в умовах місячної «ночі», при цьому генерована ним електрична потужність буде становити  $W_e \approx 10\text{ Вт/м}^2$ .

### Особливості використання ґрунтового генератора на полюсах Місяця

Важливим фактором використання термоелектричного генератора на Місяці є місце географічного розташування місячної бази.

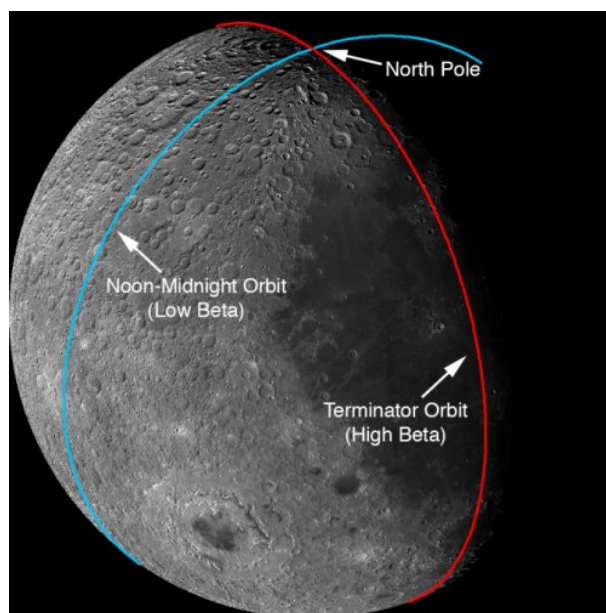


Рис. 5. Фото Місяця [6].

У випадку розташування місячної бази на полюсах виникають деякі особливості, пов'язані із кутом падіння сонячної радіації на поверхню місяця. Сонячні промені на полюсах падають по дотичній до поверхні, що значно змінює температурні і теплові умови в товщі місячного ґрунту. З другого боку, умови освітленості на полюсах Місяця є стабільнішими ніж в екваторіальній зоні.

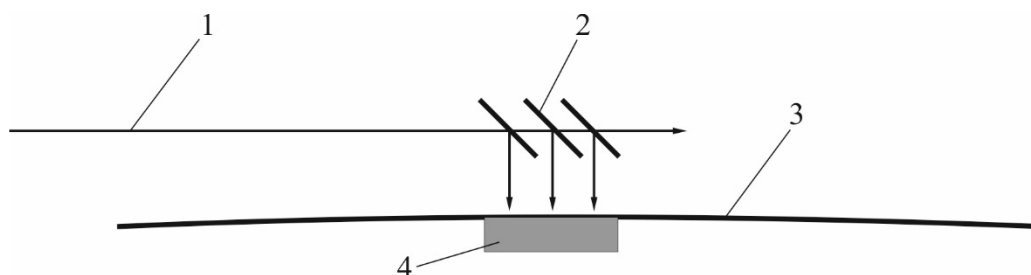


Рис. 6. Розміщення термоелектричного генератора на полюсі Місяця: 1 – сонячні промені, 2 – спрямовуючі елементи, 3 – поверхня Місяця, 4 – термоелектричний генератор.

В таких умовах використання запропонованої вище конструкції термоелектричного генератора не можливе. Виходом із такого становища є використання у конструкції ГТЕГ спрямовуючих елементів, що будуть забезпечувати необхідні умови функціонування генератора. На рис. 6 показане схематичне зображення спрямовуючих пластин, розташованих на поверхні Місяця в зоні полюсів.

## Висновки

1. Підтверджено можливості створення термоелектричного генератора, що використовує перепад температури в місячному ґрунті.
2. Розраховано, що за умов місячного «дня» генерована ГТЕГ електрична потужність становить  $W_e = 96 \text{ Вт/м}^2$ .
3. Визначено, що питома потужність генератора у відношенні до його маси становить  $W_p = 230 \text{ Вт/кг}$ .
4. Встановлено, що термоелектричний генератор в умовах місячної ночі може розвивати потужність до  $W_e \approx 10 \text{ Вт/м}^2$ .

## Література

1. <https://www.shimz.co.jp>.
2. L.I. Anatyshuk, “Thermoelectricity Vol.2 – Thermoelectric Power Converters”, Institute of Thermoelectricity, Kyiv, 2005.
3. Анатичук Л.І. Термогенератори, що використовують теплові потоки в ґрунтах / Анатичук Л.І., Микитюк П.Д. // Термоелектрика. – 2003. – №3. – С. 86 – 95.
4. Микитюк П.Д. Термогенератори з відновлюваними джерелами теплової енергії / Микитюк П.Д. // Автономна енергетика. – 2009. – № 26. – С. 61 – 68.
5. Дудаль В.О. Розподіли температур у ґрунті і можливості підземних термоелектричних генераторів / Дудаль В.О., Кузь Р.В. // Термоелектрика. – 2016. – № 2. – С. 89 – 95.
6. <https://www.nasa.gov>.

Надійшла до редакції: 20.01.2022.

**Anatyshuk L.I.**, *Acad. NAS Ukraine*<sup>1,2</sup>  
**Prybyla A.V.**, *Cand. Sc (Phys & Math)*<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine, 1 Nauky str.,  
Chernivtsi, 58029, Ukraine;

<sup>2</sup>Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, 2 Kotsiubynskyi str.,  
Chernivtsi, 58000, Ukraine  
*e-mail: anatysh@gmail.com*

## ТHERMOELECTRIC GENERATOR USING TEMPERATURE DIFFERENCES IN LUNAR SOIL

*The paper investigates the possibilities of creating a thermoelectric generator on the Moon. The temperature and thermal conditions in the lunar soil are analyzed. The specific power, weight and cost of such a generator are calculated. A thermoelectric generator and solar batteries are compared under the conditions of their use on the Moon.*

**Key words:** thermoelectric ground generator, Moon, design.

## References

1. <https://www.shimz.co.jp>.
2. Anatyshuk L.I. (2005). *Thermoelectricity Vol.2 - Thermoelectric Power Converters*. Kyiv: Institute of Thermoelectricity.
3. Anatyshuk L.I., Mykytiuk P.D. (2003). Thermal generators using heat flows in soils. *J. Thermoelectricity*, 3, 86 – 95.
4. Mykytiuk P.D. (2009). Thermal generators with renewable sources of thermal energy. *Autonomous Energy*, 26, 61 – 68.
5. Dudal V.O., Kuz R.V. (2016). Temperature distributions in soil and possibilities of underground thermoelectric generators. *J. Thermoelectricity*, 2, 89 – 95.
6. <https://www.nasa.gov>.

Submitted: 20.01.2022.