

## ТРАНСПОРТ

УДК 629.1.04:621.3.082.62

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/39>

**Кириченко О.С.**

Київський інститут водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного  
Державного університету інфраструктури та технологій

### ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ З РІЗНИМИ ГЕОМЕТРИЧНИМИ ФОРМАМИ НАПІВПРОВІДНИКІВ ДЛЯ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ТРАНСПОРТУ

*В роботі викладено результати порівняльного аналізу робочих характеристик термоелектричних модулів для електрообладнання транспорту, що містять в своїй конструкції напівпровідники з різними геометричними формами. В роботі приведено деякі приклади з переліку електрообладнання водного транспорту, що містить в своїй конструкції термоелектричні вузли. Термоелектричні модулі, що порівнювались, мали однакові габаритні розміри  $55 \times 65 \times 8$  мм. Кожен модуль складався з ланцюга 20-ти послідовного з'єднаних «П-подібною змійкою» та однаково розміщених в просторі термоелектричних елементів. Для п'яти різних конструкцій термоелектричних модулів електрообладнання транспорту було створено відповідні п'ять математичних моделей. Розрахунок математичних моделей проводився чисельним методом. На основі виконаних розрахунків для п'яти різних термоелектричних модулів електрообладнання транспорту отримано та побудовано робочі характеристики для температури, напруженості електричного поля, омічного (джоулевого) тепла, густини струму та густини теплового потоку. Порівняльний аналіз робочих характеристик проводився для п'яти термоелектричних модулів з різними геометричними формами напівпровідників: з напівпровідниками типової поширеної класичної конструкції у формі куба – перша конструкція; з напівпровідниками в формі куба з наскрізним квадратним отвором – друга конструкція; з напівпровідниками в формі двох усічених пірамід – третя конструкція; з напівпровідниками в формі куба з двома виїмками – четверта конструкція; з напівпровідниками у формі дев'яти окремих кубоїдів – п'ята конструкція. За базову при проведенні порівняльного аналізу характеристик було прийнято першу конструкцію термоелектричного модуля, що містила напівпровідники Р та N-типу з широко поширеною класичною формою куба. Характеристики інших чотирьох термоелектричних модулів (друга, третя, четверта та п'ята конструкції) порівнювались з характеристиками базового термоелектричного модуля (перша конструкція) та між собою. Перша, друга, третя та четверта кінцево-елементні моделі термоелектричних модулів містили 81 просторовий об'єкт, в тому числі 20 напівпровідників Р-типу і 20 напівпровідників N-типу, а також 41 комутаційну пластину. П'ята кінцево-елементна модель термоелектричного модуля містила 401 просторовий об'єкт, в тому числі 180 напівпровідників Р-типу і 180 напівпровідників N-типу, а також 41 комутаційну пластину. Отримані значення робочих параметрів дозволяють встановити діапазони безпечної роботи термоелектричних модулів та підвищити ефективність термоелектричного електрообладнання водного транспорту в конкретних експлуатаційних режимах.*

**Ключові слова:** порівняльний аналіз, термоелектричний модуль, геометрична форма напівпровідників, електрообладнання транспорту, водний транспорт.

**Постановка проблеми.** На транспорті широко використовується електрообладнання різного технологічного призначення, в конструкції якого передбачено застосування термоелектричних вузлів. Ці термоелектричні вузли електрообладнання транспорту складаються з термоелектричних модулів та допоміжних конструктивних елемен-

тів, що монтуються з ними одночасно. Моделювання термоелектричних модулів з широко поширеними типовими класичними конструкціями можна здійснити за допомогою існуючих математичних моделей на основі аналітичних рівнянь [2, 3], однак проведення аналогічного моделювання для конструктивно нових термоелектрич-

них модулів може бути неможливим і реалізувати його вдається з використанням чисельних методів розрахунку [5, 9, 15]. До електрообладнання водного транспорту з термоелектричними вузлами відносяться термоелектричні теплові насоси, охолоджувальні пристрої і установки кондиціонування повітря, нагрівальні і опалювально-охолоджувальні пристрої, апарати для отримання прісної води, а також термоелектричні установки в якості суднових джерел електроенергії [13]. Електрообладнання водного транспорту даного типу має вагомі переваги в порівнянні з електрообладнанням аналогічного призначення. До переваг електрообладнання з термоелектричними вузлами слід віднести відносну простоту схемної реалізації, надійність в експлуатації, керуванні та регулюванні при зміні режимів роботи, великий ресурс роботи, можливість швидкого пуску та зупинки, простоту обслуговування. Слід зазначити, що в порівнянні зі звичайним електрообладнанням транспорту електрообладнання з термоелектричними вузлами має меншу ефективність, проте в конкретних випадках зі специфічними умовами роботи електрообладнання водного транспорту наведений перелік переваг в значній мірі може виявитись визначальним.

Вищезазначене вказує на широке використання термоелектричних модулів з типовими класичними конструкціями в електрообладнанні водного транспорту. Проте для електрообладнання подібного типу не в повній мірі висвітлені питання підвищення його ефективності за рахунок застосування нових конструкцій термоелектричних модулів. Тому, актуальними залишаються питання проведення порівняльного аналізу робочих характеристик конструкцій термоелектричних модулів з різними геометричними формами напівпровідників для електрообладнання транспорту.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Термоелектричні модулі широко використовуються на транспорті в пристроях і установках з термоелектричними вузлами, в яких застосовується як прямий, так і зворотний термоелектричні ефекти. Переважна більшість опублікованих робіт стосується питань підвищення ефективності електрообладнання транспорту за рахунок вдосконалення різними способами власне самого термоелектричного матеріалу, в той час як питання конструювання термоелектричних модулів розглянуті в меншій мірі. Нижче проаналізовано деякі публікації останніх років, що заслуговують уваги при дослідженні термоелектричних модулів на транспорті.

Так, в роботі [1] описані методи розрахунку оптимальних параметрів двох моделей термоелектричного перетворювача в режимі генерації електричної енергії, а саме секційного перетворювача з рухом теплоносія вздовж теплопоглинаючих спаїв термоелементів і перетворювача з проникних термоелементів, в якому теплоносієм проходить по каналам, розташованим вздовж висоти віток термоелементів. Розраховані енергетичні та економічні показники таких моделей і проведено їх порівняльний аналіз.

Проблему, пов'язану з експлуатацією транспортного засобу в умовах низьких температур оточуючого повітря розглянуто в [4], обґрунтовується необхідність прийняття спеціальних заходів для підтримки оптимального теплового режиму акумуляторної батареї. Проведені розрахункові дослідження запропонованої системи для компенсації теплових втрат акумуляторної батареї під час утримання транспортного засобу в умовах низьких температур методом термостатування з застосуванням термоелектричних перетворювачів енергії.

В роботі [10] здійснено аналіз характеристик термоелектричних генераторів теплообмінного типу, які використовують теплоту системи охолодження суднових двигунів. Окреслено перспективи застосування подібних термоелектричних генераторів.

Досвід створення транспортних термоелектричних холодильників на базі шаф побутових холодильників описано в [17], також представлено результати порівняльних випробувань базової моделі й нових зразків з різними типами термоелектричних модулів.

В роботі [11] наведено результати комп'ютерного проектування і експериментальних досліджень зі створення нової конструкції термоелектричного термопарного генераторного модуля «Алтек-1061» для підвищення теплопродуктивності термоелектричного автомобільного передпускового нагрівника.

Дослідження залежності чутливості термоперетворювача від взаємного розташування його конструктивних елементів висвітлено в [12]. Також, підтверджено важливість оптимального узгодження опору термопари з опором нагрівника для кожного конкретного застосування термоперетворювача та доцільність оптимізації елементів його конструкції.

Авторами роботи [14] відзначено, що відсоток внеску статей із галузі матеріалознавство у термоелектричну енергетику, як розділу, який відповідає фундаментальній природничій науці, становить (включаючи Chemical Engineering) 50,4 %. Також, зазначено, що незважаючи на відносно

низьку ефективність промислових термоелектричних пристроїв є можливість створити цілу низку різних автономних джерел енергії, які використовуються як у медицині, космічному застосуванні, так і в автомобільній техніці тощо.

Окрім розглянутих робіт є, також, і інші змістовні наукові дослідження, в яких розглядається теорія та практика застосування електрообладнання з термоелектричними вузлами на транспорті.

**Метою статті** є викладення результатів порівняльного аналізу робочих характеристик термоелектричних модулів з різними геометричними формами напівпровідників, що застосовуються в термоелектричних вузлах електрообладнання транспорту, а також вибір оптимальних конструкцій термоелектричних модулів для підвищення ефективності роботи електрообладнання водного транспорту з термоелектричними вузлами.

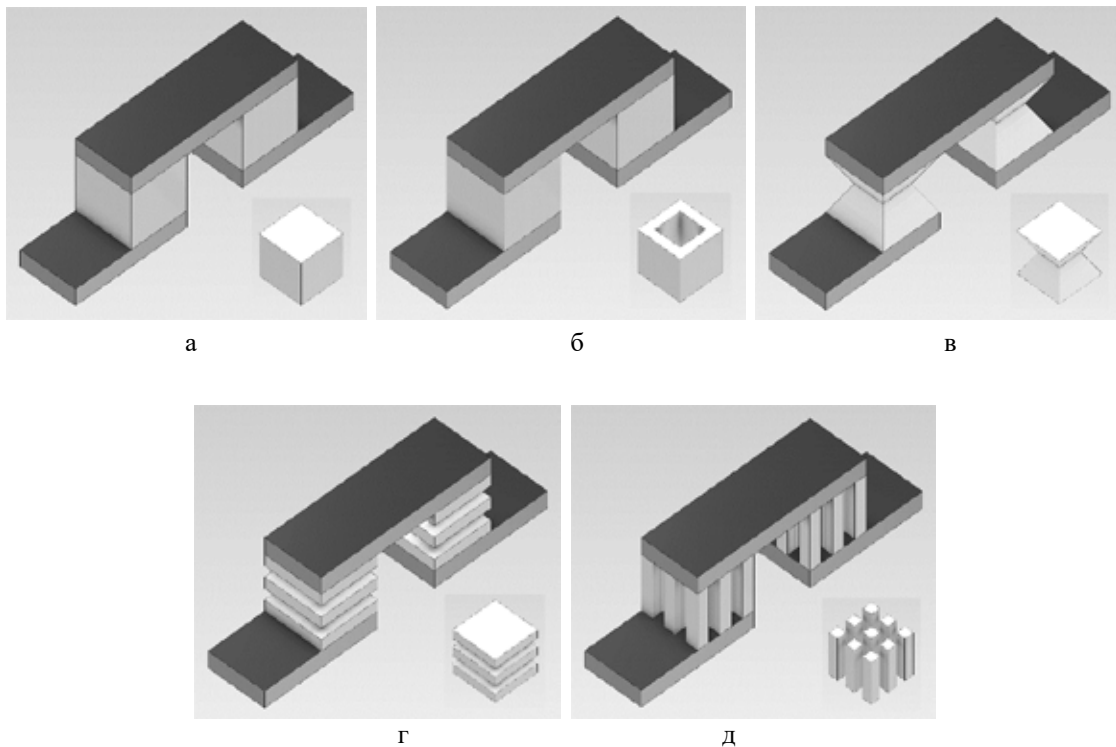
**Виклад основного матеріалу дослідження.** Проведене дослідження було спрямоване на підвищення ефективності електрообладнання водного транспорту з термоелектричними вузлами за рахунок підвищення використання термоелектричного ефекту Пельтьє в термоелектричних модулях цих вузлів. Порівняльному аналізу характеристик підлягали п'ять конструкцій термоелектричних модулів з різною геометрією

напівпровідників (рис. 1): напівпровідники з формою куба зі стороною 5 мм – перша конструкція; напівпровідники з формою куба зі стороною 5 мм з наскрізним квадратним отвором 3×3 мм – друга конструкція; напівпровідники з формою двох однакових усічених пірамід висотою 2,5 мм і з основами у вигляді квадратів 5×5 мм та 2,5×2,5 мм – третя конструкція; напівпровідники з формою куба зі стороною 5 мм з двома виїмками, які огинають його бокові поверхні (наскрізні пази квадратного профілю 1×1 мм) – четверта конструкція; напівпровідники з формою в вигляді дев'яти окремих кубоїдів 1×1×5 мм – п'ята конструкція. Всі розглянуті конструкції термоелектричних модулів з різними геометричними формами напівпровідників складались з ланцюгів, які містили однакову кількість послідовно з'єднаних між собою термоелектричних елементів.

ТермоЕРС термоелектричного елемента можна представити наступним математичним виразом [2]:

$$E = \int_{T_2}^{T_1} (\alpha_1(T) - \alpha_2(T)) dT, \quad (1)$$

де  $\alpha_1, \alpha_2$  – коефіцієнти термоЕРС першого та другого матеріалів термоелектричного елемента відповідно;  
 $T_1, T_2$  – температури гарячої і холодної комутаційних пластин відповідно.



**Рис. 1.** Конструкції термоелектричних елементів з різними геометричними формами напівпровідників, на основі яких сформовано термоелектричні модулі електрообладнання транспорту: напівпровідники з формою куба (а); напівпровідники з формою куба з наскрізним квадратним отвором (б); напівпровідники з формою двох усічених пірамід (в); напівпровідники з формою куба з двома виїмками (г); напівпровідники з формою окремих кубоїдів (д)

Ефективність роботи термоелектричного елемента може бути оцінена величиною його ККД  $\eta$  та величиною добротності  $Z_0$  [2].

ККД термоелектричного елемента:

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \frac{\frac{m}{m+1}}{1 + \frac{\kappa_0 r}{\alpha^2} \frac{m+1}{T_1} - \frac{1}{2} \frac{T_1 - T_2}{T_1} \frac{1}{m+1}}, \quad (2)$$

де  $\alpha = \alpha_1 - \alpha_2$  – термоелектричний коефіцієнт;

$$\frac{T_1 - T_2}{T_1} = \eta_c - \text{ККД циклу Карно};$$

$m = \frac{R}{r}$  – відношення опору зовнішнього навантаження  $R$  до внутрішнього опору  $r$  термоелектричного елемента;

$\kappa_0$  – теплопровідність термоелектричного елемента.

Добротність  $Z_0$  термоелемента залежить від термоелектричної добротності матеріалів його частин:

$$\sqrt{Z_0} = \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{\frac{\alpha_1}{\sqrt{Z_1}} + \frac{\alpha_2}{\sqrt{Z_2}}}, \quad (3)$$

де  $Z_1 = \frac{\alpha_1^2}{\rho_1 \kappa_1}$ ,  $Z_2 = \frac{\alpha_2^2}{\rho_2 \kappa_2}$  – розрахункові коефіцієнти добротності;

$\rho_1$ ,  $\rho_2$  і  $\kappa_1$ ,  $\kappa_2$  – питомі опори і коефіцієнти теплопровідності першого та другого матеріалів термоелектричного елемента відповідно.

Для опису термоелемента в режимі термоелектричного нагріву можна скористатися моделлю термопарного елемента [3], вважаючи бокові поверхні віток адіабатично ізольованими, холодні спаї термостатованими при температурі  $T_0$ , а гарячим віддається тепло  $Q_w$  об'єкту, що підлягає розігріву, при температурі  $T_1$ . Напряму струму при термоелектричному нагріві протилежний напрямку струму при термоелектричному охолодженні; на робочому спаї теплоти Джоуля і Пельтьє додаються. Як і в охолоджувальних елементах, є достатньою для більшості випадків точною можна вважати, що половина тепла Джоуля, яке виділяється в вітці може бути віднесено до холодного спаю, половина – до гарячого. Тепловий потік  $Q_0$  через холодний спай термоелемента може бути представлено виразом:

$$Q_0 = (\alpha_1 - \alpha_2) T_0 I - \frac{1}{2} I^2 l \left( \frac{1}{\sigma_1 s_1} + \frac{1}{\sigma_2 s_2} \right) - \frac{T_1 - T_0}{l} (\chi_1 s_1 + \chi_2 s_2), \quad (4)$$

де  $T_0, T_1$  – відповідно температури холодних і гарячих спаїв;

$I$  – сила електричного струму;

$l$  – довжина термоелемента;

$\sigma_1, \sigma_2$  – коефіцієнти електропровідності матеріалів віток термоелемента;

$s_1, s_2$  – площі поперечного перерізу матеріалів віток термоелемента;

$\chi_1, \chi_2$  – коефіцієнти теплопровідності матеріалів віток термоелемента.

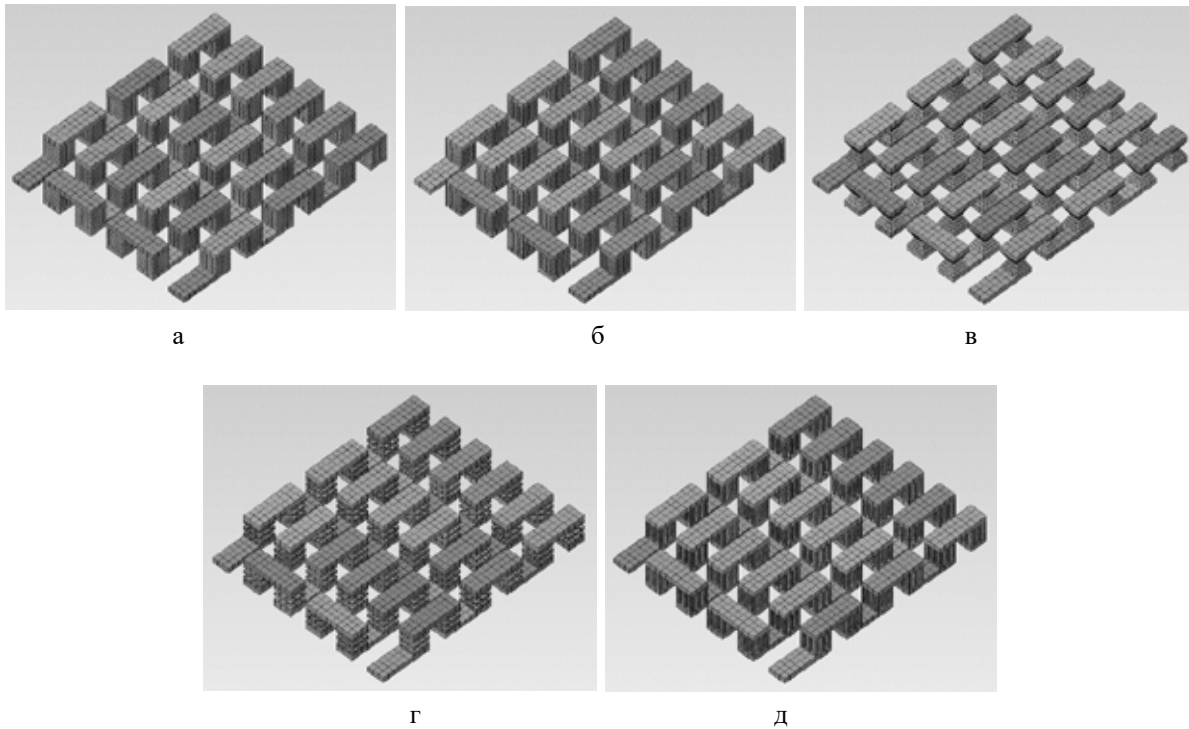
Тепловий потік  $Q_w$  через гарячий спай термоелемента може бути представлено виразом:

$$Q_w = (\alpha_1 - \alpha_2) T_1 I + \frac{1}{2} I^2 l \left( \frac{1}{\sigma_1 s_1} + \frac{1}{\sigma_2 s_2} \right) - \frac{T_1 - T_0}{l} (\chi_1 s_1 + \chi_2 s_2). \quad (5)$$

За базу для проведення порівняльного аналізу характеристик було прийнято першу конструкцію термоелектричного модуля, що містила напівпровідники  $P$  та  $N$ -типу з широко поширеною класичною формою куба з довжиною сторони 5 мм. Характеристики інших чотирьох нових конструкцій термоелектричних модулів порівнювались з характеристиками базової конструкції та між собою. Дослідження проводилось в декілька етапів, тому геометричні форми напівпровідників цих чотирьох нових термоелектричних модулів обирались з урахуванням попередніх результатів розрахунків [7, 8] та [6, 16].

Всі п'ять розглянутих конструкцій термоелектричних модулів мали однакові загальні габаритні розміри 55×65 мм та висоту 8 мм (без урахування товщин двох пластин ізоляційного корпусу), а також однакові ланцюги з 20-ти послідовного з'єднаних «П-подібною змійкою» та однаково розміщених в просторі термоелементів. Кожен термоелемент складався з пари напівпровідників  $P$  та  $N$ -типу, які було з'єднано між собою металевими (мідними) комутаційними пластинами в вигляді однакових прямокутних паралелепіпедів 5×15×1,5 мм. Перша та остання комутаційні металеві пластини являли собою контактні виводи для під'єднання проводів електроживлення. Для п'яти конструкцій термоелектричних модулів створено п'ять відповідних математичних моделей (рис. 2), кожна з яких була розрахована чисельним методом. В якості граничних умов було задано нульовий електричний потенціал зовнішньої крайньої торцевої поверхні останньої в ланцюзі термоелектричних елементів комутаційної пластини, а температура всіх нижніх поверхонь холодних комутаційних пластин вважалась рівною 0 °С. Зовнішні поверхні термоелектричних модулів вважались адіабатично теплоізольованими, тобто моделювання термоелектричних модулів проводилось в більш напруженому режимі їх роботи. Значення термоелектричних коефіцієнтів, коефіцієнтів електро- та теплопровідності для всіх п'яти математичних моделей приймались однаковими.

Перша, друга, третя та четверта кінцево-елементні моделі термоелектричних модулів



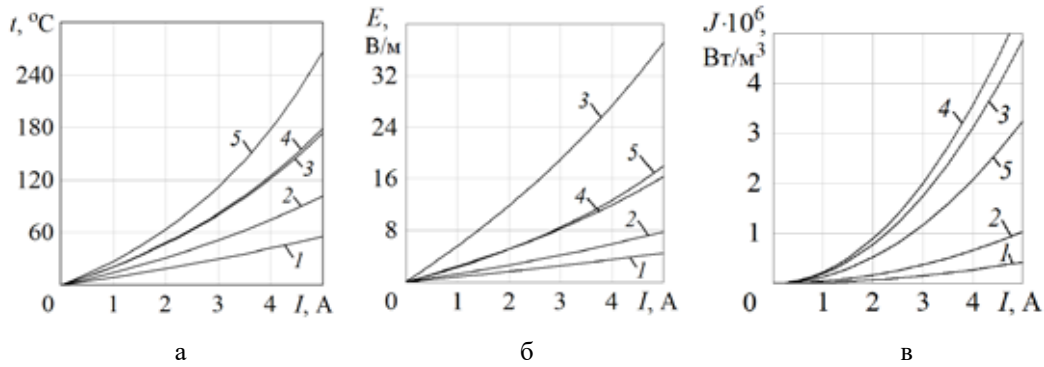
**Рис. 2. Розрахункові кінцево-елементні моделі термоелектричних модулів з різними геометричними формами напівпровідників: напівпровідники з формою куба (а); напівпровідники з формою куба з наскрізним квадратним отвором (б); напівпровідники з формою двох усічених пірамід (в); напівпровідники з формою куба з двома виїмками (г); напівпровідники з формою окремих кубоїдів (д)**

(рис. 2, а-г) містили 81 просторовий об'єкт, в тому числі 20 напівпровідників  $P$ -типу і 20 напівпровідників  $N$ -типу, а також 41 комутаційну пластину. П'ята кінцево-елементна модель термоелектричного модуля (рис. 2, д) містила 401 просторовий об'єкт, в тому числі 180 напівпровідників  $P$ -типу і 180 напівпровідників  $N$ -типу, а також 41 комутаційну пластину. Щодо статистичної кількості вузлів та кінцевих елементів, то в кожній з п'яти розрахункових моделей термоелектричних модулів вони були різними: перша модель (рис. 2, а) налічувала 40572 вузли і 6107 кінцевих елементів, друга модель (рис. 2, б) містила 35932 вузли і 4307 кінцевих елементів, третя модель (рис. 2, в) включала 45852 вузли і 7107 кінцевих елементів, четверта модель (рис. 2, г) охоплювала 59726 вузлів і 25345 кінцевих елементів, п'ята модель (рис. 2, д) забезпечувала 104292 вузли і 12627 кінцевих елементів. Внесення розрахункових налаштувань та сам процес розрахунку всіх п'яти моделей термоелектричних модулів зі значною кількістю вузлів і кінцевих елементів потребували відповідних обчислювальних потужностей.

Результати розрахунків п'яти моделей термоелектричних модулів для зручності проведення порівняльного аналізу їх робочих характеристик показано на графіках у вигляді сімейства кривих

на рис. 3-4. На рис. 3 показано графіки робочих характеристик  $t(I)$  для температури  $t$ ,  $E(I)$  для напруженості  $E$  електричного поля,  $J(I)$  для омичного (джоулевого) нагріву  $J$  при силі постійного струму в діапазоні від 0 до 5 А, а на рис. 4 наведено графіки робочих характеристик  $j(I)$  для густини струму  $j$  та  $q(I)$  густини теплового потоку  $q$ .

Свідченням підвищення термоелектричного ефекту в термоелектричних модулях є підвищені значення температури на стороні гарячих комутаційних пластин. Аналіз графіка на рис. 3, а показав, що всі запропоновані геометричні форми напівпровідників (криві 2-5) дають помітне підвищення температури на гарячій стороні комутаційних пластин в порівнянні з базовою класичною геометричною формою напівпровідника (крива 1). Розташування кривої 5 на графіку для температури  $t$  (рис. 3, а) свідчить про те, що найбільше використання термоелектричного ефекту досягнуто при конструкції термоелектричного модуля з геометрією напівпровідників у формі дев'яти окремих прямокутних паралелепіпедів (кубоїдів) замість одного в формі єдиного куба. Криві 2-4, також, свідчать про збільшення термоелектричного ефекту, проте в меншій мірі. Наведені криві для температур (рис. 3) відображають її верхні



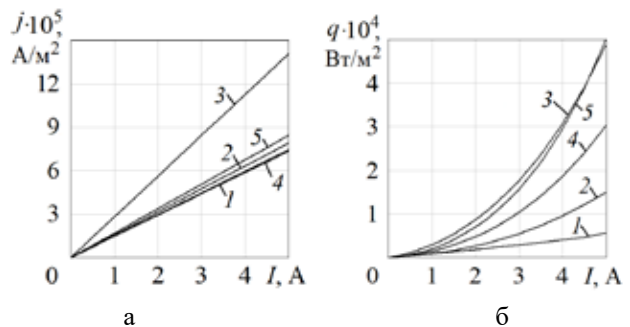
**Рис. 3.** Графіки залежностей температури  $t(I)$  (а), напруженості електричного поля  $E(I)$  (б) та омичного (джоулевого) нагріву  $J(I)$  від сили постійного струму  $I$ , що проходить через термоелектричний модуль електрообладнання транспорту: 1 – для класичної конструкції напівпровідників у формі куба; 2 – для конструкції напівпровідників у формі куба з наскрізним квадратним отвором; 3 – для конструкції напівпровідників у формі двох усічених пірамід; 4 – для конструкції напівпровідників у формі куба з двома виїмками; 5 – для конструкції напівпровідників у формі окремих кубоїдів

межі для розглянутих термоелектричних модулів, а також дозволяють оцінити значення сил струму, при яких буде перевищено допустимий нагрів  $80\text{ }^\circ\text{C}$  на гарячій стороні комутаційних пластин, що може призвести до пошкодження або навіть виходу з ладу термоелектричних модулів. Крім того, за деякими даними для підтримки найбільш високих значень ККД термоелектричного модуля рекомендується, щоб значення сили струму забезпечувало перепад температур між холодними і гарячими комутаційними пластинами, який би не перевищував  $15\text{ }^\circ\text{C}$ .

На рис. 3, б міститься інформація про напруженість електричного поля по моделям термоелектричних модулів. Всі чотири нові конструкції термоелектричних модулів мають більші значення напруженості електричного поля (криві 2-5) в порівнянні з базовою конструкцією термоелектричного модуля з напівпровідниками в формі куба (крива 1). Найбільші значення омичного (джоулевого) нагріву (рис. 3, в) в конструкціях термоелектричних модулів з напівпровідниками в формі куба з двома виїмками (крива 4) та напівпровідниками в формі двох усічених пірамід (крива 3).

Найбільші значення густини струму (рис. 4, а) характерні для термоелектричного модуля з напівпровідниками в формі усічених пірамід (крива 3), а найбільші значення густини теплового потоку (рис. 4, б) в термоелектричному модулі з напівпровідником у формі усічених пірамід (крива 3) і у формі окремих кубоїдів (крива 5).

Таким чином, на основі проведеного порівняльного аналізу робочих характеристик п'яти термоелектричних модулів з різною геометричною формою напівпровідників отримано кон-



**Рис. 4.** Графіки залежностей густини електричного струму  $j(I)$  (а) та густини теплового потоку  $q(I)$  (б) від сили постійного струму  $I$ , що проходить через термоелектричний модуль електрообладнання транспорту: 1 – для класичної конструкції напівпровідників у формі куба; 2 – для конструкції напівпровідників у формі куба з наскрізним квадратним отвором; 3 – для конструкції напівпровідників у формі двох усічених пірамід; 4 – для конструкції напівпровідників у формі куба з двома виїмками; 5 – для конструкції напівпровідників у формі окремих кубоїдів

кретні дані, які можуть виявитись корисними при виборі конкретної найбільш оптимальної конструкції термоелектричного модуля для підвищення ефективності електрообладнання транспорту в конкретних експлуатаційних режимах.

#### Висновки.

В роботі створено п'ять математичних моделей термоелектричних модулів з однаковими загальними габаритними розмірами  $55 \times 65$  мм та висотою 8 мм, що склались з ланцюга 20-ти послідовного з'єднаних «П-подібною змійкою» та однаково розміщених в просторі термоелементів. Створені моделі відрізнялись між собою геометричними формами напівпровідників: напів-

провідники з формою куба зі стороною 5 мм; напівпровідники з формою куба зі стороною 5 мм з наскрізним квадратним отвором 3×3 мм; напівпровідники з формою двох однакових усічених пірамід висотою 2,5 мм і з основами у вигляді квадратів 5×5 мм та 2,5×2,5 мм; напівпровідники з формою куба зі стороною 5 мм з двома виїмками, які огинають його бокові поверхні (наскрізні пази квадратного профілю 1×1 мм); напівпровідники з формою в вигляді дев'яти окремих кубоїдів 1×1×5 мм.

На основі п'яти створених математичних моделей термоелектричних модулів виконано чисельний розрахунок та проведено порівняльний аналіз робочих характеристик для температури  $t$ , напруженості  $E$  електричного поля, омічного (джоуле-

вого) нагріву  $J$ , густини струму  $j$  та густини теплового потоку  $q$ .

Встановлено, що найбільше використання термоелектричного ефекту Пельтьє досягнуто в термоелектричному модулі з напівпровідниками в формі окремих дев'яти кубоїдів. Крім того, термоелектричний ефект збільшується, проте в меншій мірі, в термоелектричних модулях з напівпровідниками в формі двох усічених пірамід та в формі куба з двома виїмками.

Отримані значення робочих параметрів дозволяють встановити діапазони безпечної роботи термоелектричних модулів та підвищити ефективність термоелектричного електрообладнання водного транспорту в конкретних експлуатаційних режимах.

### Список літератури:

1. Анатичук Л.І., Вихор Л.М., Коцур М.П., Кузь Р.В., Черкез Р.Г. Порівняльний аналіз термоелектричних перетворювачів енергії з проникними та уцільними термоелементами. *Термоелектрика*. Чернівці : Інститут термоелектрики НАН України та МОН України, 2021. № 2. С. 55-70.
2. Анатичук Л.І. Термоелектрические преобразователи энергии. Термоэлементы. Элементная база термоелектричества. Т. 2. : монографія / ред. Л.Н. Вихор, О.Я. Лусте. Киев-Черновцы : Інститут термоелектричества, 2003. 376 с.
3. Анатичук Л.І. Термоэлементы и термоелектрические устройства: Справочник. К. : Наукова думка, 1979. 768 с.
4. Дмитриченко М.Ф., Гутаревич Ю.Ф., Трифонов Д.М., Сирота О.В. Застосування термоелектричних перетворювачів енергії для зменшення впливу природно-кліматичних факторів на технічну готовність транспортного засобу. *Термоелектрика*. Чернівці : Інститут термоелектрики НАН України та МОН України, 2020. № 3. С. 58-69.
5. Карвацький А.Я. Метод скінченних елементів у задачах механіки суцільних середовищ. Програмна реалізація та візуалізація результатів. К. : НТУУ «КПІ», 2015. 391 с.
6. Кириченко О.С. Модернізований термоелектричний елемент з компенсованою комутаційною пластиною для транспортного електрообладнання. *Матеріали III міжнародної науково-практичної конференції «Дніпровські читання-2022»*. К. : вид-во Київського інституту водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного ДУІТ. 2022. С. 99-101.
7. Кириченко О.С. Порівняльний аналіз термоелектричних елементів з різною геометричною формою напівпровідникового матеріалу. *Матеріали XII міжнародної науково-технічної конференції «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці»*. Миколаїв : НУК. 2021. С. 390-392.
8. Кириченко О.С., Білюк І.С., Шарейко Д.Ю., Фоменко А.М., Гаврилов С.О., Бугрім Л.І. Чисельне тримірне моделювання термоелектричного охолоджувача вимірювального електроустаткування автоматичних систем. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. К. : ТНУ ім. В.І. Вернадського, 2018. Том 29 (68). Ч. 1. № 6. С. 58-63.
9. Кулон Жан-Луї, Сабоннадьер Жан-Клод. САПР в електротехніці. М. : Мир, 1988. 208 с.
10. Лобунець Ю.М. ТЕГ теплообмінного типу для суднових силових установок. Частина II. *Термоелектрика*. Чернівці : Інститут термоелектрики НАН України та МОН України, 2014. № 6. С. 69-76.
11. Максимчук М.В. Про оптимізацію термоелектричних генераторних модулів автомобільного передпускового нагрівника. *Термоелектрика*. Чернівці : Інститут термоелектрики НАН України та МОН України, 2017. № 1. С. 58-68.
12. Микитюк П.Д., Микитюк О.Ю. Про деякі варіанти покращення параметрів термоелектричних перетворювачів. *Термоелектрика*. Чернівці : Інститут термоелектрики НАН України та МОН України, 2019. № 3. С. 74-79.
13. Манасян Ю.Г. Судовые термоелектрические устройства. Л. : Судостроение, 1968. 283 с.
14. Никурій Л.І., Замуруєва О.В., Яворський Р.С., Найдич Б.П., Яворський Я.С., Новосад О.В., Федосов С.А. Перспективні матеріали і технології термоелектрики. *Міжвузівський збірник «Наукові нотатки»*. Луцьк : ЛНТУ, 2021. Випуск 71. С. 202-209.

15. Сабоннадьер Жан-Клод, Кулон Жан-Луи. Метод конечных элементов и САПР. М. : Мир, 1989. 192 с.
16. Тараненко С.В., Кириченко О.С., Колесник В.В., Пріступа С.В., Пастух О.В. Термоелектричний елемент з компенсованою комутаційною пластиною для установок і пристроїв суднової енергетики. *Матеріали II міжнародної науково-практичної конференції «Дніпровські читання-2021»*. К. : вид-во Київського інституту водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного ДУІТ. 2021. С. 88-92.
17. Філін С.О., Ясінська Б. Економічні транспортні термоелектричні холодильники із дворівневим регулюванням температури: досвід створення й результати випробувань. *Термоелектрика*. Чернівці : Інститут термоелектрики НАН України та МОН України, 2015. № 3. С. 41-48.

#### **Kyrychenko O.S. COMPARATIVE ANALYSIS OF CHARACTERISTICS OF THERMOELECTRIC MODULES WITH DIFFERENT GEOMETRIC SHAPES OF SEMICONDUCTORS FOR TRANSPORT ELECTRICAL EQUIPMENT**

*The paper presents the results of the comparative analysis of the operating characteristics of thermoelectric modules for transport electrical equipment, which contain semiconductors with different geometric shapes in their design. Some examples from the list of water transport electrical equipment containing thermoelectric units in their design are given. The compared thermoelectric modules had the same overall dimensions of 55×65×8 mm. Each module consisted of a chain of 20 thermoelectric elements connected in series by a "II-shaped snake" and equally spaced. Five mathematical models for five different designs of thermoelectric modules of transport electrical equipment were created. Mathematical models were calculated using a numerical method. On the basis of the performed calculations, operating characteristics for temperature, electric field strength, ohmic (Joule) heat, current density and heat flux density for five different thermoelectric modules of the transport electrical equipment were obtained. The comparative analysis of the operating characteristics was carried out for five thermoelectric modules with different geometric shapes of semiconductors: semiconductors with the typical common classical cube shape – the first design; cube-shaped semiconductors with a through square hole – the second design; semiconductors with the shape of two truncated pyramids – the third design; semiconductors with the shape of a cube with two notches – the fourth design; semiconductors with the shape of nine separate cuboids – the fifth design. The first design of the thermoelectric module, which contained P and N-type semiconductors with a widespread classic cube shape, was taken as the basis for the comparative analysis of characteristics. The characteristics of the other four thermoelectric modules (second, third, fourth and fifth designs) were compared with the characteristics of the base thermoelectric module (first design) and with each other. The first, second, third, and fourth finite-element models of thermoelectric modules contained 81 spatial objects, including 20 P-type semiconductors and 20 N-type semiconductors, as well as 41 switching plates. The fifth finite-element model of the thermoelectric module contained 401 spatial objects, including 180 P-type semiconductors and 180 N-type semiconductors, as well as 41 switching plates. The obtained values of operating parameters allow to establish ranges of safe operation of thermoelectric modules and increase the efficiency of thermoelectric electrical equipment of water transport in specific operating modes.*

**Key words:** comparative analysis, thermoelectric module, geometric form of semiconductors, transport electric equipment, water transport.