

УДК 621.362

Гуревич А., канд. фіз.-мат. наук<sup>1</sup>  
Штайнер І.,<sup>1</sup>  
Дашевський З., доктор фіз.-мат. наук<sup>2</sup>  
Вітрик С.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Double Check Ltd, Бней Брак, Ізраїль;  
e-mail: alex@dc-ts.com

<sup>2</sup>Університет Бен-Гуріона у Негеві, Беер-Шева, Ізраїль;

<sup>3</sup>Інтерм Лтд, Чернівці, Україна

---

## РОЗРОБКА ВИСОКОЕФЕКТИВНИХ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ З ПІДКЛАДКАМИ, ВИГОТОВЛЕНИМИ ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ ВИПАРНОЇ КАМЕРИ

---

Термоелектричні системи широко використовуються в різних галузях промисловості. Основним фактором, що обмежує розширення діапазону застосування, є відносно низький холодильний коефіцієнт (COP). Покращення продуктивності термоелектричних модулів (ТЕМ) є метою багатьох дослідницьких проєктів протягом кількох десятиліть. Основні зусилля спрямовані на розробку нових ефективних матеріалів, але значного прогресу в характеристиках матеріалів, придатних для промислового використання, ще не досягнуто. Іншим способом підвищення продуктивності є оптимізація елементів структури модулів, зокрема підкладок. Відомо, що характеристики ТЕМ покращуються зі збільшенням теплопровідності підкладок. Найкращим кандидатом на високопровідні підкладки є випарна камера з ефективною теплопровідністю понад 5000 Вт/м/К, що приблизно в 30 разів вище, ніж у найкращих керамічних підкладок, виготовлених з ALN. Було розроблено, виготовлено та випробувано оптимізовані випарні камери, включаючи мідну оболонку з спеченим гнотом і алюмінієву з рифленим гнотом. Для підкладок гарячої та холодної мідної випарної камери використовувалися дві різні робочі рідини: вода та метанол. Ефективна теплопровідність мідних підкладок випарної камери становила близько 2500 Вт/м/К. Комп'ютерне моделювання показало, що ТЕМ з підкладками за технологією випарної камери (ТЕМВК) забезпечують більш рівномірний розподіл температури по поверхні тепловідводу та знижують температуру гарячих точок на кожній гілці. Як наслідок, ефективний термічний опір тепловідводу для ТЕМВК нижчий, ніж для звичайного ТЕМ при тому ж розмірі модуля, структурі, розсіюваній потужності та параметрах тепловідводу. Для досліджуваного прикладу термоелектрична система, що включає ТЕМВК у зборі з тепловідводами, забезпечує підвищення COP відносно до звичайного ТЕМ приблизно на 40 % за тих же умов. При використанні в якості генератора електроенергії ТЕМВК підвищує ККД більш ніж на 18 %. Виготовлено та випробувано дослідні зразки ТЕМВК. Доведено хорошу кореляцію між теоретичними та тестовими даними. Бібл. 9, рис. 12.

**Ключові слова:** термоелектричні модулі, теплопровідність, термоелектричні системи охолодження.

### Вступ

Термоелектричні системи мають багато застосувань, включаючи військові, медичні, перевезення продуктів, авіоніку, тощо [1–3]. Основним фактором, що обмежує подальше

розширення діапазону застосування, є відносно низький холодильний коефіцієнт. Незважаючи на значні дослідницькі зусилля, спрямовані на розробку термоелектричних матеріалів з вищою добротністю, високоефективні термоелектричні модулі все ще недоступні для промислового застосування. Перспективним підходом до проектування високоефективних термоелектричних систем, включаючи традиційні термоелектричні модулі, є поєднання з іншими тепловими технологіями, такими як випарні камери [4–8].

## Рішення

Новим підходом до підвищення ефективності термоелектричних модулів (ТЕМ) є оптимізація елементів теплової структури – підкладок [9]. Відомо, що характеристики ТЕМ покращуються зі збільшенням теплопровідності підкладок. Вплив теплопровідності підкладок на продуктивність ТЕМ показано на рис. 1

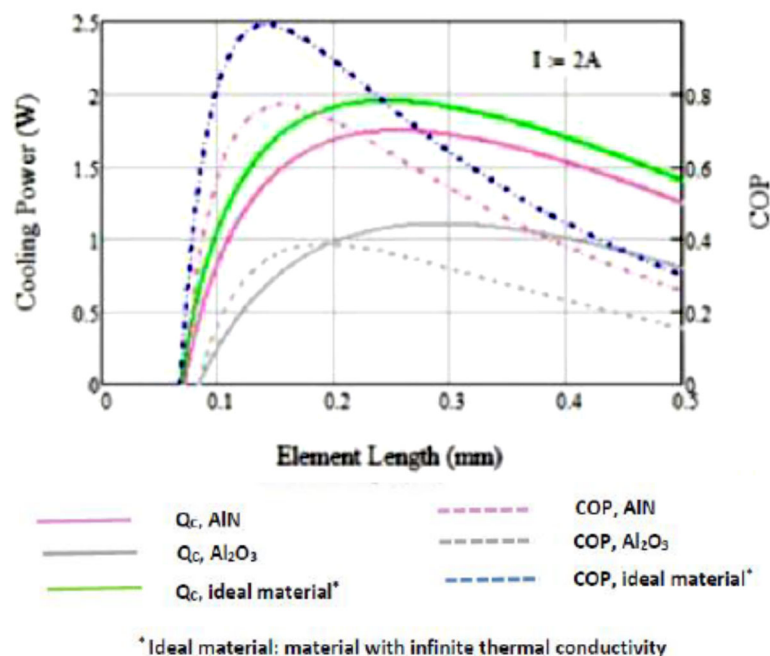


Рис. 1. Залежності потужності охолодження і COP від довжини термоелемента для ТЕМ з різною теплопровідністю підкладки

Рішення для підкладок із надзвичайно високою теплопровідністю, близькою до «ідеального матеріалу», – використання технології випарної камери. Випарна камера – це пристрій для передачі тепла, що працює за циклом випаровування-конденсації рідини, подібним до теплових трубок, і характеризується ефективною теплопровідністю понад 5000 Вт/(мК). Загальна схема роботи випарної камери показана на рис. 2

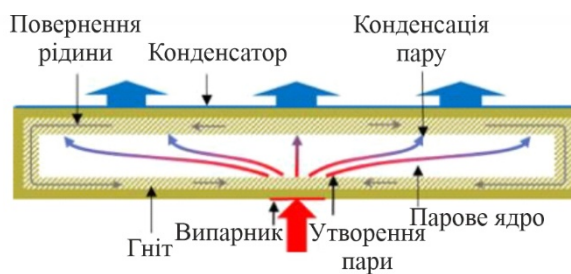


Рис. 2. Схема роботи випарної камери

Як рішення для підвищення продуктивності термоелектричних модулів ми розробили запатентовані термоелектричні модулі з підкладками, виготовленими за технологією випарної камери. Схема будови ТЕМ з підкладками за технологією випарної камери (ТЕМВК) наведена на рис. 3

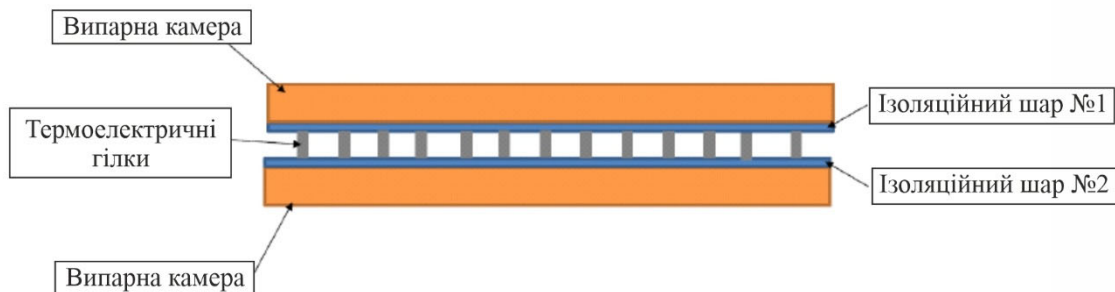


Рис. 3. Схема будови ТЕМ з підкладками за технологією випарної камери

ТЕМВК багатошарові і складаються з наступних шарів: випарна камера, електроізоляційний шар та малюнок мідних провідників.

## Технічний підхід

### Випарні камери

Для ТЕМВК використовувалися два додаткові матеріали для корпусу випарної камери: мідь і алюміній. Ці матеріали мають високу теплопровідність і широко використовуються для виготовлення випарних камер.

Для мідних випарних камер використовувалися два типи робочої рідини: вода для гарячої сторони ТЕМВК і метанол – для холодної сторони.

Робоча рідина для алюмінієвих випарних камер – фреон.

### Електроізоляційні шари

Ми оцінюємо кілька технологічних рішень для ізоляційних шарів: керамічні підкладки DBC/AMB, тонкоплівкова кераміка, покриття.

На сучасному етапі використовували підкладки DBC AlN.

Інші варіанти будуть оцінені на наступному етапі розробки.

### Складання

Для складання ТЕМВК розроблена спеціальна технологія, що включає кілька етапів пайки.

Мідні випарні камери мають гніт із спеченого порошку. Робочими рідинами є вода для гарячої сторони підкладки та метанол для холодної сторони підкладки. Зображення мідної випарної камери показано на рис. 4.

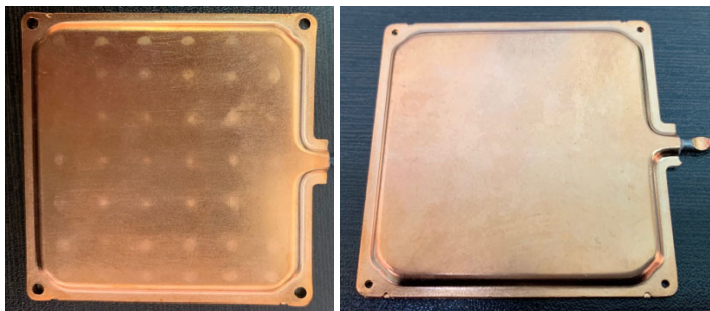


Рис. 4. Знімки мідної випарної камери

Ефективну теплопровідність підкладок за технологією випарної камери вимірювали за допомогою спеціальної процедури, заснованої на порівнянні між експериментальними даними та результатами комп'ютерного моделювання. Результати оцінок наведено на рис. 5.

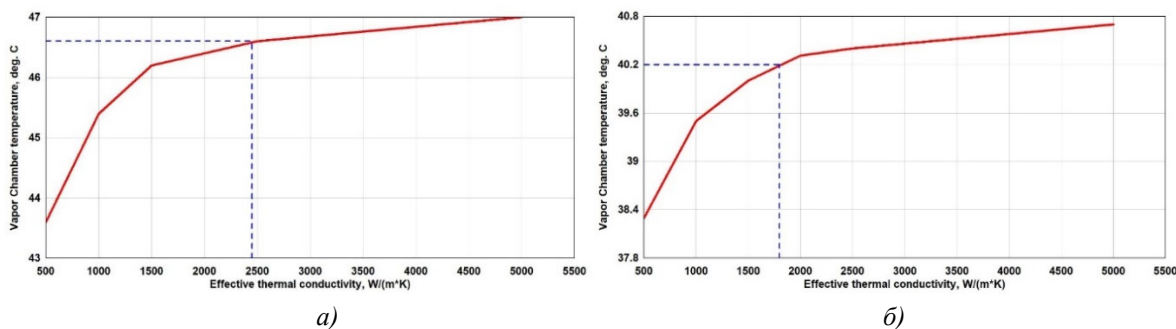


Рис. 5. Результати оцінки ефективної теплопровідності

а) мідно-водяна випарна камера, б) мідно-метанолова випарна камера

Як бачимо з рис. 5 а, ефективна теплопровідність мідно-водяної випарної камери дорівнює 2450 Вт/м/К. Ефективна теплопровідність мідно-метанолової випарної камери становить 1800 Вт/м/К (рис. 5 б)

### Теоретичні основи

Комп'ютерне моделювання було виконано для вивчення механізму покращення продуктивності ТЕМВК порівняно зі звичайним ТЕМ

Було проведено моделювання для ТЕМ/ТЕМВК з розмірами 62 × 62 мм, зібраного на екструдованому алюмінієвому тепловідводі з вентилятором.

Параметри модуля: Параметри тепловідводу:

$I_{\max} = 7.5$  А Розміри опорної плити: 200 × 130 мм

$V_{\max} = 15.4$  В Товщина опорної плити: 5 мм

$R = 1.1$  Ом Висота ребер: 19 мм

$\Delta T_{\max} = 70$  °С витрата повітря: 0.9 м<sup>3</sup>/м

Розподіл температури по поверхні тепловідводу для ТЕМВК і звичайного ТЕМ з підкладками з оксиду алюмінію оцінювали при однаковій розсіюваній потужності 100 Вт на підкладці. Результати показані на рис. 6 а (ТЕМВК) і рис. 6 б (ТЕМ). Максимальна температура тепловідводу для ТЕМВК становить 48.0 °С, а для звичайного ТЕМ – 53.3 °С.

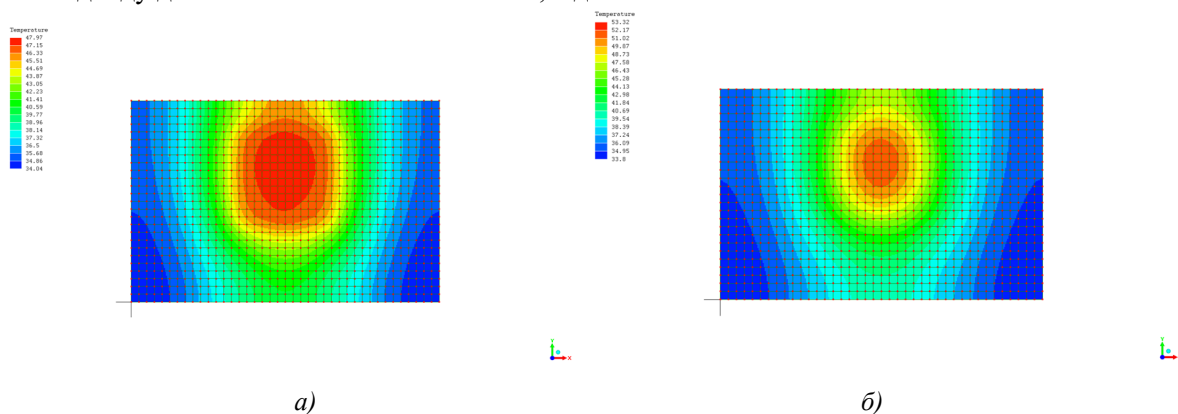


Рис. 6. Розподіл температури по поверхні тепловідводу для ТЕМВК (а) і звичайного ТЕМ (б) з алюмінієвими підкладками

Таким чином, ТЕМВК знижує максимальну температуру тепловідводу на 5.3 °С відносно звичайного ТЕМ при тих же робочих умовах.

Результати моделювання температур поблизу термоелектричної гілки показані на рис. 7 (а – ТЕМВК, б – звичайний ТЕМ):

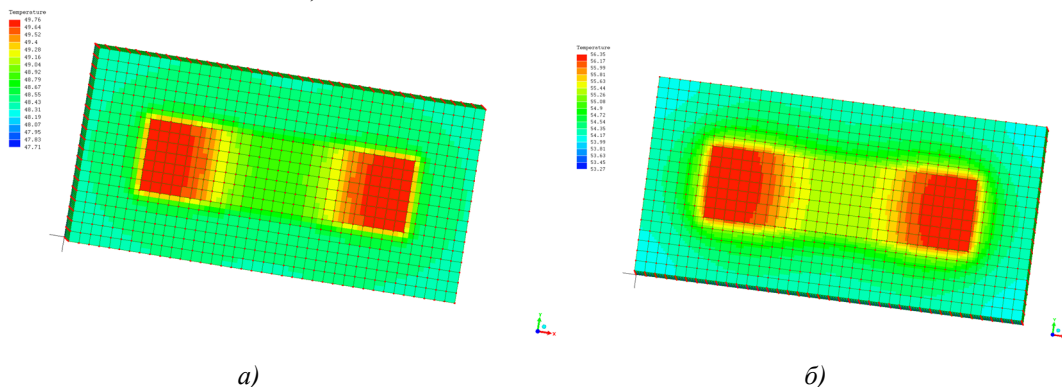


Рис. 7. Розподіл температури біля термоелектричної гілки для ТЕМВК (а) і звичайного ТЕМ (б) з підкладками з оксиду алюмінію

Максимальна температура на вітці становить 49.7 °С для ТЕМВК і 56.7 °С для звичайного ТЕМ, показуючи загальне зниження температури на 7.0 °С. Додаткове зниження на 1.7 °С спричинене здатністю випарної камери ефективно поширювати гарячу точку поблизу термоелектричної гілки.

Отже, для аналізованого випадку температура термоелектричної гілки для ТЕМВК нижча на 7 °С порівняно зі звичайним ТЕМ. Це зниження температури викликано двома тепловими ефектами:

- Більш рівномірним розподілом температури по поверхні тепловідводу.
- Поширенням гарячої точки біля кожної термоелектричної гілки.

Для теплового проектування термоелектричних систем охолодження/нагрівання згадане зниження температури може бути переведено на зменшення ефективного теплового опору тепловідводу. Іншими словами, ТЕМВК працює як звичайний ТЕМ з тією ж структурою, але зібраний з тепловідводом, який має менший термічний опір. У даному випадку зниження ефективного теплового опору для ТЕМВК становить 0.07 °С/Вт. Важливо зазначити, що це значення не є постійним і залежить від характеристик тепловідводу та розмірів ТЕМВК.

Порівняння COP для термоелектричних систем охолодження, включаючи звичайні ТЕМ і ТЕМВК, зібрані з тепловідводами, що мають термічний опір  $R_h = 0.2$  °С/Вт (гарячий тепловідвод) і  $R_c = 0.3$  °С/Вт (холодний тепловідвод) і температури навколишнього повітря: 25 °С (гаряча сторона), 2 °С (холодна сторона) показано на рис. 8:

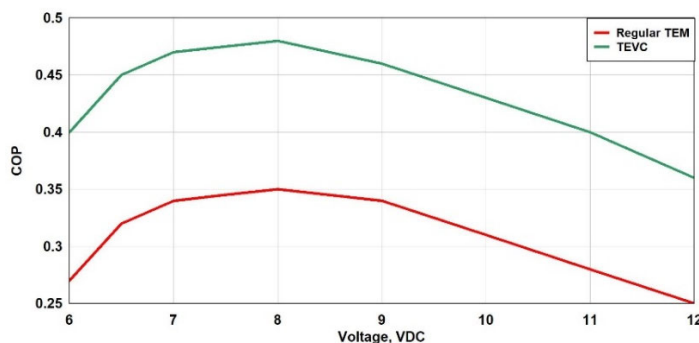


Рис. 8. Залежності COP від напруги для термоелектричних систем охолодження

Як бачимо, ТЕМВК забезпечує покращення COP порівняно зі звичайним ТЕМ приблизно на 40 % за тих самих умов.

Ще одним перспективним застосуванням технології ТЕМВК є виробництво електроенергії. Результати моделювання агрегату генерації електроенергії показані на рис. 9.

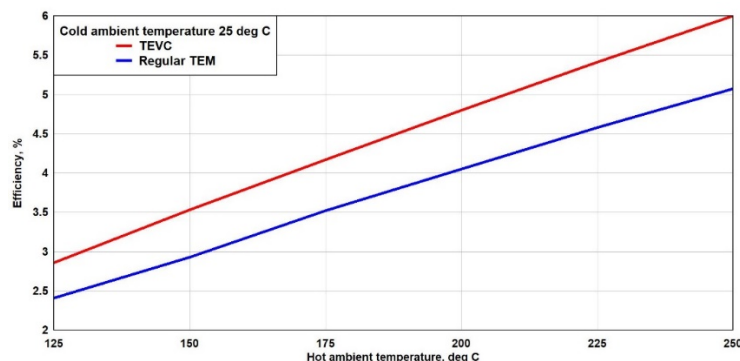


Рис. 9. Залежності ККД від температури нагрітого навколишнього середовища для термоелектричних генеруючих систем

Як бачимо, для тестованого випадку ТЕМВК забезпечує підвищення ефективності генерування електроенергії більш ніж на 18 % за тих же умов.

### Виготовлення та тестування зразків ТЕМВК

Експериментальні зразки ТЕМВК з мідними та алюмінієвими підкладками за технологією випарної камери були виготовлені та оцінені. Зображення ТЕМВК показано на рис. 10 а (мідь) і рис. 10 б (алюміній):

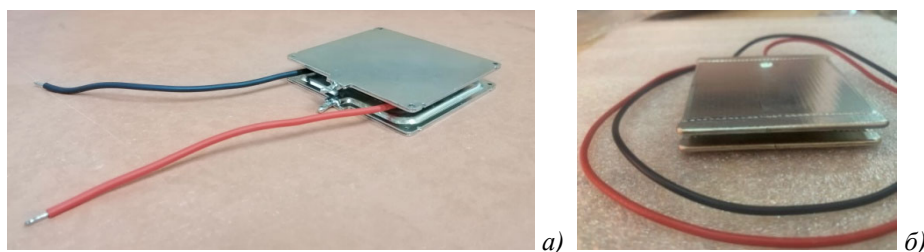


Рис. 10. Знімки мідного (а) і алюмінієвого (б) ТЕМВК

Для порівняння результатів моделювання з експериментальними даними було проведено тестування продуктивності.

Для цього розроблено спеціальне пристосування (Рис. 11):

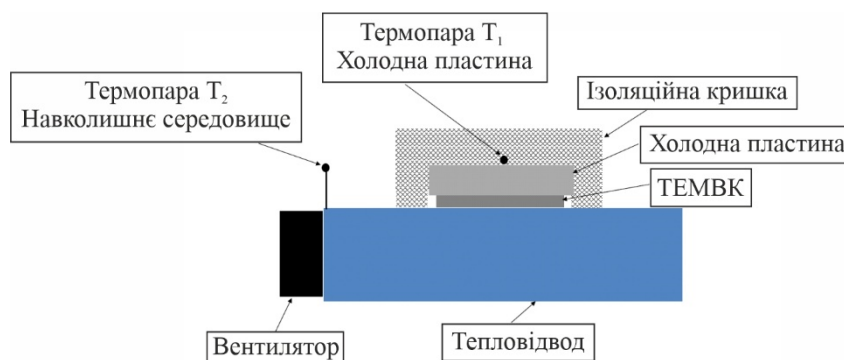


Рис. 11. Схема спеціального пристосування, призначеного для тестування ТЕМВК

Порівняння експериментальних даних і теоретичних оцінок, зроблених з використанням «ефективного теплового опору», показано на рис. 12.

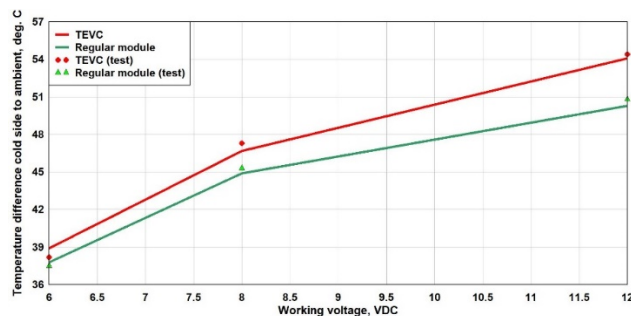


Рис. 12. Залежності перепаду температури від робочої напруги для термоелектричних систем охолодження

Виявлено хорошу кореляцію між теоретичними та експериментальними даними. Максимальне відносне відхилення становить 2.6 %.

## Резюме

1. Розроблено нове покоління запатентованих високоефективних термоелектричних модулів із підкладками, виготовленими за технологією випарної камери (ТЕМВК).
2. Комп'ютерне моделювання показує, що ТЕМВК забезпечує більш рівномірний розподіл температури по поверхні тепловідводу та знижує температуру гарячих точок на кожній гілці. В результаті ефективний тепловий опір тепловідводу для ТЕМВК зменшується відносно звичайного ТЕМ при тих самих розмірах модуля, внутрішній структурі, розсіюванні потужності та параметрах тепловідводу.
3. Для досліджуваного прикладу термоелектрична система, що включає ТЕМВК у зборі з тепловідводами, забезпечує покращення COP приблизно на 40 % відносно звичайного ТЕМ за тих же умов.
4. Виробництво електроенергії є ще одним перспективним застосуванням для ТЕМВК через його здатність забезпечувати більш високу ефективну різницю температур на вітті порівняно зі звичайним ТЕМ за тих самих умов експлуатації. Для тестованого випадку ТЕМВК демонструє підвищення ефективності виробництва електроенергії більш ніж на 18 % за тих же умов.
5. Прототип модулів ТЕМВК, включаючи оптимізовані випарні камери, був виготовлений і протестований за допомогою спеціального пристосування. Доведено хорошу кореляцію між даними, розрахованими на основі ефективного теплопровідності, та результатами експериментів.

## Література

1. Riffat S.B., & Xiaoli M. (2003). Thermoelectric: a review of present and potential applications. *Applied Thermal Engineering*, 23, 913–935.
2. d'Angelo M., Galassi C., & Lecis N. (2023). Thermoelectric materials and applications: A review. *Energy*, 16, 6409.
3. Huang L., Zheng Y., Xing L., & Hou B. (2023). Recent progress of thermoelectric applications for cooling/heating, power generation, heat flux sensor and potential prospect of their integrated applications. *Thermal Science and Engineering Progress*, 45, 102064.

4. Sauciuc I., Erturk H., Chrysler G., Bala V., & Mahajan R. (2005). Thermal devices integrated with thermoelectric modules with applications to CPU cooling. Proceedings of IPACK2005.
5. Gurevich A., Steiner I., & Huang E. (2017). Design of thermal systems based on combination of thermoelectric and vapor chamber technologies. Proceedings of 33rd Thermal Measurement, Modeling & Management Symposium.
6. Lv Y., Han X., Chen X., & Yao Y. (2023). Maximizing energy output of a vapor chamber based high concentrated PV-thermoelectric generator hybrid system. Energy, 282, 128882.
7. Sarris A., Bhatti B., & Ciampra F. (2022). Thermoelectric energy harvesting using vapor chamber coolers for aerospace applications. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 33, 1602.
8. Luo D., Wu H., Cao J., Yan Y., Yang X., & Cao B. (2024). Numerical investigation of a battery thermal management system integrated with vapor chamber and thermoelectric refrigeration. *Journal of Cleaner Production*, 434, 140089.
9. Maksymuk M., Zazakowny K., Lis A., Kosonowski A., Parashchuk T., & Wojciechowski K.T. (2022). Development of the anodized aluminium substrates for thermoelectric energy converters. Ceramics International.

Надійшла до редакції: 10.07.2024.

**A. Gurevich**, *Cand. Sc. (Phys.-Math.)*<sup>1</sup>

**I. Steiner**,<sup>1</sup>

**Z. Dashevsky**, *DSc. (Phys.-Math.)*<sup>2</sup>

**S. Vitriuk**<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Double Check Ltd, Bnei Brak, Israel;

*e-mail: alex@dc-ts.com*

<sup>2</sup>Ben-Gurion University of the Negev, Beer-Sheva, Israel;

<sup>3</sup>Interm Ltd, Chernivtsi, Ukraine

## **DEVELOPMENT OF HIGH PERFORMANCE THERMOELECTRIC MODULES WITH SUBSTRATES MADE BY VAPOR CHAMBER TECHNOLOGY**

*Thermoelectric systems are widely used in different industrial applications. The main factor limiting rise of application range is relatively low Coefficient of Performance. Improvement performance of Thermoelectric modules (TEM) is a goal of multiple research projects during few decades. Main efforts are applied to development of new efficient materials but significant progress in performance of materials suitable for industrial use has not reached yet. Another way of performance improvement is optimization of modules structure elements, particularly substrates. It is known that performances of TEM are improved with increase of substrates thermal conductivity. The best candidate for highly conductive substrates is Vapor Chamber having effective thermal conductivity of more than 5.000 W/m/K which is about 30 times higher than the best ceramic substrates made from ALN. Optimized Vapor Chambers including copper envelope with sintered wick and aluminum with grooved wick were developed, manufactured and tested. Two different working fluids were used for the hot and cold copper Vapor Chamber substrates: water and methanol. Effective thermal conductivity of copper Vapor Chamber substrates was about 2.500 W/m/K. Computer simulations showed that Thermoelectric Modules with Vapor Chamber Substrates (TEVC) provides more even*

temperature distribution over the heat sink surface and reduces hot spot temperature on each leg. As a result, effective thermal resistance of heat sink for TEVC is lower than for regular TEM at the same module size, structure, power dissipation and heat sink parameters. For the studied example, thermoelectric system including TEVC assembled with heat sinks provides rise of COP relatively to regular TEM on about 40 % at the same conditions. When used as power generator TEVC improves efficiency on more than 18 %. Experimental samples of TEVC were manufactured and tested. Good correlation between theoretical and test data was proved. Bibl. 9, Fig. 12.

**Key words:** thermoelectric modules, thermal conductivity, thermoelectric cooling systems.

## References

1. Riffat S.B., & Xiaoli M. (2003). Thermoelectric: a review of present and potential applications. *Applied Thermal Engineering*, 23, 913–935.
2. d'Angelo M., Galassi C., & Lecis N. (2023). Thermoelectric materials and applications: A review. *Energy*, 16, 6409.
3. Huang L., Zheng Y., Xing L., & Hou B. (2023). Recent progress of thermoelectric applications for cooling/heating, power generation, heat flux sensor and potential prospect of their integrated applications. *Thermal Science and Engineering Progress*, 45, 102064.
4. Sauciuc I., Erturk H., Chrysler G., Bala V., & Mahajan R. (2005). Thermal devices integrated with thermoelectric modules with applications to CPU cooling. *Proceedings of IPACK2005*.
5. Gurevich A., Steiner I., & Huang E. (2017). Design of thermal systems based on combination of thermoelectric and vapor chamber technologies. *Proceedings of 33rd Thermal Measurement, Modeling & Management Symposium*.
6. Lv Y., Han X., Chen X., & Yao Y. (2023). Maximizing energy output of a vapor chamber based high concentrated PV-thermoelectric generator hybrid system. *Energy*, 282, 128882.
7. Sarris A., Bhatti B., & Ciampra F. (2022). Thermoelectric energy harvesting using vapor chamber coolers for aerospace applications. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 33, 1602.
8. Luo D., Wu H., Cao J., Yan Y., Yang X., & Cao B. (2024). Numerical investigation of a battery thermal management system integrated with vapor chamber and thermoelectric refrigeration. *Journal of Cleaner Production*, 434, 140089.
9. Maksymuk M., Zazakowny K., Lis A., Kosonowski A., Parashchuk T., & Wojciechowski K.T. (2022). Development of the anodized aluminium substrates for thermoelectric energy converters. *Ceramics International*.

Submitted: 10.07.2024.