

DOI: 10.46299/ISG.2023.MONO.TECH.1.4.1

4.1 Термоелектричні модулі електрообладнання водного транспорту

Термоелектричні модулі на ефекті Пельтьє функціонально призначені для передачі теплової енергії від однієї поверхні до іншої і складаються з напівпровідникових віток з провідностями *P*-типу та *N*-типу, що розташовані між двома ізоляційними підкладками, на поверхнях яких є місця комутаційних контактів, які з'єднують напівпровідникові вітки в єдине електричне коло. При пропусканні струму через електричне коло тепла енергія з однієї підкладки через вітки перетікає на другу підкладку, температура першої з підкладок падає, а другої збільшується. Термоелектричний модуль Пельтьє є складальною одиницею, що складається з набору термоелектричних елементів. В основі роботи термоелектричних елементів Пельтьє лежить контакт двох струмопровідних матеріалів з різними рівнями енергії електронів у зоні провідності [142, 143, 145]. При протіканні струму через контакт таких матеріалів, електрон повинен отримати енергію, щоб перейти у більш високоенергетичну зону провідності іншого напівпровідника. При поглинанні цієї енергії відбувається охолодження місця контакту напівпровідників. При протіканні струму в зворотному напрямку відбувається нагрівання місця контакту напівпровідників, додатково до звичайного теплового ефекту.

В даному дослідженні розглянуто термоелектричні модулі та термоелектричні елементи, які використовують контакт напівпровідників *P*-типу та *N*-типу, оскільки саме вони знаходять своє практичне застосування в електрообладнанні водного транспорту. Слід відзначити, що при контакті металів ефект Пельтьє значно менший і може бути навіть непомітним на фоні джоулевого нагріву і явищ теплопровідності. Через це нижче було наведено декілька конкретних розрахункових прикладів термоелектричних модулів на

базі напівпровідників з класичною конструкцією та з іншими конструкціями, що сприяють підвищенню використання термоелектричного ефекту Пельтьє.

Прикладом суднового термоелектричного електрообладнання є апарат для отримання прісної води (рис. 1). Принцип його дії також засновано на термоелектричному методі направленої переносу теплоти і полягає в тому, що підведення теплоти до морської води здійснюється зі сторони гарячих спаїв термоелектричних елементів, а зі сторони холодних спаїв відбувається конденсація пари, утвореної внаслідок випаровування води [155].

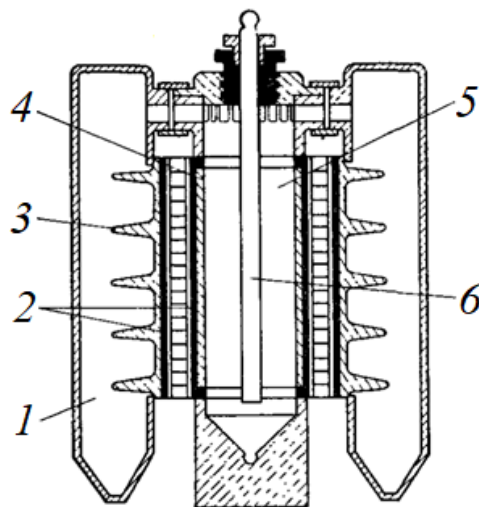


Рисунок 1. Термоелектричний опріснювач води: 1 – конденсатор;
2 – електрична ізоляція; 3 – термоелементи; 4 – графітовий циліндр;
5 – випаровувач

Подібна термоелектрична випаровувальна установка відрізняється від аналогічних існуючих на сьогодні установок відносно простотою, надійністю і компактністю. Тому застосування подібного термоелектричного обладнання в суднових умовах є доцільним.

Перспективи практичного застосування термоелектричного охолодження і нагріву в судновому електрообладнанні не обмежуються наведеним вище прикладом. Достатньо сприятливими в цьому відношенні є можливості

використання термоелектричних пристроїв і для інших цілей, зокрема для кондиціонування повітря.

На рис. 2, *а* зображено установку кондиціонування повітря потужністю 3,5 кВт, дослідний зразок якого було передано флоту [155]. Установку було розроблено компанією Carrier Corp. для атомних підводних човнів, вона призначена для підтримки у відсіку постійної температури 303 К при вологості 50 %. Конструкція установки виконана в вигляді шести однакових секцій, що мають розміри 305×178×57 мм. Повна вага установки становить 81 кг і займає об'єм 0,028 м³ (рис. 2, *б*).

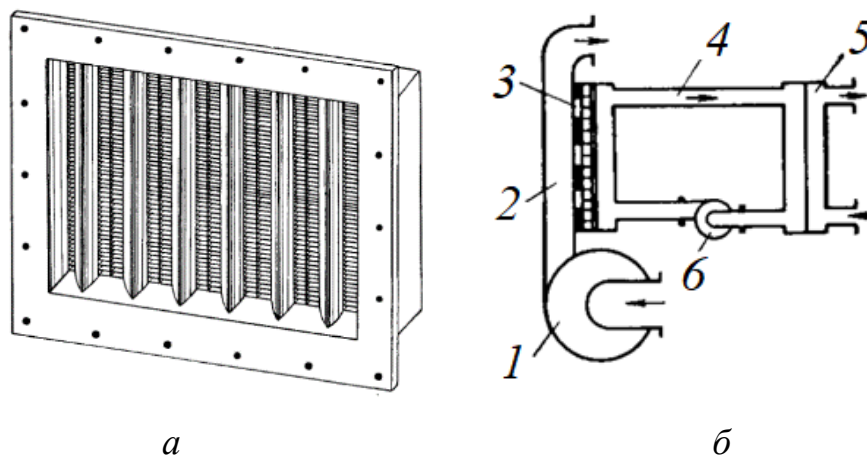


Рисунок 2. Термоелектричний кондиціонер для атомного підводного човна:
а – зовнішній вигляд; *б* – схема установки; 1 – вентилятор; 2 – повітропровід;
3 – батарея термоелектричних елементів; 4 – система прісної води;
5 – система заборотної води; 6 – насос прісної води

Як видно з рисунку, кондиційоване повітря продуває вентилятор через пластинчасті комірki, де він віддає теплоту холодним спаям термоелектричних елементів. Теплота, що виділяється на гарячих спаях, в свою чергу, сприймається прісною водою, що циркулює в замкнутому контурі. Охолодження прісної води здійснюється забортною водою в звичайному теплообмінному апараті.

В якості матеріалу ланцюгів термоелектричних елементів використовувались телуриди, а в якості електричної ізоляції – плівка з окису алюмінію товщиною 12,5 мікрон.

В даний час в світі успішно експлуатуються декілька десятків радіоізотопних термоелектричних установок різної потужності [155, 159]. Особливості цього типу електрообладнання можна побачити на схемі типової конструкції термоелектрогенератора, показаної на рис. 3.

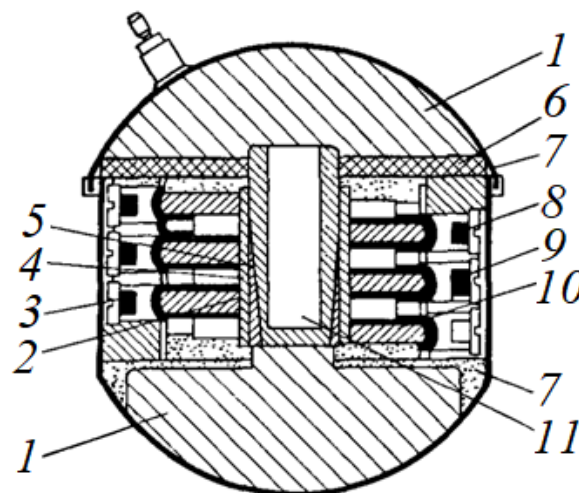


Рисунок 3. Конструкція термоелектрогенератора з радіоізотопним джерелом енергії: 1 – теплова ізоляція; 2 – гаряча комутаційна пластина; 3 – зовнішня оболонка; 4 – термоелектричні елементи; 5 – циліндр з радіоізотопним джерелом; 6 – ущільнювач; 7 – сферичне днище; 8 – пружина; 9 – холодна комутаційна пластина; 10 – теплоізоляційні кільця; 11 – радіоізотопне джерело

Радіоактивний ізоотоп розміщувався в капсулах з нержавіючої сталі, які встановлювались в нагрівальний циліндр. Останній закривався різьбовою кришкою, що приварюється до корпусу після заповнення капсулами.

Між нагрівальним корпусом і нагрівальним циліндром було розміщено термоелектричні елементи, що мають однакову довжину (25,4 мм) і діаметри: 5,3 мм – ланцюг *N*-типу і 5,7 мм – ланцюг *P*-типу. 27 термоелектричних елементів розміщувались радіально в шести вертикальних рядах. Комутація по

гарячій стороні здійснювалась притиском термоелектричних елементів до комутаційного кільця, внутрішня поверхня якого була покрита окисом двоокисом алюмінію, який застосовувався в якості електроізоляції. Притискне зусилля кожного ланцюгу термоелектричного елемента становили біля $1 \text{ кГ (кгс)} = 9,80665 \text{ Н} \approx 10 \text{ Н}$ і забезпечувалось пружиною та регулювальним гвинтом. В якості ізоляції на холодних спаях було застосовано оксидне покриття, що наносилось на алюмінієві втулки, які було розміщено між термоелектричними елементами і притискними пружинами.

Весь простір, не зайнятий термоелектричними елементами, було заповнено тепловою ізоляцією, що запобігала розсіюванню енергії в оточуючий простір.

Як видно, 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 елементів, 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 [142, 143], однак проведення аналогічного моделювання для конструктивно нових термоелектричних модулів інколи може бути неможливим або складним і реалізувати його вдається з використанням чисельних методів розрахунку, які змістовно викладені в роботах [144, 147, 157] і роботах [146, 153, 154, 160]. 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 [155]. Електрообладнання водного транспорту даного типу має вагомі переваги в порівнянні зі звичайним 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.

Для опису термоелектричних процесів використовується потужний математичний апарат у вигляді системи диференціальних рівнянь. В загальному випадку основні рівняння для термоелектричних, термомагнітних і гальванотермомагнітних явищ щодо процесів розповсюдження тепла та електрики в кристалах наступні [142, 143]:

$$\left. \begin{aligned} E_i^* &= \rho_{ik} j_k + \alpha_{im} \frac{\partial T}{\partial x_m}, \\ q_l &= T \alpha_{kl} j_k - \chi_{lm} \frac{\partial T}{\partial x_m}, \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

де $E_i^* = -\frac{1}{e} \nabla_i \bar{\mu}$ – компонента напруженості електричного поля;

ρ_{ik} – компонента тензора питомого електроопору;

α_{kl} – компонента тензора термоЕРС;

q_l – компонента вектора густини теплового потоку;

j_k – компонента вектора густини електричного струму;

χ_{lm} – компонента тензора теплопроводності;

$\bar{\mu}$ – електрохімічний потенціал носіїв струму;

e – заряд носіїв струму;

x_m – декартові координати, індекси i, k, l, m пробігають значення 1, 2, 3, причому по двічі зустрічним індексам ведеться сумування.

В неізотермічному неоднорідному або анізотропному середовищі при наявності градієнта температури напруженість електричного поля E_i^* згідно першому рівнянню (1) містить не тільки омичну складову $\rho_{ik} j_k$, але також напруженість поля сторонніх сил неелектричної природи

$$E_i^* = \alpha_{im} \frac{\partial T}{\partial x_m}, \quad (2)$$

що називається термоелектричним полем.

ТермоЕРС в замкнутому контурі C згідно загальному визначенню ЕРС може бути представлена в вигляді:

$$E = \oint_C E_i^* dl = \oint_C \alpha_{im} \frac{\partial T}{\partial x_m} dx_i. \quad (3)$$

ТермоЕРС термоелектричного елемента можна представити наступним математичним виразом [143]:

$$E = \int_{T_2}^{T_1} (\alpha_1(T) - \alpha_2(T)) dT, \quad (4)$$

де α_1 , α_2 – коефіцієнти термоЕРС першого та другого матеріалів термоелектричного елемента відповідно;

T_1 , T_2 – температури гарячої і холодної комутаційних пластин відповідно.

Ефективність роботи термоелектричного елемента може бути оцінена величиною його ККД η та величиною добротності Z_0 [142, 143].

ККД термоелектричного елемента:

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \frac{\frac{m}{m+1}}{1 + \frac{\kappa_0 r}{\alpha^2} \frac{m+1}{T_1} - \frac{1}{2} \frac{T_1 - T_2}{T_1} \frac{1}{m+1}}, \quad (5)$$

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

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

$$m = \frac{R}{r} - \text{відношення опору зовнішнього навантаження } R \text{ до внутрішнього}$$

опору r термоелектричного елемента;

κ_0 – теплопровідність термоелектричного елемента.

Добротність Z_0 термоелемента залежить від термоелектричної добротної матеріалів його частин:

$$\sqrt{Z_0} = \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{\frac{\alpha_1}{\sqrt{Z_1}} + \frac{\alpha_2}{\sqrt{Z_2}}}, \quad (6)$$

$$\text{де } Z_1 = \frac{\alpha_1^2}{\rho_1 \kappa_1}, \quad Z_2 = \frac{\alpha_2^2}{\rho_2 \kappa_2} - \text{розрахункові коефіцієнти добротної};$$

ρ_1, ρ_2 і κ_1, κ_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 [143], вважаючи бокові поверхні віток адіабатично ізолюваними, холодні спаї термостатованими при температурі T_0 , а гарячим віддається тепло Q_w об'єкту, що підлягає розігріву, при температурі T_1 . Напрямок струму при термоелектричному нагріві протилежний напрямку струму при термоелектричному охолодженні; на робочому спаї теплоти Джоуля і Пельтьє додаються. Як і в охолоджувальних елементах, з достатньою для більшості випадків точністю 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:

$$Q_0 = (\alpha_1 - \alpha_2) T_0 I - \frac{1}{2} I^2 l \left(\frac{1}{\sigma_1 s_1} + \frac{1}{\sigma_2 s_2} \right) - \frac{T_1 - T_0}{l} (\chi_1 s_1 + \chi_2 s_2), \quad (7)$$

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

I – сила електричного струму;

l – довжина термоелемента;

σ_1, σ_2 – коефіцієнти електропровідності матеріалів віток термоелемента;

s_1, s_2 – площі поперечного перерізу матеріалів віток термоелемента;

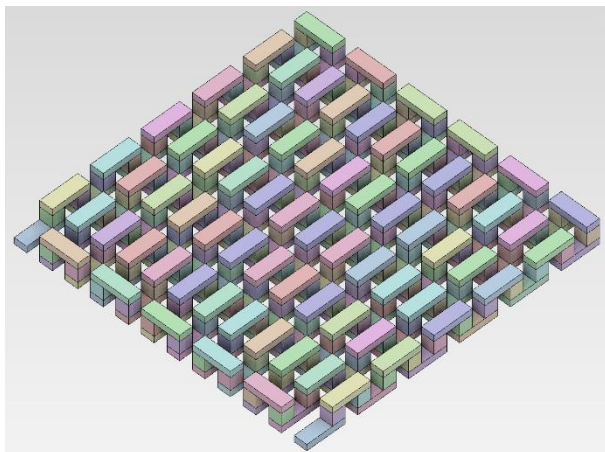
χ_1, χ_2 – коефіцієнти теплопровідності матеріалів віток термоелемента.

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

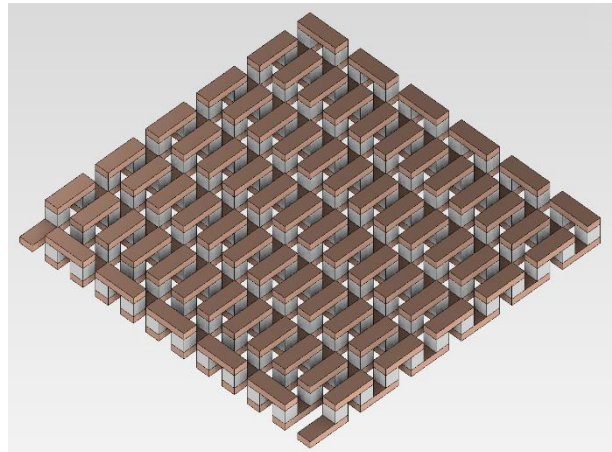
$$Q_w = (\alpha_1 - \alpha_2) T_1 I + \frac{1}{2} I^2 l \left(\frac{1}{\sigma_1 s_1} + \frac{1}{\sigma_2 s_2} \right) - \frac{T_1 - T_0}{l} (\chi_1 s_1 + \chi_2 s_2). \quad (8)$$

Моделювання термоелектричного модуля з класичною конструкцією.

Для виконання чисельного 3D-моделювання термоелектричного модуля для електрообладнання водного транспорту необхідно на першому етапі створити його точну геометричну 3D-модель. Слід зазначити, що геометричне моделювання є складовою математичного моделювання та використовується як на стадії проектування, так і в процесі розробки конструкторської документації в різних галузях промисловості.



a



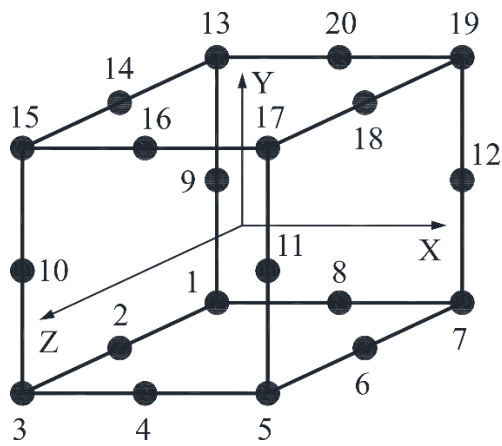
б

Рисунок 4. Геометрична (*a*) та реалістична (*б*) 3D-моделі термоелектричного модуля класичної конструкції з напівпровідниками з формою куба

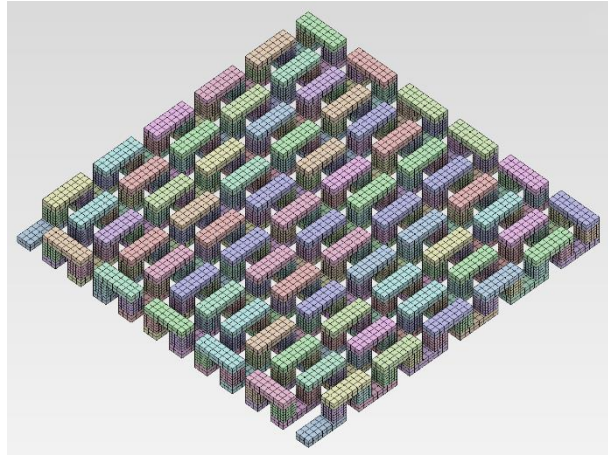
Далі, на другому етапі, необхідно створити розрахункову математичну 3D-модель термоелектричного модуля, яка містить дані про фізичні властивості всіх електротехнічних матеріалів. Створення математичної моделі проведено з урахуванням досвіду вирішення польових задач електротехніки та електроенергетики, викладених в [152]. На рис. 4 показано 3D-моделі термоелектричного охолоджувача вимірювального електроустаткування автоматичних систем.

Геометрична 3D-модель наведеного термоелектричного модуля складається з напівпровідникових матеріалів *P*- та *N*-типу, кожен напівпровідник має однакову форму куба з довжиною ребра 1 мм. Напівпровідникові матеріали *P*- та *N*-типу з'єднано по чергово між собою металевими контактними пластинами, що мають однакову форму паралелепіпедів розмірами $1 \times 0,5 \times 3$ мм. Перша та остання контактні металеві пластини представляють собою контактні виводи для під'єднання проводів електроживлення. Ланцюг з напівпровідникових елементів і їх металевих контактних пластин містить 71 *P*-*N*-перехід і представляє собою форму «П-подібної змійки», яку розміщено таким чином, що габаритні розміри спроектованого термоелектричного охолоджувача становили 23×23 мм при товщині 2 мм (без урахування товщини двох керамічних пластин ізоляційного корпусу). Реалістична 3D-модель термоелектричного модуля призначена для наочної візуалізації, а також містить потрібну для чисельного розрахунку інформацію про фізичні властивості електротехнічних матеріалів, що використано в моделі.

Перед проведенням чисельного розрахунку необхідно задати граничні умови щодо температури та електричного потенціалу. Вважалось, що температура зовнішніх поверхонь нагрітих контактних пластин була незмінною і становила 20 °C. Також, задано граничну умову про нульову величину електричного потенціалу на крайній торцевій поверхні останньої металевої контактної пластини.



a



б

Рисунок 5. Кубічний кінцевий елемент (*a*) та кінцево-елементна 3D- модель (*б*) термоелектричного охолоджувача

Чисельне вирішення 3D-задач, на третьому етапі, передбачає створення кінцево-елементної моделі, що потребує подолання суттєвих складностей при роботі з даними. До найбільш часто використовуваних кінцевих елементів відносять тетраедри, гексаедри, а також призматичні елементи. На рис. 5, *a* показано кубічний кінцевий елемент з двадцятьма вузлами. Функції форми визначаються різними формулами в залежності від розташування вузлів, які можуть знаходитись в вершинах або на сторонах, які паралельні осям [154, 157]. Вибір типу використовуваного елемента залежить перш за все від області фізики вирішуваної задачі.

В електротехніці і термодинаміці для врахування зміни констант при переході від одного середовища до іншого часто використовуються лагранжеві елементи. Кінцево-елементна 3D-модель термоелектричного охолоджувача (рис. 5, *б*) містить 281 просторовий об'єкт, в тому числі 143 контактні пластини, 71 напівпровідників *P*-типу та 71 напівпровідників *N*-типу. Число вузлів 158403 і число кінцевих елементів 24614 кінцево-елементної моделі потребувало значних обчислювальних потужностей.

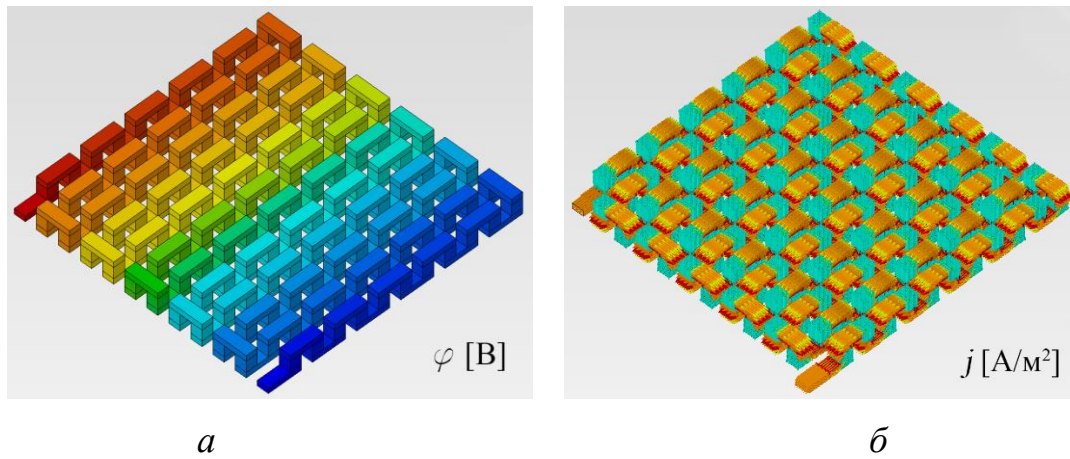


Рисунок 6. Картина розподілу електричного потенціалу $\varphi(x, y, z)$ (а) та густини струму $j(x, y, z)$ (б) по 3D-моделі термоелектричного модуля з мідними контактними пластинами при силі робочого струму 3 А (синій, блакитний кольори – мінімальні значення; зелений, жовтий кольори – середні значення; рудий, червоний кольори – максимальні значення)

Результати розрахунку містять дані про картину розподілу електричного потенціалу $\varphi(x, y, z)$ (рис. 6, а) та густини струму $j(x, y, z)$ (рис. 6, б) по 3D-моделі термоелектричного охолоджувача з мідними контактними пластинами при силі постійного струму 3 А. При цьому електричний потенціал φ розподілено по 3D-моделі термоелектричного охолоджувача в діапазоні від 0 до приблизно 6,2 В (рис. 6, а). З рис. 6, б видно, що найбільша густина струму $j = 7,2 \cdot 10^6$ А/м² спостерігається в металевих контактних пластинах між напівпровідниками *P*-типу та *N*-типу та на крайніх контактних пластинах, це пояснюється геометрією спроектованого термоелектричного охолоджувача.

На рис. 7, а проілюстровано картину розподілу електричного поля по 3D-моделі термоелектричного охолоджувача з мідними контактними пластинами при силі постійного струму 3 А. При цьому максимальна величина напруженості електричного поля $E = 51,7$ В/м спостерігається в напівпровідникових матеріалах термоелектричного охолоджувача.

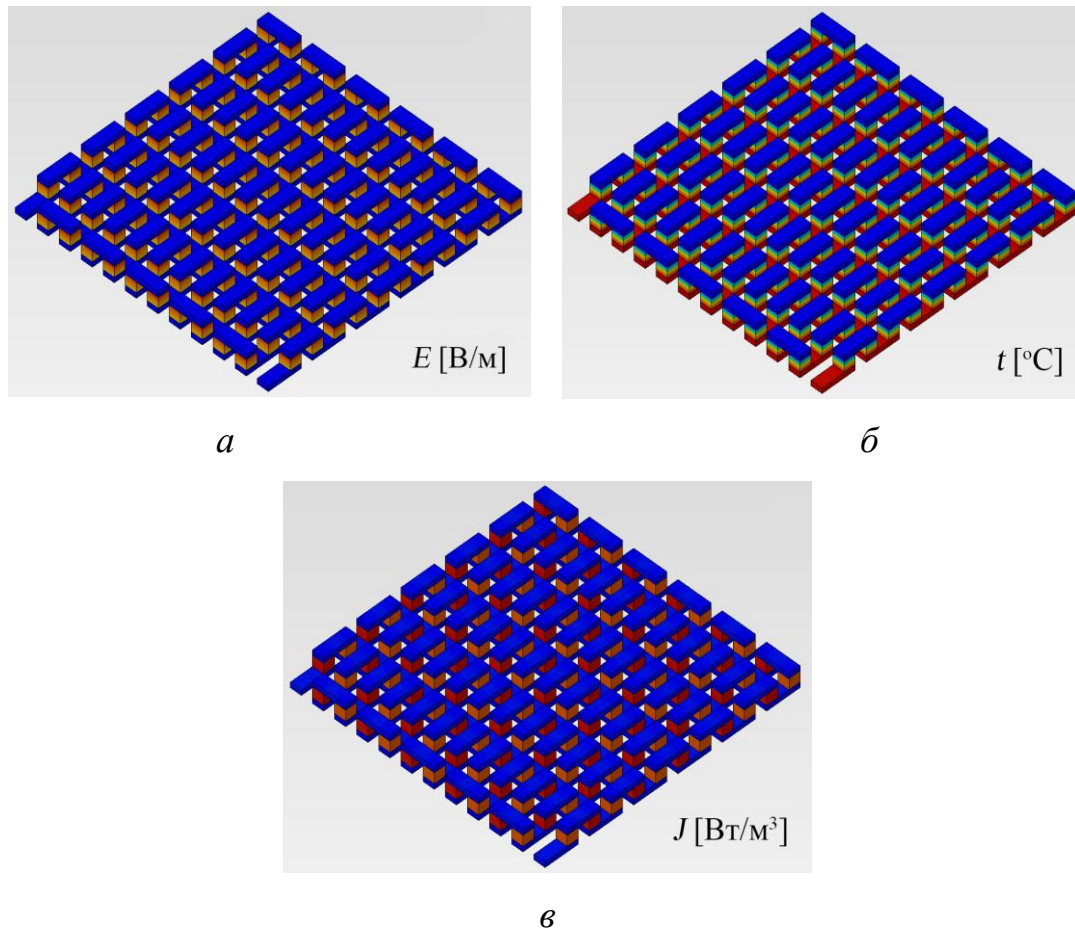


Рисунок 7. Картина розподілу електричного поля $E(x, y, z)$ (*a*), стаціонарного теплового поля $t(x, y, z)$ (*б*), резистивного нагріву $J(x, y, z)$ (*в*) по 3D-моделі термоелектричного охолоджувача з мідними контактними пластинами при силі робочого струму 3 А (синій, блакитний кольори – мінімальні значення; зелений, жовтий кольори – середні значення; рудий, червоний кольори – максимальні значення)

Картину розподілу стаціонарного теплового поля $t(x, y, z)$ по 3D-моделі термоелектричного охолоджувача приведено на рис. 7, *б*. Слід зазначити, що чисельні розрахунки температурного поля термоелектричного охолоджувача проводились в адіабатичному режимі. Таким чином, оцінювалась верхня межа для температури без урахування конвекції та теплового випромінювання, а, отже, отримана картина температурного поля відповідає більш напруженому режиму роботи термоелектричного охолоджувача.

На рис. 7, в наведено картину розподілу резистивного нагріву $J(x, y, z)$ по 3D-моделі термоелектричного охолоджувача з мідними контактними пластинами при силі постійного струму 3 А. Максимальний резистивний нагрів спостерігається в напівпровідниках і становить $J = 9,5 \cdot 10^7$ Вт/м³.

На основі отриманої чисельної 3D-математичної моделі термоелектричного охолоджувача вимірювального електроустаткування автоматичних систем побудовано графіки залежностей $t(I)$ (рис. 8, а) температури t від сили постійного струму I при його варіаціях від 0 до 3 А при застосуванні різних металів в якості матеріалу контактних пластин. Як видно з графіка (рис. 8, а), в діапазоні струму від нуля до значення 0,8 А температурні криві для всіх матеріалів контактних пластин співпадають, в діапазоні струмів понад 0,8 А криві різні. Слід зазначити, що найбільший термоелектричний ефект охолодження досягнуто при використанні контактних пластин з міді (крива 1 на рис. 8, а). При силі постійного струму 3 А зовнішня поверхня холодних контактних пластин з міді охолоджується до температури -47,6 °С. Значення температури охолодження для зовнішніх поверхонь контактних пластин з алюмінію (крива 2 на рис. 8, а) та нікелю (крива 3 на рис. 8, а) при силі струму 3 А становлять відповідно -47,5 °С і -47 °С.

Температура зовнішніх поверхонь контактних пластин з титану (крива 4 на рис. 8, а), сталі (крива 5 на рис. 8, а) та вісмуту (крива 6 на рис. 8, а) при силі струму 3 А становлять відповідно -42,2 °С, -41,1 °С, -33,8 °С. Аналізуючи отримані результати, можна зробити висновок про недоцільність застосування перелічених матеріалів в якості контактних пластин, оскільки ефективність термоелектричного охолоджувача в разі їх застосування значно зменшується. В порівняння з міддю при застосуванні вісмуту при однаковій силі струму 3 А в обох випадках температура зовнішніх поверхонь контактних пластин буде меншою на 13,8 °С.

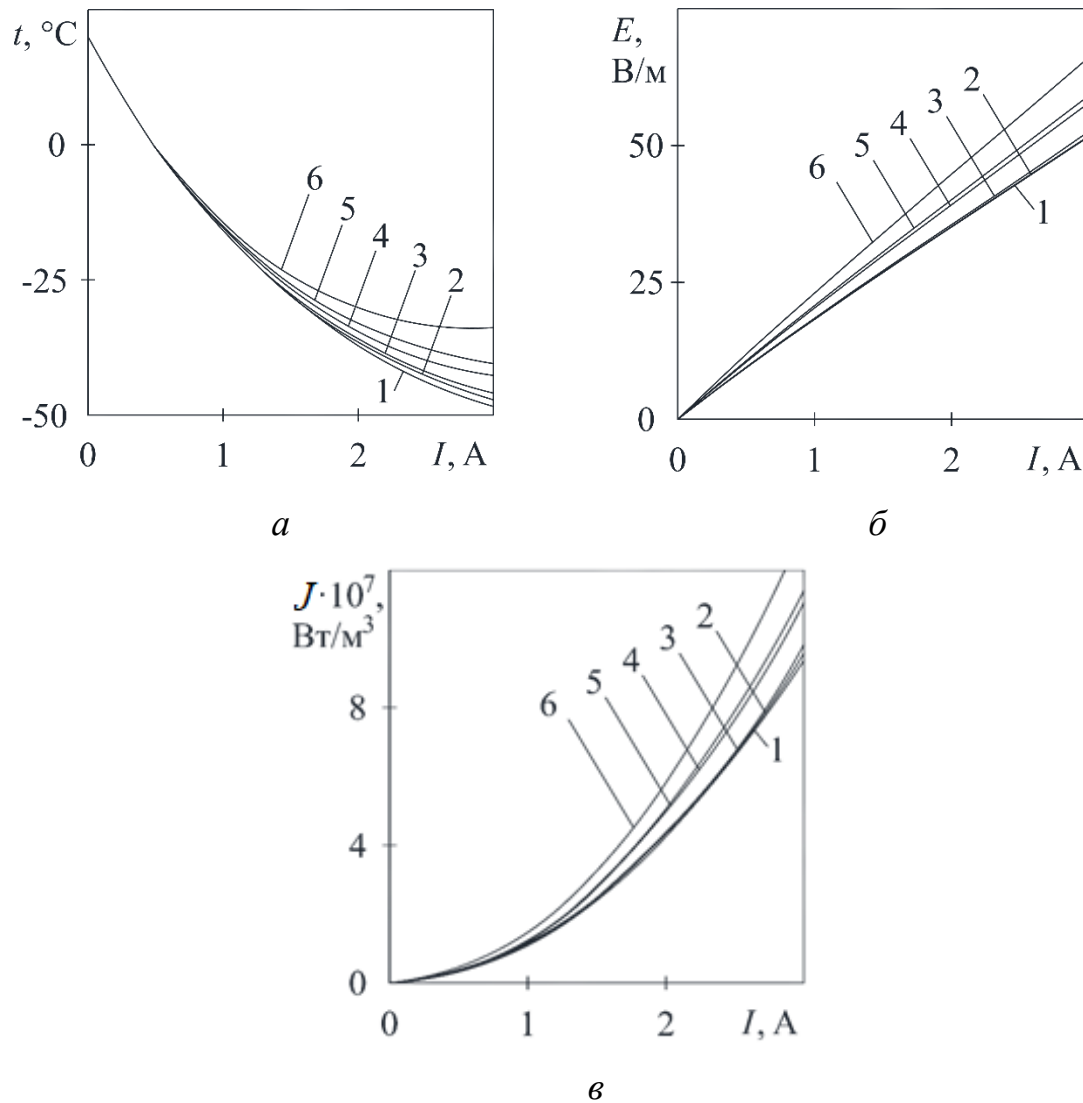


Рисунок 8. Графіки залежностей температури $t(I)$ на зовнішній поверхні охолоджених контактних пластин (*a*), напруженості $E(I)$ електричного поля (*б*) та резистивного нагріву $J(I)$ (*в*) від сили постійного струму I через термоелектричний модуль: 1 – для мідних пластин; 2 – для алюмінієвих пластин; 3 – для нікелевих пластин; 4 – для титанових пластин; 5 – для сталевих пластин; 6 – для вісмутових пластин

Залежності $E(I)$ максимальної напруженості E електричного поля в напівпровідниках від сили постійного струму I при його варіаціях від 0 до 3 А при застосуванні різних металів в якості матеріалу контактних пластин показано на рис. 8, *б*. З графіка видно, що ці залежності є лінійними, максимум

напруженості електричного поля в напівпровідниках становить $E = 66$ В/м при силі струму $I = 3$ А і застосуванні контактних пластин з вісмуту.

На рис. 8, в представлено залежності $J(I)$ резистивного нагріву J в напівпровідниках від сили постійного струму I при його варіаціях від 0 до 3 А при застосуванні різних металів в якості матеріалу контактних пластин. Найбільший резистивний нагрів $J = 1,323 \cdot 10^8$ Вт/м³ спостерігається при силі струму $I = 3$ А і застосуванні контактних пластин з вісмуту.

Таким чином, створено чисельну математичну 3D-модель термоелектричного охолоджувача з габаритними розмірами 23×23 мм.

Отримано картини розподілу електричного потенціалу $\varphi(x, y, z)$, густини струму $j(x, y, z)$, напруженості електричного поля $E(x, y, z)$, стаціонарного температурного поля $t(x, y, z)$ та резистивного нагріву $J(x, y, z)$ по 3D-моделі термоелектричного охолоджувача з мідними контактними пластинами при силі струму $I = 3$ А. При цьому картина стаціонарного температурного поля підтверджує ефективність роботи термоелектричного охолоджувача, різниця між нагрітою та охолодженою поверхнями термоелектричного охолоджувача досягла $27,6$ °С.

Досліджено вплив матеріалу металевих контактних пластин між напівпровідниками P -типу та N -типу на ефективність термоелектричного охолодження. Встановлено, що найбільша ефективність досягається при використанні контактних пластин з міді, а найменша ефективність при використанні вісмутівих пластин. Побудовано відповідні залежності для температури $t(I)$, напруженості $E(I)$ електричного поля та резистивного нагріву $J(I)$ від сили постійного струму I при його варіаціях від 0 до 3 А.

Моделювання термоелектричних елементів з різною геометричною формою напівпровідникового матеріалу. Подібне моделювання зручно провести чисельним методом на основі заздалегідь створених математичних моделей. Порівнянню між собою полягали термоелектричні елементи з

напівпровідниковим матеріалом у формі куба, циліндра, усіченої піраміди, двох усічених пірамід.

Об'єм і висота геометричних тіл напівпровідникового матеріалу різної форми в кожному розглядуваному випадку взято сталими і рівними 8 мм^2 і 2 мм відповідно. Фактично, при порівнянні не змінювалась матеріалоемність напівпровідникового матеріалу, а лише форма тіла, яким він представлений.

Термоелектричні елементи з напівпровідниковим матеріалом у формі куба (рис. 9).

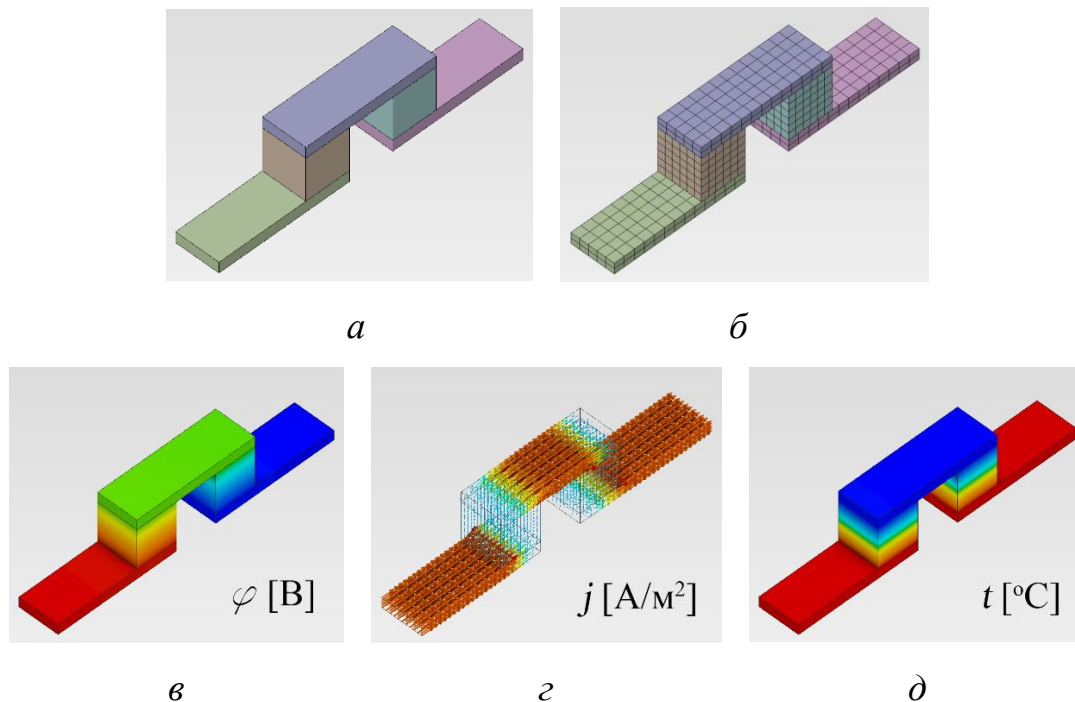


Рисунок 9. Термоелектричні елементи з напівпровідниковим матеріалом у формі куба: *а, б* – відповідно геометрична та розрахункова моделі; *в, г, д* – результати розподілу величин при робочому струмі 1 А (синій, блакитний кольори – мінімальні значення; зелений, жовтий кольори – середні значення; рудий, червоний кольори – максимальні значення)

Геометрична (рис. 9, *а*) та кінцево-елементна (рис. 9, *б*) моделі термоелектричних елементів з напівпровідниковим матеріалом у формі куба. Результати розрахунку представлено на рис. 9, *в-г*.

За результатами розрахунку (рис. 9, в-д) встановлено, що при протіканні постійного струму 1 А електричний потенціал розподілено від 0 до 0,017 В, густина струму розподілена від 0 до $1,073 \cdot 10^6$ А/м², а температура від 0 до -18,828 °С.

Термоелектричні елементи з напівпровідниковим матеріалом у формі циліндра (рис. 10).

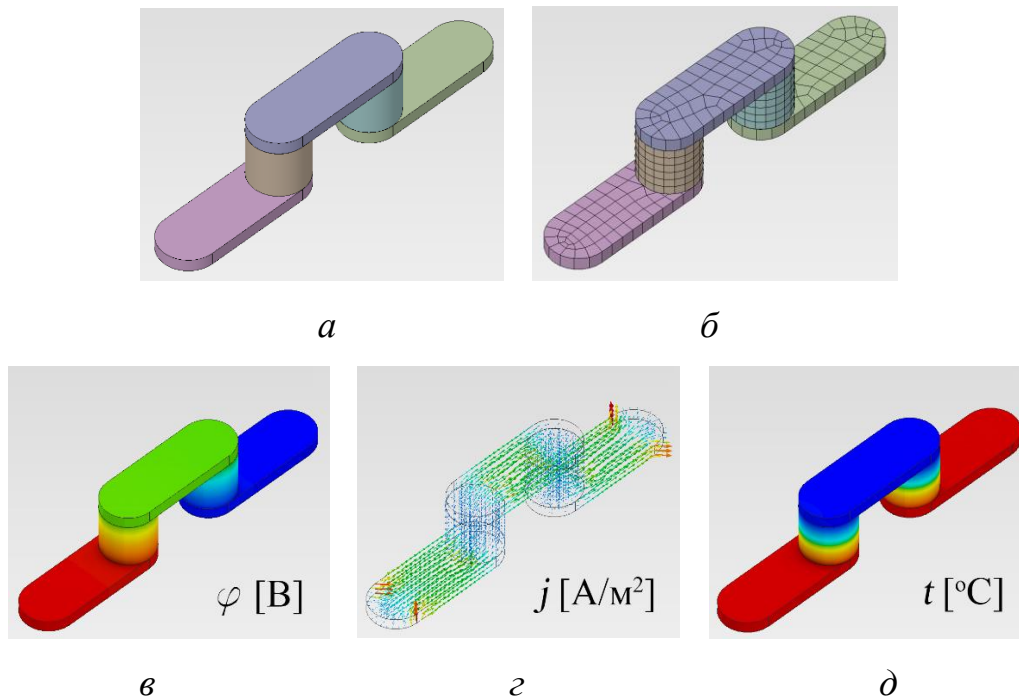


Рисунок 10. Термоелектричні елементи з напівпровідниковим матеріалом у формі циліндра: *a*, *б* – відповідно геометрична та розрахункова моделі; *в*, *г*, *д* – результати розподілу величин при робочому струмі 1 А (синій, блакитний кольори – мінімальні значення; зелений, жовтий кольори – середні значення; рудий, червоний кольори – максимальні значення)

Геометрична (рис. 10, *a*) та кінцево-елементна (рис. 10, *б*) моделі термоелектричних елементів з напівпровідниковим матеріалом у формі циліндра.

За результатами розрахунку (рис. 10, в-д) встановлено, що при протіканні постійного струму 1 А електричний потенціал розподілено від 0 до 0,017 В,

густина струму розподілена від 0 до $1,781 \cdot 10^6$ А/м², а температура від 0 до -18,837 °С.

Порівнюючи дані результати для форми циліндра з попередніми результатами для форми куба можна зазначити, що значення температури практично однакові в обох випадках. Тобто ефективність використання термоелектричного ефекту в обох випадках однакова.

Термоелектричні елементи з напівпровідниковим матеріалом у формі усіченої піраміди (рис. 11).

Геометрична (рис. 11, *а*) та кінцево-елементна (рис. 11, *б*) моделі термоелектричних елементів з напівпровідниковим матеріалом у формі усіченої піраміди.

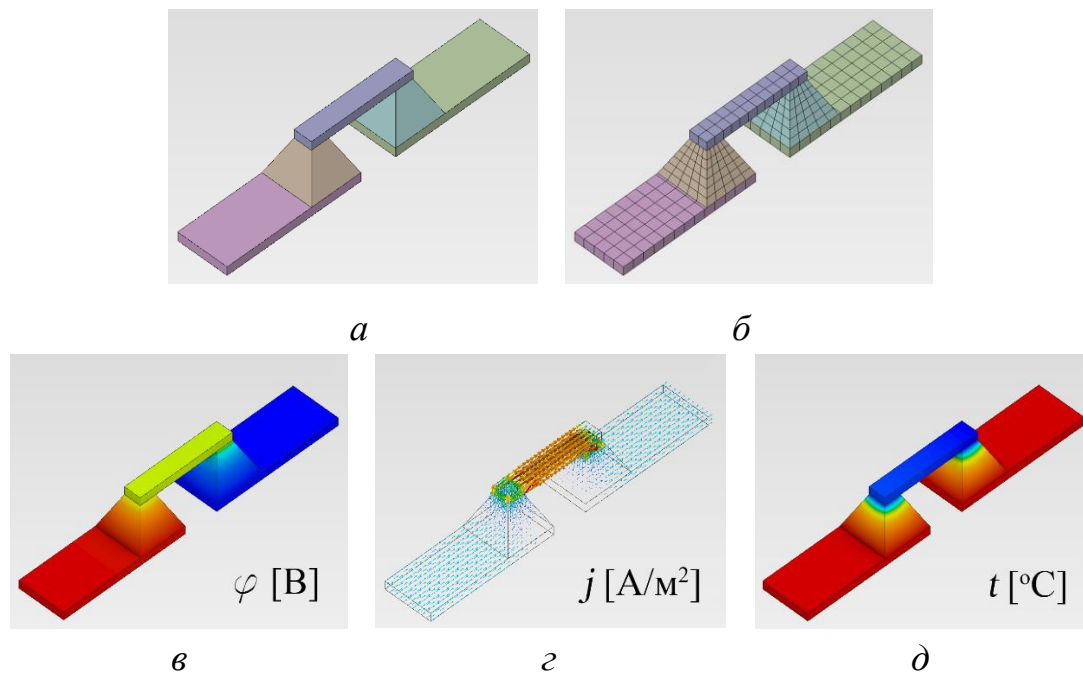


Рисунок 11. Термоелектричні елементи з напівпровідниковим матеріалом у формі усіченої піраміди: *а*, *б* – відповідно геометрична та розрахункова моделі; *в*, *г*, *д* – результати розподілу величин при робочому струмі 1 А (синій, блакитний кольори – мінімальні значення; зелений, жовтий кольори – середні значення; рудий, червоний кольори – максимальні значення)

За результатами розрахунку (рис. 11, в-д) встановлено, що при протіканні постійного струму 1 А електричний потенціал розподілено від 0 до 0,019 В, густина струму розподілена від 0 до $2,41 \cdot 10^6$ А/м², а температура від 0 до -14,406 °С.

Зазначимо, що значення температури охолодження зменшилось в порівнянні з двома попередніми випадками. Дану форму не слід використовувати в конструкція термоелектричних модулів, тому що ефективність використання термоелектричного ефекту зменшується.

Термоелектричні елементи з напівпровідниковим матеріалом у формі двох усічених пірамід (рис. 12).

Геометрична (рис. 12, а) та кінцево-елементна (рис. 12, б) моделі термоелектричних елементів з напівпровідниковим матеріалом у формі двох усічених пірамід.

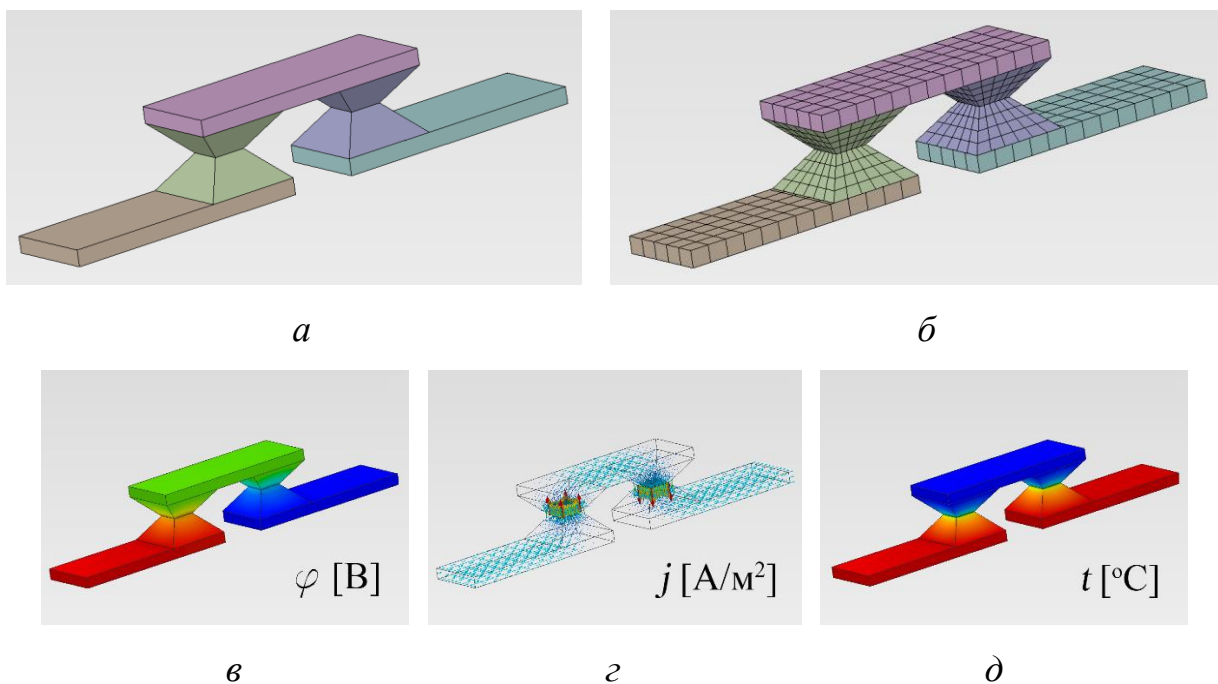


Рисунок 12. Термоелектричні елементи з напівпровідниковим матеріалом у формі двох усічених пірамід: а, б – відповідно геометрична та розрахункова моделі; в, г, д – результати розподілу величин при робочому струмі 1 А (синій, блакитний кольори – мінімальні значення; зелений, жовтий кольори – середні значення; рудий, червоний кольори – максимальні значення)

За результатами розрахунку (рис. 12, в-д) встановлено, що при протіканні постійного струму 1 А електричний потенціал розподілено від 0 до 0,03 В, густина струму розподілена від 0 до $2,32 \cdot 10^6$ А/м², а температура від 0 до -30,48 °С. З результатів розрахунку видно, що форма напівпровідникового матеріалу у вигляді двох усічених пірамід значно покращує ефективність використання термоелектричного ефекту.

На основі отриманих результатів можна скласти узагальнюючу порівняльну таблицю 1 щодо ефективності використання термоелектричного ефекту при застосуванні різних форм напівпровідникового матеріалу в термоелектричних елементах.

Таблиця 1

Порівняльна таблиця ефективності використання термоелектричного ефекту при різній формі напівпровідникового матеріалу

Форма напівпровідникового матеріалу / Параметр	Куб	Циліндр	Усічена піраміда	Дві усічені піраміди
Сила постійного струму, А	1	1	1	1
Температура охолодження, °С	-18,828	-18,837	-14,406	-30,48

Проводячи порівняльний аналіз, встановлено, що використання форми куба і циліндра не впливає в значній мірі на величину термоелектричного ефекту, оскільки температура охолодження майже однакова в обох випадках і становить -18,8 °С. При використанні форми усіченої піраміди термоелектричний ефект навіть зменшується до -14,4 °С, тому використання даної форми не є виправданим. Найцікавішим отриманим результатом є використання напівпровідників з формами у вигляді двох усічених пірамід, при цьому ефективність термоелектричного елемента значно покращується, оскільки температура охолодження становить -30,5 °С, тобто на 11,7 °С нижча в порівнянні з формами куба і циліндра.

Таким чином, було створено та розраховано математичні моделі термоелектричних елементів з різною геометричною формою напівпровідникового матеріалу: з формою куба, з формою циліндра, з формою усіченої піраміди, з формою двох усічених пірамід. Об'єм напівпровідникового матеріалу 8 мм^2 та його висота 2 мм , тобто відстань між контактними пластинами в усіх моделях є однаковою. Фактично, всі розглядувані моделі є однаковими по матеріалоемності. Для розрахунку математичних моделей використовувався метод скінченних елементів.

На основі створених математичних моделей термоелектричних елементів з різною геометричною формою напівпровідникового матеріалу отримано основні електричні та теплові параметри. Порівняльний аналіз отриманих робочих параметрів дав змогу обрати найефективніші типи форм напівпровідникового матеріалу для підвищення ефективності використання термоелектричного ефекту Пельтьє.

Результати розрахунку при пропусканні сили постійного струму 1 А виявились наступними. Форми куба та циліндра для напівпровідникового матеріалу дають практично однакову ефективність використання термоелектричного ефекту, при цьому охолодження майже однакове і становить $-18,8 \text{ }^\circ\text{C}$. Форма усіченої піраміди для напівпровідникового матеріалу виявилась неефективною, оскільки ефективність використання термоелектричного ефекту зменшилась, температура охолодження становила $-14,4 \text{ }^\circ\text{C}$. Форма у вигляді двох усічених пірамід показала найкращі серед порівнюваних зразків результати ефективності використання термоелектричного ефекту Пельтьє, температура охолодження становила $-30,5 \text{ }^\circ\text{C}$, що на $11,7 \text{ }^\circ\text{C}$ нижче ніж при формі куба або циліндра.

На основі проведеного моделювання та порівняльного аналізу термоелектричних елементів з різною формою геометрії напівпровідникового матеріалу слід рекомендувати до практичного застосування змінити форми куба та циліндра на форми у вигляді двох усічених пірамід. Така конструкція

термоелектричних елементів забезпечить підвищення ефективності використання термоелектричного ефекту Пельтьє.

Моделювання термоелектричних модулів з різною геометричною формою напівпровідників. Було розглянуто термоелектричні модулі з напівпровідниками з формою куба, з формою куба з наскрізним квадратним отвором, з формою двох усічених пірамід, з формою куба з двома виїмками, з формою окремих кубоїдів [151].

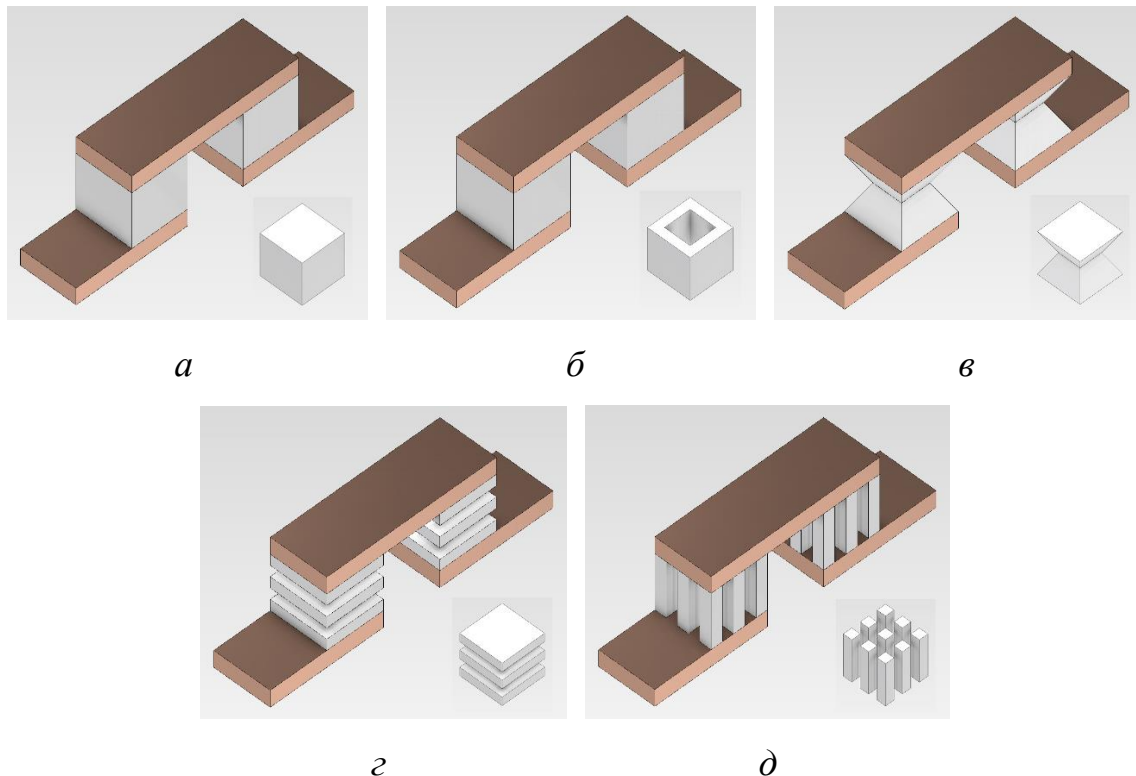


Рисунок 13. Конструкції термоелектричних елементів з різними геометричними формами напівпровідників, на основі яких сформовано термоелектричні модулі електрообладнання транспорту: напівпровідники з формою куба (а); напівпровідники з формою куба з наскрізним квадратним отвором (б); напівпровідники з формою двох усічених пірамід (в); напівпровідники з формою куба з двома виїмками (г); напівпровідники з формою окремих кубоїдів (д)

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. 13): 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 $2,5 \times 2,5$ 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 $1 \times 1 \times 5$ 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.

За базову 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 [150].

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 $5 \times 15 \times 1,5$ 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. 14), кожна з яких була розрахована чисельним методом.

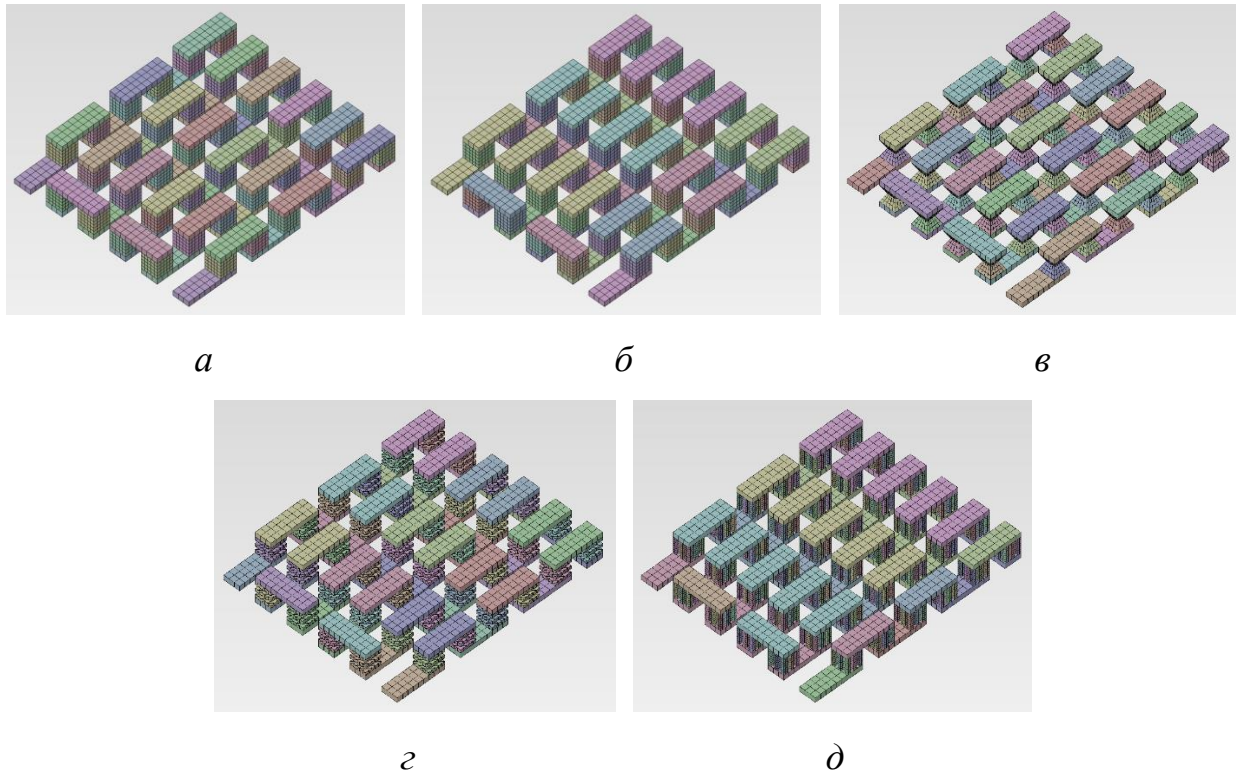


Рисунок 14. Розрахункові кінцево-елементі моделі термоелектричних модулів з різними геометричними формами напівпровідників: напівпровідники з формою куба (*а*); напівпровідники з формою куба з наскрізним квадратним отвором (*б*); напівпровідники з формою двох усічених пірамід (*в*); напівпровідники з формою куба з двома виїмками (*г*); напівпровідники з формою окремих кубоїдів (*д*)

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°C . Зовнішні поверхні термоелектричних модулів вважались адіабатично теплоізованими, тобто

моделювання термоелектричних модулів проводилось в більш напруженому режимі їх роботи. Значення термоелектричних коефіцієнтів, коефіцієнтів електро- та теплопровідності для всіх п'яти математичних моделей приймалися однаковими.

Перша, друга, третя та четверта кінцево-елементні моделі термоелектричних модулів (рис. 14, *а-г*) містили 81 просторовий об'єкт, в тому числі 20 напівпровідників *P*-типу і 20 напівпровідників *N*-типу, а також 41 комутаційну пластину [151]. П'ята кінцево-елементна модель термоелектричного модуля (рис. 14, *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. 14, *а*) налічувала 40572 вузли і 6107 кінцевих елементів, друга модель (рис. 14, *б*) містила 35932 вузли і 4307 кінцевих елементів, третя модель (рис. 14, *в*) включала 45852 вузли і 7107 кінцевих елементів, четверта модель (рис. 14, *г*) охоплювала 59726 вузлів і 25345 кінцевих елементів, п'ята модель (рис. 14, *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. 15-16. На рис. 15 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 .

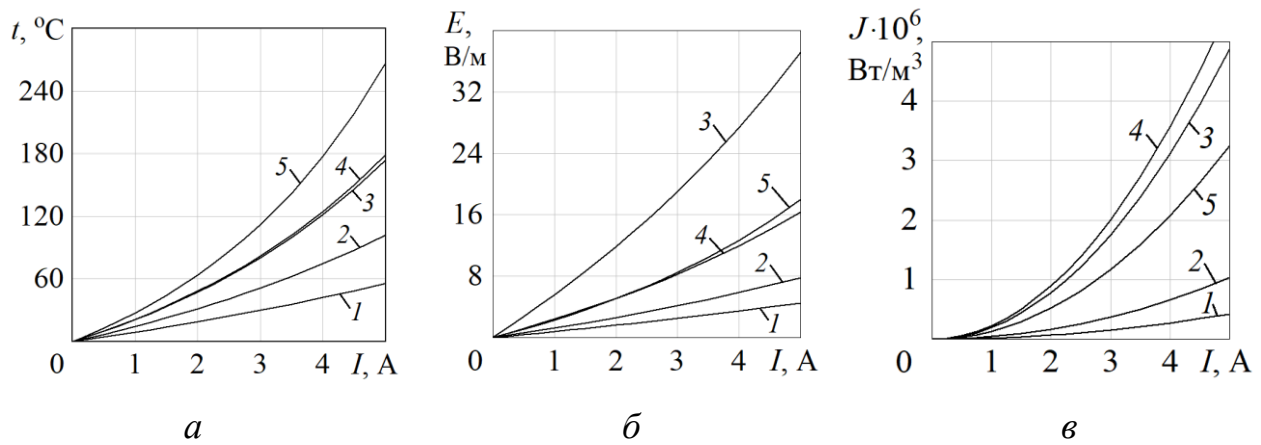


Рисунок 15. Графіки залежностей температури $t(I)$ (*a*), напруженості електричного поля $E(I)$ (*б*) та омичного (джоулевого) нагріву $J(I)$ (*в*) від сили робочого струму I , що проходить через термоелектричний модуль електрообладнання транспорту: 1 – для класичної конструкції напівпровідників у формі 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

Свідченням підвищення термоелектричного ефекту в термоелектричних модулях є підвищені значення температури на стороні гарячих комутаційних пластин. Аналіз графіка на рис. 15, *a* 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. 15, *a*) 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. 15) відображають її верхні 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 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$.

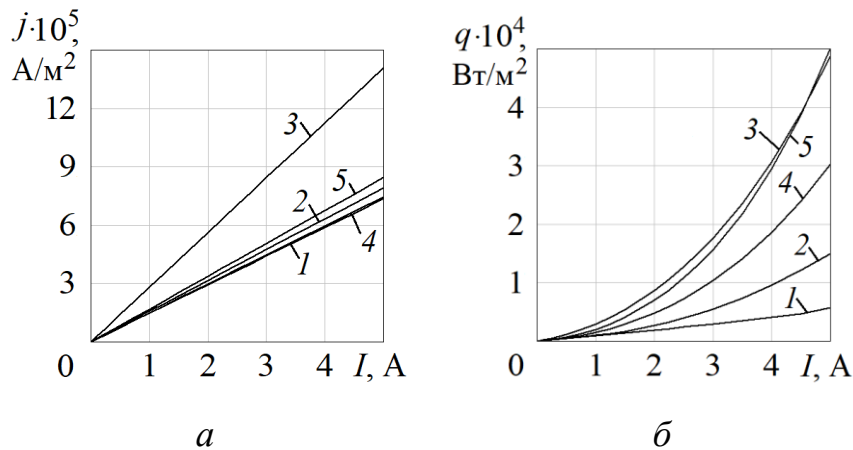


Рисунок 16. Графіки залежностей густини електричного струму $j(I)$ (а) та густини теплового потоку $q(I)$ (б) від сили робочого струму I , що проходить через термоелектричний модуль електрообладнання транспорту: 1 – для класичної конструкції напівпровідників у формі куба; 2 – для конструкції напівпровідників 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

На рис. 15, 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. 15, 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. 16, а) характерні для термоелектричного модуля з напівпровідниками в формі усічених пірамід (крива 3), а найбільші значення густини теплового потоку (рис. 16, б) в термоелектричному модулі з напівпровідником у формі усічених пірамід (крива 3) і у формі окремих кубоїдів (крива 5).

На основі проведеного порівняльного аналізу робочих характеристик п'яти термоелектричних модулів з різною геометричною формою напівпровідників отримано конкретні дані, які можуть виявитись корисними при виборі конкретної найбільш оптимальної конструкції термоелектричного модуля для підвищення ефективності електрообладнання транспорту в конкретних експлуатаційних режимах.

Таким чином, було створено п'ять математичних моделей термоелектричних модулів з однаковими загальними габаритними розмірами 55×65 мм та висотою 8 мм, що складались з ланцюга 20-ти послідовного з'єднаних «П-подібною змійкою» та однаково розміщених в просторі термоелементів. Створені моделі відрізнялись між собою геометричними формами напівпровідників: напівпровідники 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 $2,5 \times 2,5$ 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 $1 \times 1 \times 5$ 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 (джоулевого) 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.

Термоелектричний модуль з компенсованими комутаційними пластинами. Дослідження термоелектричного модуля з компенсованими комутаційними пластинами є актуальними через виникнення термічних напружень внаслідок лінійних розширень в матеріалах при нагріванні [148, 149, 158]. Термічні напруження можуть бути причиною виходу з електротехнічних установок, що є особливо не бажаним в суднових умовах [155].

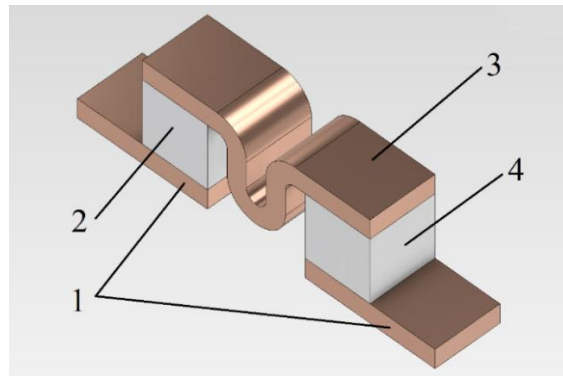


Рисунок 17. Термоелектричний елемент з компенсованою комутаційною пластиною: 1 – комутаційні пластини; 2, 4 – напівпровідники; 3 – компенсована комутаційна пластина

Термоелектричний модуль з компенсованими комутаційними пластинами конструктивно складається з ланцюгів послідовно з'єднаних між собою

термoeлектричних елементів. Конструкцію термoeлектричного елемента з компенсованою комутаційною пластиною показано на рис. 17.

Термoeлектричний елемент з компенсованою комутаційною пластиною (рис. 17) складається зі звичайних мідних комутаційних пластин 1 на холодній стороні термoeлемента, з напівпровідника *N*-типу 2, з компенсованої мідної комутаційної пластини 3, що має вигин, а також з напівпровідника *P*-типу 4. Напівпровідники *N*- та *P*-типу геометрично представляють собою форму куба з довжиною ребра 5 мм. Мідні комутаційні пластини мають товщину 1,5 мм.

Причини виникнення термічних напружень в термoeлектричних елементах пов'язані з необхідністю застосування в них електротехнічних матеріалів, які повинні мати достатньо високу тепло- та електропровідність, що в свою чергу призводить до більшого коефіцієнта лінійного розширення [155, с. 17]. Зазначені властивості ще більше посилюють вплив температурних розширень на стороні гарячих комутаційних пластин термoeлектричних елементів. При невеликих перепадах температур в термoeлектричних охолоджувальних пристроях і теплових насосах для уникнення термічних напружень іноді виявляється достатнім використовувати компенсаційні елементи на гарячих комутаційних пластинах [155].

Креслення термoeлектричного елемента з компенсованою комутаційною пластиною, яке містить дані про його основні лінійні та радіальні розміри наведено на рис. 18.

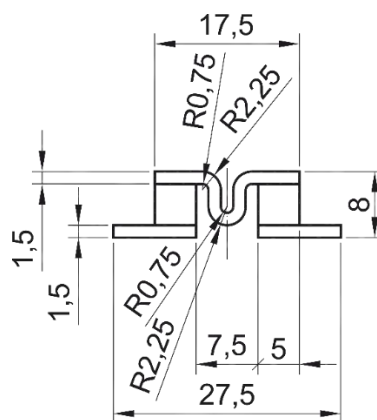


Рисунок 18. Креслення термoeлектричного елемента з компенсованою комутаційною пластиною

Далі в дослідженні було створено термоелектричний модуль з компенсованими комутаційними пластинами з габаритними розмірами $55 \times 62,5$ мм (рис. 19), який складається в 18-ти термоелектричних елементів (рис. 17-18). З урахуванням довжини крайніх контактних пластин габаритні розміри спроектованого термоелектричного модуля становлять $55 \times 67,5$ мм.

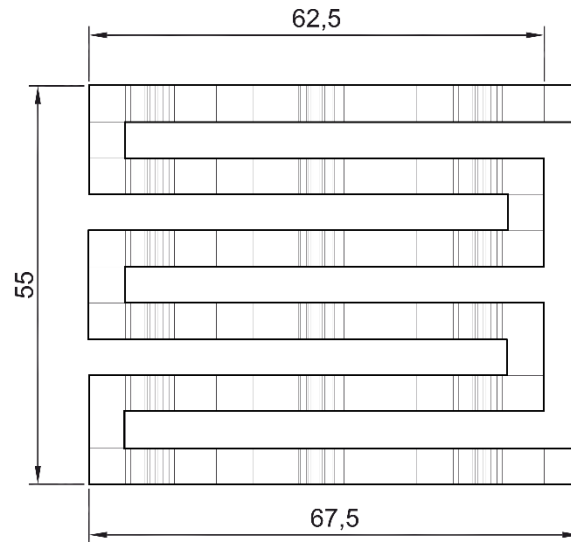


Рисунок 19. Габаритні розміри спроектованого термоелектричного модуля з компенсованими комутаційними пластинами

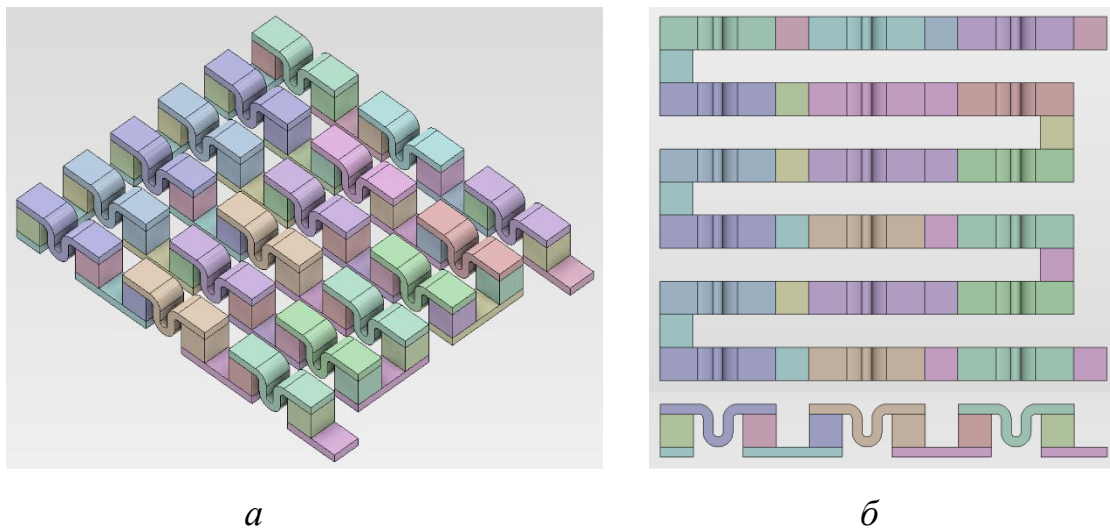
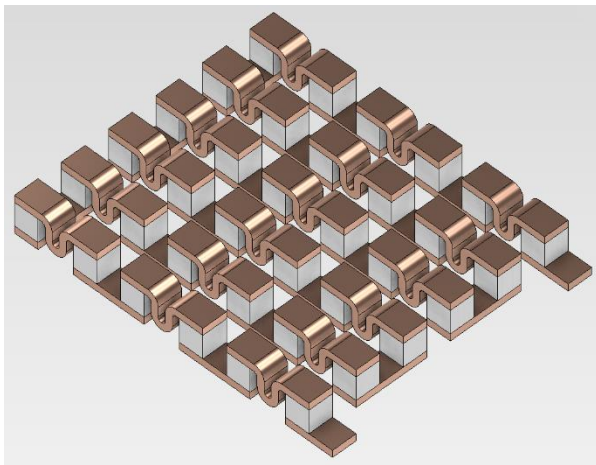


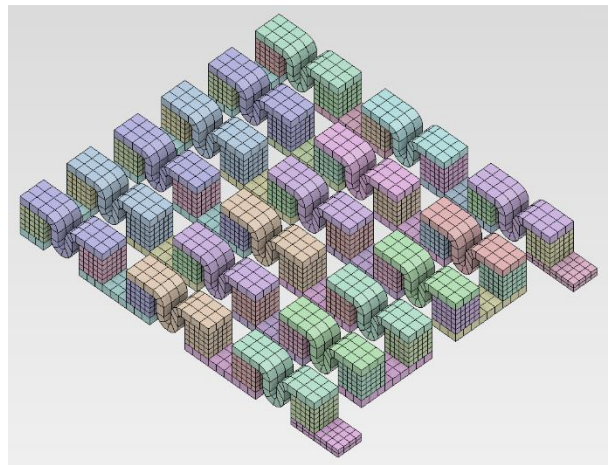
Рисунок 20. Геометрична модель термоелектричного модуля з компенсованими комутаційними пластинами: *а* – 3D-модель; *б* – вигляд зверху (П-подібна змійка) та вигляд збоку

На рис. 20, *а* наведено геометричну модель термоелектричного модуля з компенсованими комутаційними пластинами, а на рис. 20, *б* показано вигляд зверху та вигляд збоку на той самий термоелектричний модуль.

Геометрична 3D-модель термоелектричного модуля з компенсованими комутаційними пластинами (рис. 20, *а*) може бути візуалізована з урахуванням обраних електротехнічних матеріалів (рис. 21, *а*) та розбита на окремі розрахункові елементи (рис. 21, *б*), далі її можна розрахована чисельно з використанням одного з так званих «сіткових» методів розрахунку [147, 157].



а



б

Рисунок 21. Візуалізована модель та розрахункова кінцево-елементна модель термоелектричного модуля з компенсованими комутаційними пластинами

Результати розрахунку термоелектричного модуля з компенсованими комутаційними пластинами можна представити в зручній графічній формі у вигляді картин розподілу основних електричних і теплових величин, а також у вигляді різниці температур Δt між гарячими і холодними комутаційними пластинами від сили постійного струму I , що проходить через ланцюг термоелектричного модуля у вигляді функціональної залежності.

Результати розрахунку термоелектричного модуля з компенсованими комутаційними пластинами на базі методу скінченних елементів показано на рис. 22-24. В якості граничних умов розрахунку було прийнято нульовий потенціал (0 В) торцевої поверхні останньої комутаційної пластини на холодній стороні термоелектричного модуля, та нульове значення температури (0 °С) нижніх поверхонь комутаційних пластин на холодній стороні термоелектричного модуля. Розрахунок проводився з урахування розсіювання теплоти в оточуюче середовище з зовнішніх поверхонь компенсованих комутаційних пластин на гарячій стороні термоелектричного модуля.

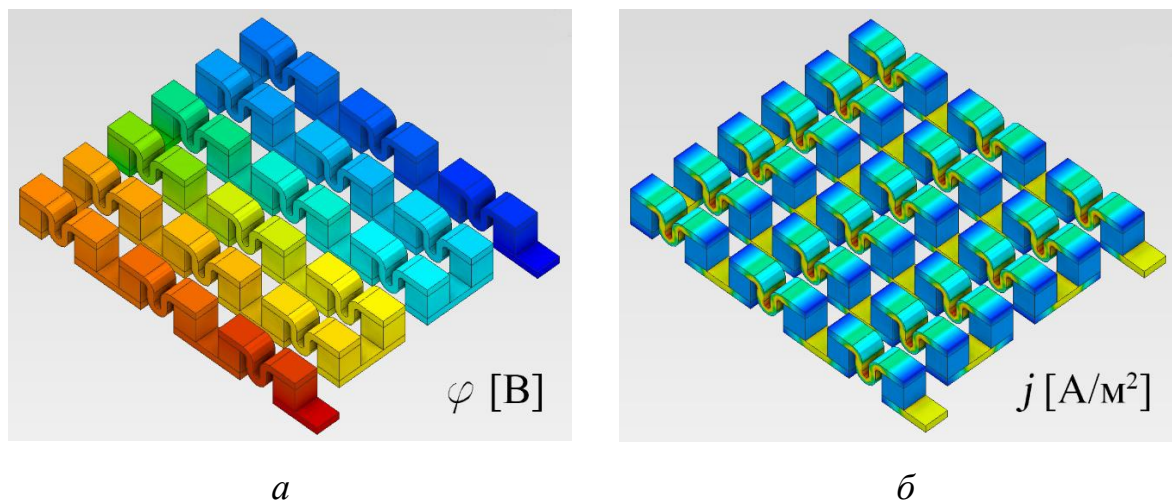


Рисунок 22. Розподіл електричного потенціалу φ [В] та густини струму j [А/м²] по 3D-моделі термоелектричного модуля з компенсованими комутаційними пластинами при силі робочого струму 1,5 А (синій, блакитний кольори – мінімальні значення; зелений, жовтий кольори – середні значення; рудий, червоний кольори – максимальні значення)

Розподіл електричного потенціалу (рис. 22, а) при силі постійного струму 1,5 А, що проходить через ланцюг термоелектричного модуля, становить від 0 до 0,2 В. Розподіл густини струму (рис. 22, б) при силі постійного струму 1,5 А, що проходить через ланцюг термоелектричного модуля, вказує на те, що максимальні значення густини струму до $3,3 \cdot 10^5$ А/м² спостерігаються в областях посередині контактних комутаційних пластин як на холодній, так і на гарячій стороні термоелектричного модуля.

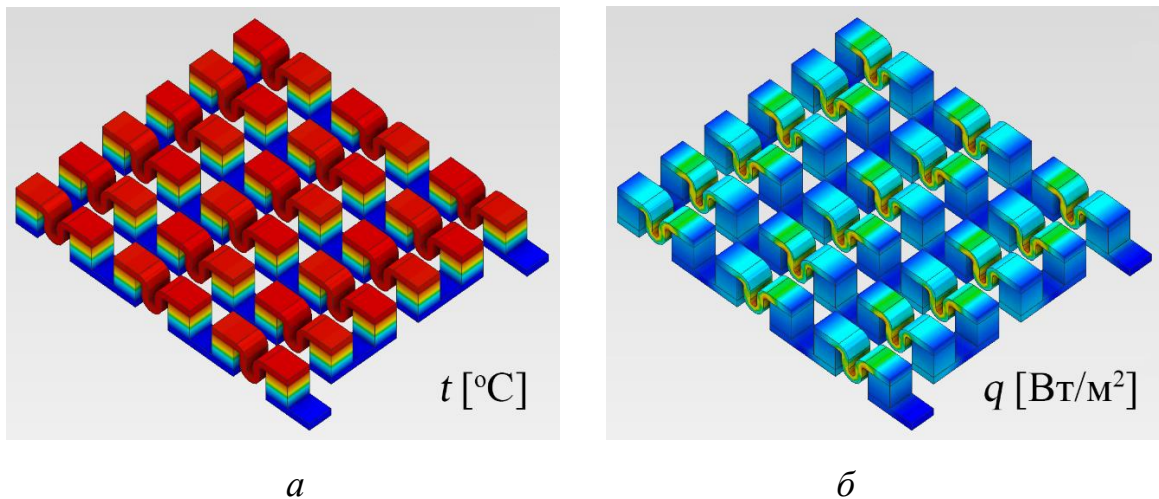


Рисунок 23. Розподіл температури t [°C] та густини теплового потоку q [Вт/м²] по 3D-моделі термоелектричного модуля з компенсованими комутаційними пластинами при силі робочого струму 1,5 А (синій, блакитний кольори – мінімальні значення; зелений, жовтий кольори – середні значення; рудий, червоний кольори – максимальні значення)

Розподіл температури (рис. 23, а) при силі струму 1,5 А, що проходить через ланцюг термоелектричного модуля, вказує на максимальне значення температури 13,2 °C на стороні гарячих комутаційних пластин термоелектричного модуля.

Розподіл густини теплового потоку на рис. 23, б дозволяє оцінити бажаний ефект від застосування компенсованих комутаційних пластин як компенсаційних елементів спроектованого термоелектричного модуля. Можна побачити, максимальні значення густини теплового потоку 2412,7 Вт/м² розташовані в областях посередині компенсаційних пластин, а тому, внаслідок застосування подібних компенсаційних елементів зменшуються термічні напруження в самому термоелектричному модулі, оскільки збільшена площа теплового розсіювання комутаційних пластин на гарячій стороні термоелектричного модуля.

Функціональну залежність $\Delta t = f(I)$ різниці температур Δt між гарячими і холодними комутаційними пластинами від сили постійного струму I , що

проходить через ланцюг термоелектричного модулю, для діапазону струмів від 0 до 3 А зображено на рис. 24.

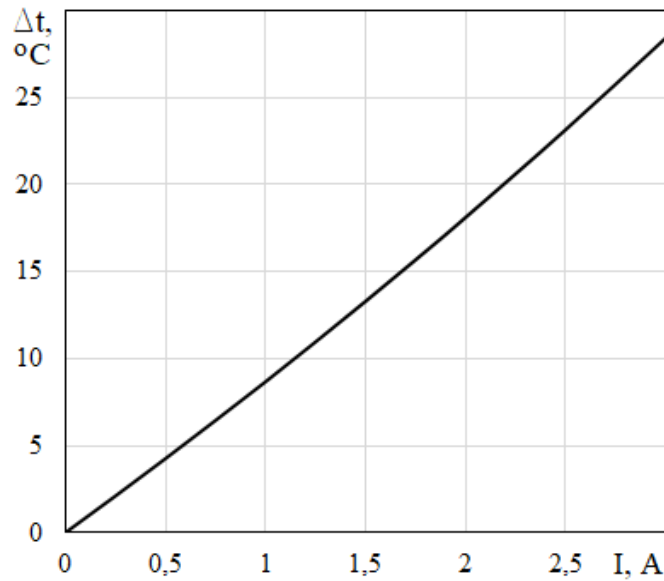


Рисунок 24. Функціональна залежність $\Delta t = f(I)$ різниці температур Δt між гарячими і холодними комутаційними пластинами від сили постійного струму I

З графіка (рис. 24) видно, що зі збільшенням сили постійного струму I зростає різниця температур Δt між гарячими та холодними пластинами термоелектричного модуля з компенсованими комутаційними пластинами. При силі постійного струму 1 А розрахована різниця температур становить $\Delta t = 8,6$ °C, а при силі постійного струму 2 А різниця температур збільшується приблизно в 2,1 рази і становить $\Delta t = 18$ °C. При силі струму 3 А різниця температур становить $\Delta t = 28,4$ °C, тобто збільшується в 3,3 рази від значення при силі струму 1 А.

Основні результати роботи впроваджено в освітній процес, що дозволило продемонструвати складні електричні і теплові процеси, що відбуваються в спроектованому термоелектричному модулі з компенсованими комутаційними пластинами при вивченні явищ прямого та зворотного термоелектричного ефекту.

Таким чином, проведено аналітичний огляд термоелектричних модулів в судновому електрообладнанні та в якості судових джерел енергії. Розглянуто класичні конструкції термоелектричних модулів, при використанні яких не вирішеними залишаються питання термічних напружень внаслідок лінійних розширень в матеріалі при нагріванні, що може призвести до не бажаного виходу з ладу електрообладнання в судових умовах.

Створено креслення термоелектричного елемента з компенсованою комутаційною пластиною, на основі якого спроектовано термоелектричний модуль з компенсаційними елементами у вигляді комутаційними пластин, що мають вигин, та розміщені на гарячій стороні модуля. Габаритні розміри спроектованого термоелектричного модуля становлять $55 \times 62,5$ мм, конструктивно він представляє собою ланцюг з 18-ти термоелектричних елементів з компенсованою комутаційною пластиною, що з'єднані послідовно.

На основі кінцево-елементної термоелектричного модуля з компенсованими комутаційними пластинами проведено розрахунок з використанням чисельного методу. За результатами розрахунку встановлено робочі характеристики та розподіл основних електричних і теплових параметрів термоелектричного модуля з компенсованими комутаційними пластинами.

Встановлено, що наявність компенсованих комутаційних пластин в спроектованому термоелектричному модулі призводить до збільшення густини теплового потоку саме в області посередині цих пластин при максимальному значенні до $2412,7$ Вт/м². Наявність компенсаційних пластин на гарячій стороні термоелектричного модуля призводить до зменшення термічних напружень в матеріалах за рахунок збільшеної площі розсіювання теплоти в оточуюче середовище.

В роботі результати дослідження термоелектричного модуля з компенсованими комутаційними пластинами представлено в графічній формі у вигляді розподілу електричного потенціалу ϕ [В], густини струму j [А/м²], температури t [°С], густини теплового потоку q [Вт/м²] при силі постійного струму 1,5 А. Також, результати представлено у вигляді функціональної

залежності $\Delta t = f(I)$ різниці температур Δt між гарячими і холодними комутаційними пластинами від сили постійного струму I в діапазоні від 0 до 3 А. Встановлено, що при силах постійного струму 1, 2 і 3 А різниці температур між холодними і гарячими комутаційними пластинами термоелектричного модуля становлять відповідно 8,6 °С, 18 °С і 28,4 °С.

Зменшення термічних напружень в матеріалі сприяє зменшенню виходу з ладу термоелектричного електрообладнання, що є особливо не бажаним в суднових умовах. Тому застосування спроектованого термоелектричного модуля з компенсованими комутаційними пластинами в судновому термоелектричному обладнанні є доцільним та перспективним.

Термоелектричний елемент з напівпровідниками у формі двох усічених пірамід та компенсованою комутаційною пластиною. Одним з можливих варіантів підвищення використання термоелектричного ефекту є конструктивне вдосконалення термоелектричних елементів за рахунок підбору певних геометричних форм термоелектричного матеріалу. При цьому не менш важливими залишаються питання дотримання термічних напружень в термоелектричному матеріалі в допустимих температурних діапазонах роботи термоелектричних вузлів транспортного електрообладнання. Як відомо, наявність компенсованої комутаційної пластини в конструкції термоелектричного елемента призводить до зменшення термічних напружень за рахунок збільшеної площі розсіювання теплоти в оточуюче середовище.

Було спроектовано модернізований термоелектричний елемент з напівпровідниками у формі двох усічених пірамід та компенсованою комутаційною пластиною (рис. 25) [148].

Розрахункова математична модель модернізованого термоелектричного елемента з компенсованою комутаційною пластиною складається з пари напівпровідників *P*- та *N*-типу у формі двох однакових усічених чотирикутних пірамід з висотою 2,5 мм кожна і мідних комутаційних пластин товщиною 1,5 мм, одна з яких як компенсаційний елемент має прогин. Кожна з усічених чотирикутних пірамід представляє собою багатогранник, дві з граней якого

представляють собою квадрати більшого та меншого розмірів зі сторонами довжиною відповідно 5 мм і 2,5 мм, а інші грані – рівнобічні трапеції з аналогічними довжинами великої і малої основ відповідно 5 мм і 2,5 мм.

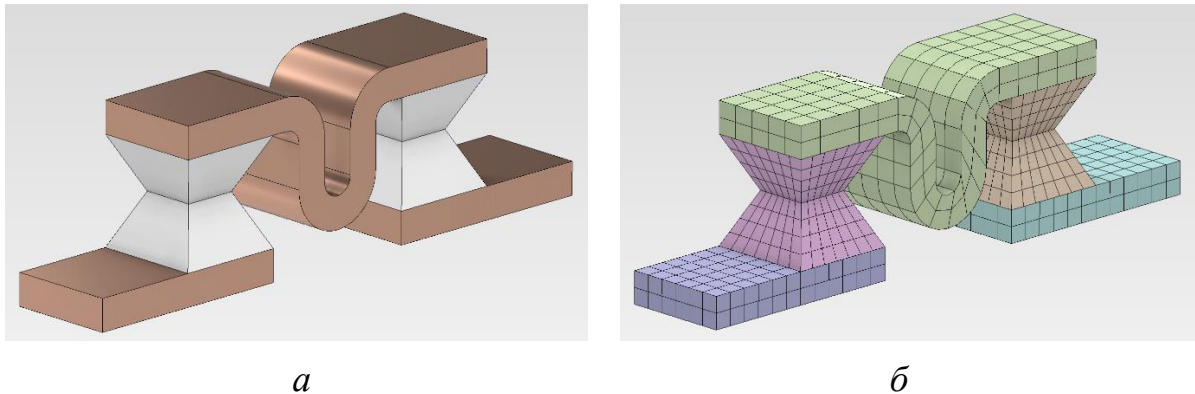


Рисунок 25. Геометрична (а) та кінцево-елементна (б) моделі модернізованого термоелектричного елемента з компенсованою комутаційною пластиною

В роботі з використанням методів комп'ютерного моделювання отримано основні електротеплові робочі параметри модернізованого термоелектричного елемента з компенсованою комутаційною пластиною. Розрахунок проведено з урахуванням розсіювання теплоти в оточуюче середовище з зовнішніх поверхонь розглядуваного термоелектричного елемента за рахунок вільної конвекції.

Таким чином, було спроектовано модернізований термоелектричний елемент з напівпровідниками у формі двох усічених пірамід і з компенсованою мідною комутаційною пластиною для транспортного електрообладнання. За результатами проведеного чисельного розрахунку отримано основні робочі характеристики модернізованого термоелектричного елемента з компенсованою комутаційною пластиною. Встановлено, що підвищення ефективності використання термоелектричного ефекту досягнуто за рахунок збільшення не менше ніж в 2 рази різниці температур між гарячою компенсованою комутаційною пластиною та холодними комутаційними пластинами, при цьому забезпечено прийнятні значення термічних напружень.

Термоелектричний елемент з напівпровідниками у формі кубоїдів і компенсованою комутаційною пластиною. Як зазначалось вище, термоелектричні елементи є складовою частиною термоелектричних модулів, які є основними компонентами термоелектричних вузлів транспортного електроустаткування. Від правильного конструктивного рішення одиничного термоелектричного елемента в значній мірі залежить якісна та надійна робота термоелектричних вузлів транспортного електроустаткування. Однією з основних умов, якій повинна відповідати конструкція термоелектричного елемента, є усунення або значною мірою зменшення механічних напружень, що виникають в останньому в результаті стискання холодних та розширення гарячих комутаційних пластин. Вищезазначене зумовлює необхідність подальшого пошуку шляхів підвищення ефективності використання прямого та зворотного термоелектричних ефектів та зменшення механічних напружень в термоелектричних вузлах транспортного електроустаткування.

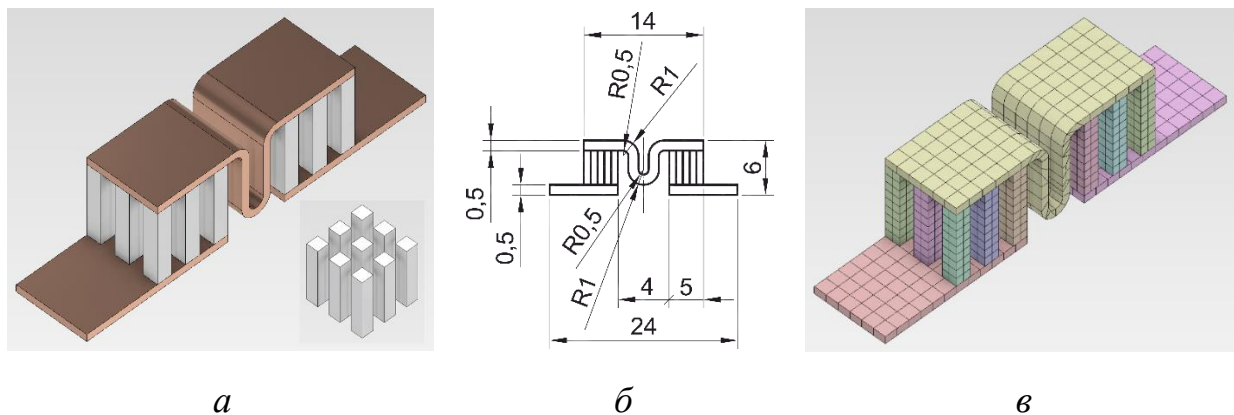


Рисунок 26. Геометрична модель (а) термоелектричного елемента з напівпровідниками у формі кубоїдів і компенсованою комутаційною пластиною, його креслення (б) та кінцево-елементна модель (в)

На конкретному прикладі проведено конструювання термоелектричного елемента з напівпровідниками у формі кубоїдів і компенсованою комутаційною пластиною, створено та чисельно розраховано його математичну модель, встановлено розподіл його основних робочих параметрів [149].

Модель термоелектричного елемента з напівпровідниками у формі кубоїдів і компенсованою комутаційною пластиною (рис. 26) складається з трьох комутаційних пластин, одна з яких має спеціальний вигин (компенсована), та з напівпровідників *P*- і *N*-типу (по дев'ять однакових кубоїдів в кожній групі). Габаритні розміри термоелемента – $24 \times 5 \times 6$ мм (без урахування товщин пластин ізоляційного корпусу), розміри кожного кубоїда – $1 \times 1 \times 5$ мм. Налаштування математичної моделі здійснювалось з урахуванням подібного моделювання в роботах [156] і [148, 151, 158]. Для оцінки верхньої температурної межі поверхні термоелектричного елемента приймалися адіабатично теплоізованими, оскільки при цьому він працює в більш напруженому експлуатаційному режимі, а механічні напруження, що виникають внаслідок температурного стискання та розширення, будуть максимальними.

Розподіл основних робочих параметрів термоелектричного елемента з напівпровідниками у формі кубоїдів і компенсованою комутаційною пластиною для транспортного електроустаткування показано на рис. 27. На ньому містяться градієнтні зображення при силі робочого струму 1 А для поля електричного потенціалу ϕ в діапазоні значень $[0; 2,2 \cdot 10^{-2}]$ В, для поля густини струму j в діапазоні значень $[6,1 \cdot 10^3; 5,7 \cdot 10^5]$ А/м², для поля напруженості електричного поля E в діапазоні значень $[0; 2,3]$ В/м, для поля температури t в діапазоні значень $[0; 27,5]$ °С, для поля густини теплового потоку q в діапазоні $[0; 3,7 \cdot 10^3]$ Вт/м², для поля джоулевого нагріву J в діапазоні значень $[107,8; 1,3 \cdot 10^5]$ Вт/м³.

При проходженні струму через термоелектричний елемент верхня комутаційна пластина починає нагріватися та відповідно розширюватися. Нижні комутаційні пластини, навпаки, починають охолоджуватися та стискатися. Під впливом цих сил в термоелектричному елементі створюються значні механічні напруження, які можуть призвести до його руйнування. Оскільки повністю усунути механічні напруження не представляється можливим, то в даній роботі запропоновано конструкцію термоелектричного елемента, в якому механічні напруження знижено настільки, що вони не призводять до виходу термоелектричного елемента з ладу. Одна з комутаційних пластин, що має вигин,

представляє собою компенсовану комутаційну пластину у вигляді ресори. В цьому випадку під впливом механічних напружень, що виникають в термоелектричному елементі, компенсована комутаційна пластина має змогу вигинатись, не виходячи за межі пружної деформації. Переріз компенсованої пластини повинен бути таким, щоб робочий струм, який через неї проходить, не виділяв помітної кількості джоулевого тепла.

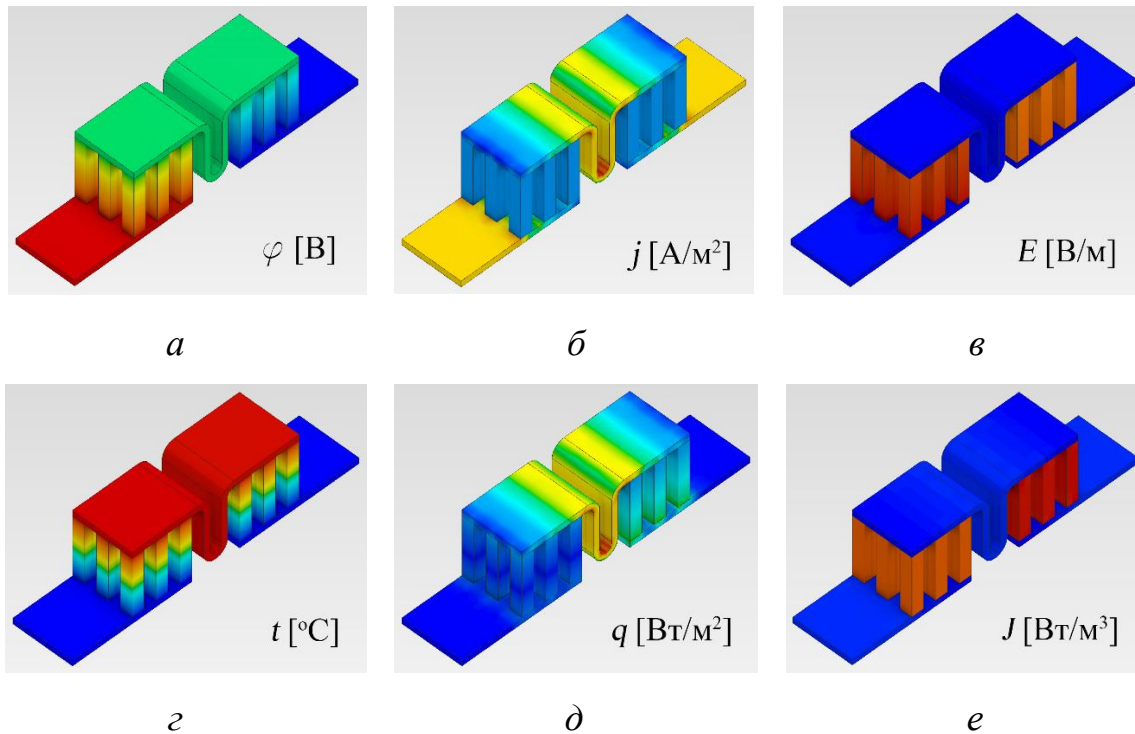


Рисунок 27. Розподіл електричних і теплових параметрів по моделі термоелектричного модуля з напівпровідниками у формі кубоїдів і компенсованою комутаційною пластиною при силі постійного струму 1 А (синій, блакитний кольори – мінімальні значення діапазону; зелений, жовтий кольори – середні значення діапазону; рудий, червоний кольори – максимальні значення діапазону): *a* – електричний потенціал φ в діапазоні $[0; 2,2 \cdot 10^{-2}]$ В; *б* – густина струму j в діапазоні $[6,1 \cdot 10^3; 5,7 \cdot 10^5]$ А/м²; *в* – напруженість електричного поля E в діапазоні $[0; 2,3]$ В/м; *г* – температура t в діапазоні $[0; 27,5]$ °С; *д* – густина теплового потоку q в діапазоні $[0; 3,7 \cdot 10^3]$ Вт/м²; *е* – джоулевий нагрів J в діапазоні $[107,8; 1,3 \cdot 10^5]$ Вт/м³

Встановлено, що при робочих струмах 1, 2 і 3 А через термоелектричний елемент з напівпровідниками у формі кубоїдів і компенсованою комутаційною пластиною його температурні нагрівання становили відповідно 27,5, 63,9 і 112,5 °С. Отримано результати, які дають можливість зробити висновок про те, що в термоелектричному елементі з напівпровідниками у формі кубоїдів і компенсованою комутаційною пластиною відбувається підвищення використання термоелектричного ефекту Пельтьє, а сама його конструкція забезпечую зменшення механічних напружень в напівпровідниках.

Таким чином, можна зробити загальний висновок про те, що в дослідженні з поміж іншого було викладено ряд конкретних розрахункових прикладів з термоелектричними модулями і термоелектричними елементами класичних і нових перспективних конструкцій для підвищення термоелектричного ефекту Пельтьє. Використання цих термоелектричних модулів і термоелектричних елементів в електрообладнанні на транспорті може сприяти підвищенню ефективності його роботи.