

УДК 537.322.11

Анатичук Л.І., Мочернюк Ю.М., Прибила А.В.

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

ПРО СОНЯЧНІ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ЕНЕРГІЇ

Викладено результати комп'ютерного проектування сонячного термоелектричного генератора з концентратором сонячної енергії, стінки якого одночасно виконують функцію відводу тепла від гарячих спаїв термоелектричного перетворювача енергії. За допомогою технології об'єктно-орієнтованого комп'ютерного моделювання отримано розподіли електричного потенціалу й температури в термоелектричному генераторі з урахуванням температурних залежностей кінетичних коефіцієнтів матеріалів, а також контактних опорів. Розраховано конструкцію термоелектричного перетворювача, що забезпечує оптимальний режим перетворення сонячної енергії в електричну, з ККД генератора 4.67 %. Вартість отриманої таким перетворювачем електричної енергії становить 0.5 \$/Вт, що робить його конкурентноздатним на ринку сонячних перетворювачів енергії.

Ключові слова: сонячної енергії, термоелектричний генератор, комп'ютерне моделювання.

Results of computer design of a solar thermoelectric generator with a solar energy concentrator whose walls serve for rejection of heat from the hot junctions of a thermoelectric energy converter have been presented. With the aid of object-oriented computer simulation the distributions of electric potential and temperature in a thermoelectric generator with regard to temperature dependences of the kinetic coefficients of materials, as well as contact resistances have been obtained. Design calculation of a thermoelectric converter has been made assuring optimal mode of solar into electric energy conversion which yielded the generator efficiency of 4.67 %. The cost of electric energy power generated by such a converter is 0.5 \$/W, which makes it competitive in the market of solar energy converters.

Key words: solar energy, thermoelectric generator, computer simulation.

Вступ

Загальна характеристика проблеми. Створення альтернативних поновлюваних джерел енергії – на сьогодні одне з найактуальніших завдань, оскільки сприяє рішенню екологічних проблем термального забруднення Землі, які ведуть до змін її клімату.

Сонце – найбільше джерело поновлюваної енергії на Землі. Воно випромінює $4 \cdot 10^{23}$ кВт енергії, з неї на Землю потрапляє приблизно 10^{14} кВт. При цьому 1 м^2 площі, перпендикулярній сонячним променям, отримує всього приблизно 1 кВт енергії [1]. Така густина сонячного випромінювання недостатня для одержання необхідних перепадів температур у термоелектричних перетворювачах енергії. У такому випадку доцільним є застосування спеціальних концентраторів сонячної енергії у вигляді параболоїдів,

відбивачів Френеля або сукупності плоских дзеркал [1]. В свою чергу для термоелектричних перетворювачів характерний високий ресурс роботи й надійність, що робить їхнє використання в сукупності із сонячними концентраторами перспективним [2, 3].

Аналіз літератури. Перші сонячні термоелектричні генератори (СТЕГ) були виготовлені наприкінці XIX сторіччя. Серед них розроблений російським астрономом В. К. Цераським генератор, що запускав у дію електричний дзвінок [1].

У 50-х роках XX сторіччя у зв'язку з появою нових матеріалів для термопар ($p\text{-Zn-Sb}$, $n\text{-Bi-Sb}$) інтерес до можливості прямого перетворення сонячної енергії в електричну зріс [1, 4, 5]. Використання як концентратора теплової енергії плоского колектора у вигляді почорненої мідної пластини дало можливість досягти ККД генератора близько 1.05 % [3]. Генератор з оптичним концентратором, що фокусував сонячне випромінювання на гарячі спаї термопар, досяг ККД 3.35 % [4]. Сучасні розробки сонячних термоелектричних генераторів [4-9] виконані як з оптичними концентраторами сонячної енергії, так і без них. У роботі [6] наведено теоретичні й експериментальні дослідження STEG із плоским концентратором теплової енергії. Автори роботи стверджують, що їм удалося досягти ККД генератора 4.6 %.

Мета пропонованої роботи є комп'ютерне проектування сонячного термоелектричного генератора з концентратором сонячної енергії, стінки якого одночасно виконують функцію відводу тепла від гарячих спаїв термоелектричного перетворювача енергії, для досягнення максимальної ефективності й мінімальної собівартості термоелектричного перетворення енергії, що зробить STEG конкурентноздатним на ринку сонячних перетворювачів енергії.

Фізична, математична й комп'ютерна моделі STEG

Ефективність роботи термоелектричного генератора визначається як ККД термоелектричних модулів, так і ККД перетворення енергії сонячного випромінювання в теплову. Оптимізація конструкції STEG у цьому випадку складалася в максимальному зменшенні теплових втрат і забезпеченні температурних умов для реалізації максимального ККД термоелектричного перетворювача [1].

Конструкція сонячного термоелектричного генератора містить три основних елементи: перетворювач сонячного випромінювання в теплову енергію, термоелектричний перетворювач і пристрій для відводу тепла [1].

Як концентратор випромінювання використано параболоїд із дзеркальною поверхнею. Приймальною поверхнею генератора виступає виконаний у вигляді зрізаної кулі комутаційний провідник гарячих спаїв термоелектричного перетворювача. (рис. 1). Холодні спаї термопари перебувають у тепловому контакті з параболоїдом, що одночасно є холодним теплообмінником. Для захисту від атмосферного впливу внутрішня частина параболоїда ізольована захисним склом [12].

СТЕГ працює в такий спосіб. Сонячне випромінювання проникає крізь скляну захисну поверхню 1, потрапляє на дзеркальну поверхню параболічного концентратора 2, відбивається й фокусується на комутації 3, де перетворюється в теплову енергію. Частина тепла, що проходить через термоелектричний перетворювач 4, перетворюється в електричну енергію. Тепло від холодних спаїв термопари розсіюється на параболічному концентраторі 2, що виступає й холодним теплообмінником.

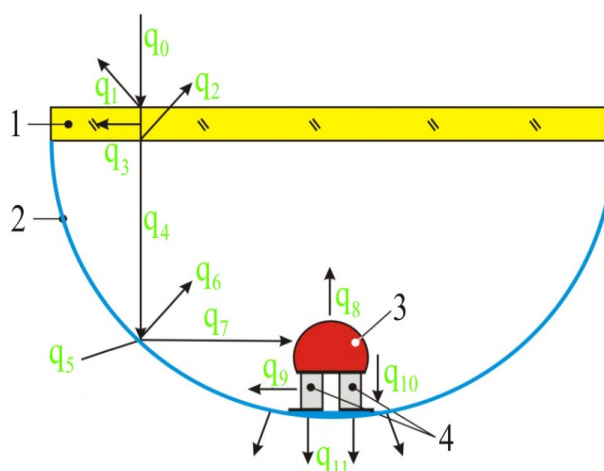


Рис. 1. Фізична модель СТЕГ.

1 - захисне скло, 2 - сонячний параболічний концентратор, 3 - комутація термоелектричного перетворювача, 4 – термоелектричний перетворювач енергії.

На рис. 1 q_0 – потік сонячного випромінювання, що потрапляє на захисне скло, q_1 - випромінювання, яке відбивається від зовнішньої поверхні скла, q_2 – випромінювання, що відбивається від внутрішньої поверхні скла, q_3 – випромінювання, що поглинається склом, q_4 – випромінювання, що проникло через скло, q_5 – тепло, що поглинається концентратором, q_6 – тепло, що губиться на внутрішній стороні концентратора шляхом вільної конвекції й випромінювання, q_7 – випромінювання, що фокусується на комутації гарячих спаїв, q_8 – втрати тепла на приймальній поверхні, q_9 – втрати тепла конвекцією й випромінюванням на бічній поверхні термопари, q_{10} – тепло, що протікає через термопару, q_{11} – потік тепла, що виділяється від зовнішньої поверхні концентратора вільною конвекцією й випромінюванням.

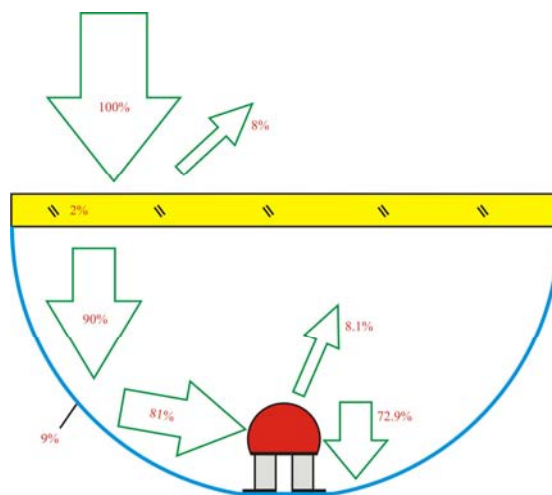


Рис. 2. Втрати енергії на елементах конструкції СТЕГ.

Теоретичні розрахунки показали, що втрати сонячної енергії на елементах конструкції СТЕГ такі:

- 8 % енергії відбивається від поверхні скла;
- 2 % поглинається склом;
- 9 % поглинається алюмінієвим концентратором;
- 8.1 % відбивається від приймальної поверхні термопарного елемента;

- 72.9 % енергії проходить через вітки термопари.

Для спрощення завдання потоки $q_1 - q_3$ не враховувалися, у розрахунках використані відомі характеристики проникнення скла, без врахування поглиненого тепла q_3 , що йде на його розігрів. Також вважалося, що в об'ємі, який обмежує захисне скло й дзеркало, перебуває повітря.

Для знаходження розподілу температури в СТЕГ необхідно розв'язати рівняння теплопровідності

$$q = \nabla(-\kappa \cdot \nabla T), \quad (1)$$

де κ – теплопровідність, ∇T – градієнт температури й q – тепловий потік.

Граничні умови:

– на дзеркальній поверхні концентратора

$$q = \varepsilon_1 \cdot q_4 - \alpha \cdot \Delta T_1 + \varepsilon_1 \cdot (G_1 - \sigma \cdot T_1^4), \quad (2)$$

де ε_1 – ступінь чорної внутрішньої сторони концентратора, α – коефіцієнт тепловіддачі, ΔT_1 – різниця температур між внутрішньою стороною концентратора й навколишнім середовищем, σ – постійна Больцмана, T_1 – температура внутрішньої сторони концентратора,
– на приймальній поверхні

$$q = q_7 \cdot (2 \cdot \varepsilon_2 - 1) - \alpha \cdot \Delta T_2 + \varepsilon_2 \cdot (G_2 - \sigma \cdot T_2^4), \quad (3)$$

де ΔT_2 – різниця температур між приймальною поверхнею й навколишнім середовищем, T_2 – температура приймальної поверхні, ε_2 – ступінь чорноти приймальної поверхні.

– на границях теплового контакту комутації з вітками термопари

$$q = \kappa \cdot \frac{\Delta T_4}{l}, \quad (4)$$

де κ , l – теплопровідність і висота віток термопари, ΔT_4 – різниця температур між гарячим і холодним спаєм термопари.

– на границях бічних поверхонь віток термопари й навколишнім середовищем

$$q = \alpha \cdot \Delta T_3 + \varepsilon_3 \cdot \sigma \cdot (G_3 - \sigma \cdot T_3^4), \quad (5)$$

де ΔT_3 – різниця температур між бічною поверхнею термопари й навколишнім середовищем, T_3 – температура бічної поверхні термопари, ε_3 – ступінь чорноти бічної поверхні термопари;

– на зовнішній поверхні концентратора

$$q = \alpha \cdot \Delta T_5 + \varepsilon_4 \cdot \sigma \cdot (T_5^4 - T_0^4), \quad (6)$$

де ΔT_5 – різниця температур між зовнішньою стороною концентратора й навколишнім середовищем, ε_4 – ступінь чорноти зовнішньої сторони концентратора, T_5 – температура

концентратора, T_0 – температура навколишнього середовища, G – вхідний тепловий потік випромінювання для кожної окремої границі

$$G = G_m + F_{amb} \sigma T_{amb}^4, \quad (7)$$

де G_m – величина випромінювання від інших границь елементів конструкції, F_{amb} – фактор поля зору, рівний частині поля зору, що не підпадає під дію інших поверхонь, T_{amb} – температура у віддаленій точці в напрямках, включених до F_{amb} .

Знаходження розв'язку рівняння (1) із граничними умовами (2-6) являє собою складне завдання, аналітичні розв'язки якого мають занадто громіздкий вигляд і не підлягають аналізу. [13]

Для рішення поставленого завдання було використано комп'ютерну програму мультифізичесно об'єктно-орієнтованого моделювання Comsol Multiphysics [14]. Створена при її допомозі комп'ютерна модель сонячного термоелектричного генератора дала можливість здійснити розрахунки його фізичних полів, визначити основні енергетичні характеристики й провести оптимізацію конструкції СТЕГ.

Комп'ютерна модель СТЕГ (рис. 1) складається з алюмінієвого параболічного концентратора (дзеркала) 2, почорненої мідної приймальної площадки 3, що являє собою зрізану кулю, і термопари 4. Холодні спаї термопари перебувають у тепловому контакті з параболічним концентратором, що утворює холодний теплообмінник.

Комп'ютерне моделювання здійснювалося з такими початковими умовами: густина сонячного випромінювання – 1000 Вт/м^2 , температура навколишнього середовища – 300 К . Відвід тепла від холодного теплообмінника здійснювався шляхом вільної конвекції й випромінювання в навколишнє середовище. Відповідно до реальних фізичних й оптичних властивостей [15 16] елементів конструкції сонячного термоелектричного генератора узяті такі значення коефіцієнтів поглинання й відбивання, а саме: коефіцієнт пропускання скла становить 0.9 , коефіцієнт відбивання алюмінієвого дзеркала – 0.9 , ступінь чорноти приймальної площадки ϵ_2 й зовнішньої сторони параболічного концентратора ϵ_4 – 0.9 , ступінь чорноти бічної поверхні віток термопари ϵ_3 й внутрішньої поверхні концентратора ϵ_1 – 0.1 . Як термоелектричний матеріал використано стандартний термоелектричний матеріал на основі Bi_2Te_3 (рис. 3) [17, 18]. Оптимізація конструкції СТЕГ проводилася по діаметру параболічного концентратора D , товщині концентратора d і по тепловому опору термопари. Як початкове значення D було обрано 20 мм , оскільки саме за такого діаметра фокус залишався під захисним склом. Збільшення діаметра концентратора D відбувалося таким чином, щоб фокус параболоїда залишався незмінним. Початкове значення товщини концентратора $d = 0.2 \text{ мм}$.

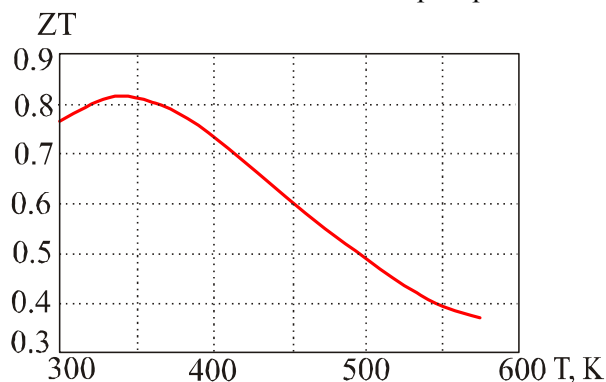


Рис. 3. ZT термоелектричного матеріалу на основі Bi_2Te_3 .

Для кожного варіанта конструкції оптимізувалась площа поперечного перерізу (тепловий опір) віток термопари таким чином, щоб забезпечити гарячу температуру на рівні 300°C, оскільки саме за цієї температури досягається максимум ККД для обраного термоелектричного матеріалу.

Результати оптимізації

У результаті комп'ютерного моделювання було отримано значення температури на холодних спаях термопари СТЕГ (рис. 4), розподілу температур на холодному теплообміннику (рис. 5), а також значення ЕРС й електричної потужності. Розраховано значення ККД сонячного термоелектричного генератора для різних значень діаметрів і товщини параболоїда (рис. 6). Встановлено, що ККД СТЕГ досягає 4.65 %. Також досліджено вплив контактних електричних опорів, що призводить до зниження енергетичних характеристик СТЕГ на 8 %.

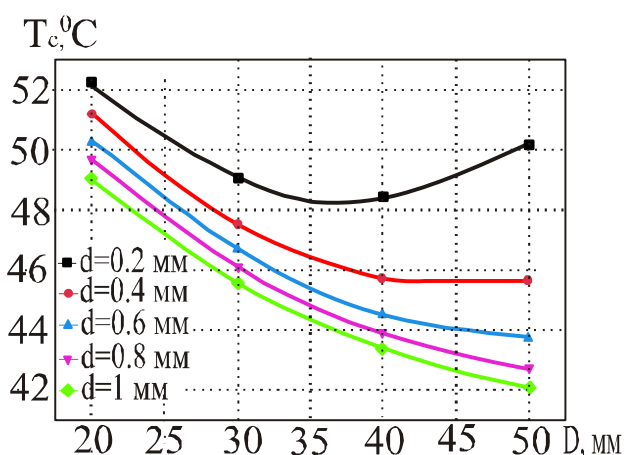


Рис. 4. Графік залежності холодної температури T_c на термопарі від діаметра концентратора для різних його товщин d .

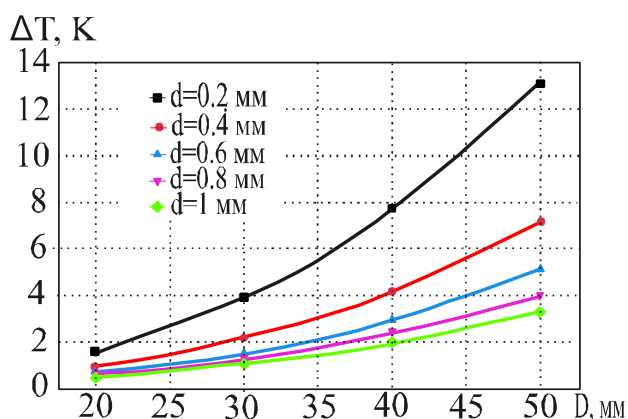


Рис. 5. Графік залежності ΔT між центром і краєм алюмінієвого концентратора від його діаметра для різних товщин концентратора d .

Зроблено оцінку економічних показників генератора. На рис. 7 наведено графіки залежності вартості 1 Вт генерованої СТЕГ електричної потужності від його геометричних розмірів. Як видно з графіка, за товщини концентратора 0.2 мм для діаметрів концентраторів D

від 20 до 35 мм його вартість становить приблизно 0.5 \$/Вт. Такі показники роблять СТЕГ конкурентноздатним на ринку сонячних перетворювачів енергії.

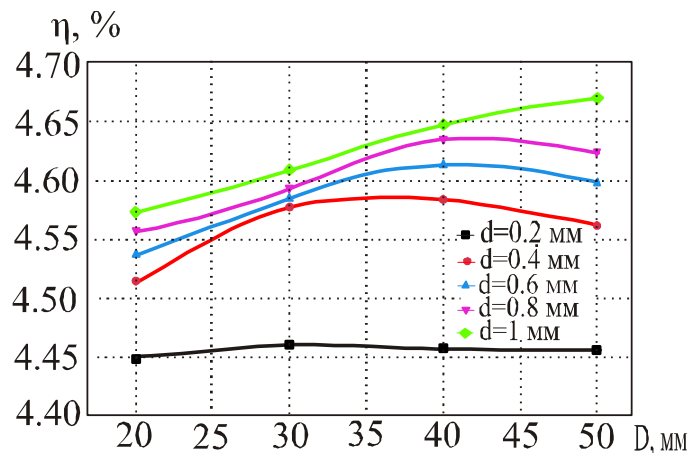


Рис. 6. Графік залежності ККД СТЕГ від діаметра концентратора для його різних товщин d .

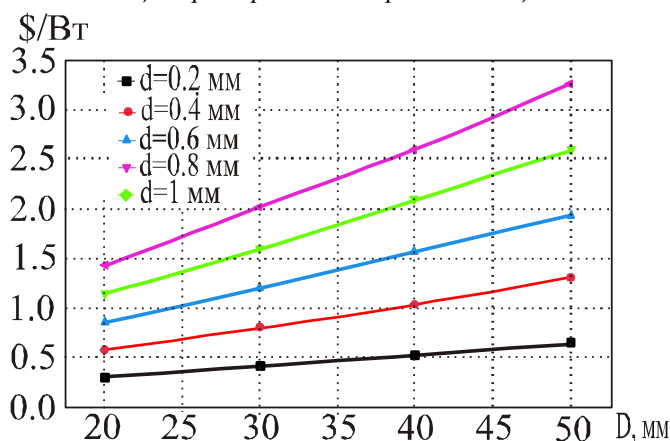


Рис. 7. Графік залежності вартості 1 Вт генерованої СТЕГ від діаметра концентратора для його різних товщин d .

Слід зазначити, що подальше підвищення ефективності СТЕГ можливе за рахунок використання термоелектричних матеріалів з більш високим значенням ZT , використання дзеркал із кращим коефіцієнтом відбивання й захисного скла із кращим коефіцієнтом пропускання, а також використання селективних покриттів для зменшення втрат на випромінювання.

Висновки

1. Шляхом об'єктно-орієнтованого комп'ютерного моделювання проведено оптимізацію конструкції сонячного термоелектричного генератора, що дало можливість підвищити ККД генератора до значення 4.67 %.
2. Встановлено, що врахування контактних опорів у комп'ютерній моделі дає можливість підвищити точність розрахунків енергетичних характеристик сонячного ТЕГ на 8 %.
3. Встановлено можливість створення СТЕГ, вартість 1 Вт генерованої ним електроенергії може становити близько 0.5 \$, що робить його конкурентноздатним на ринку сонячних перетворювачів енергії.

Література

1. Анатичук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства: / Л.И. Анатичук // Справочник. – К.: Наук. думка. – С.1979. – 768.
2. Анатичук Л.И. Рациональные области исследований и применений термоэлектричества / Л.И. Анатичук // Термоэлектричество. 2001. – №1. – С. 3 – 14.
3. Анатичук Л.И. Современное состояние и некоторые перспективы термоэлектричества / Л.И. Анатичук // Термоэлектричество. 2007. – №2. – С. 7 – 20.
4. Бернштейн А.С. Термоэлектрические генераторы. / А.С. Бернштейн // – Москва: Госэнергоиздат. – С.1956. – 47.
5. M. Telkes. Solar Thermoelectric Generators // J. Appl. Phys. 25, 765 (1954)
6. Daniel Kraemer, Bed Poudel, Hsien-Ping Feng, J. Christopher Caylor, Bo Yu, Xiao Yan, Yi Ma, Xiaowei Wang, Dezhi Wang, Andrew Muto, Kenneth McEnaney, Matteo Chiesa, Zhifeng Ren, and Gang Chen. High-performance flat-panel solar thermoelectric generators with high thermal concentration // Nature Materials 10, 532–538 (2011)
7. Ernesto E. Gomez, Thermoelectric generator with latent heat storage // Patent No. US 4251291, (1981)
8. E.P. Gladskikh, V.A. Katenin, V.A. Maksimov, Patent No. Ru 2382935 C1, (2010)
9. A.N. Timofeev, A.V. Timofeev, D.V. Timofeev, M.A. Timofeev, Modern scientific research and their practical application // Patent No. Ru 86247 U1, (2009)
10. John Gotthold, Anjun Jerry Jin, Frank M. Larsen, Patent No. US 2010/0252085 A1, (2010)
11. R. Amatya and R.J. Ram. Professor of Electrical Engineering and Computer Science Massachusetts Institute of Technology Journal of Electronic Materials, Vol. 39, No. 9, 2010, P. 1735-1740.
12. Сонячний генератор тепла і електрики. Патент UA 73624/ Анатичук Л.І., Мочернюк Ю.М. – 2012.
13. Анатичук Л.И. О влиянии системы теплообмена на КПД термоэлектрического генератора / Л.И. Анатичук, А.В. Прибила // Термоэлектричество. 2012. – №4. – С. 87 – 92.
14. COMSOL Multiphysics User's Guide // Comsol, Inc. – 2006. – 708 p.
15. Клинд Л. Стекло в строительстве: Свойства. Применения. Расчеты. Перевод с немецкого П.И. Глазунова, Т.Ф. Гусевой, З.А. Липкинда. / Л. Клинд, В. Клейн // – М.: Стройиздат. – С.1981. – 287
16. Алюминий, свойства и физическое металловедение: Справочник. Под редакцией Дж. Е. Хэтча. Перевод с английского канд. тех. наук Э.З. Непомнящей. – М.: Металлургия. – С.1989. – 424.
17. Копыл А.И. Термоэлектрические свойства легированного свинцом материала р-(Bi₂Te₃)_{0.25}(Sb₂Te₃)_{0.72}(Sb₂Se₃)_{0.03} с избытком теллура / А.И. Копыл, И.И. Павлович, И.С. Термена // Термоэлектричество. 2007. – №1. – С. 38 – 43.
18. Струтинская Л.Т. Влияние вибрации на однородность термоэлектрических материалов на основе Bi₂Te₃, выращенных методом вертикальной зонной плавки / Л.Т. Струтинская // Термоэлектричество. 2012. – №4. – С. 58 – 63.

Надійшла до редакції 24.07.2013