

УДК 62-69



Максимук М.В.

Максимук М.В.

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

## ПРО ОПТИМІЗАЦІЮ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ГЕНЕРАТОРНИХ МОДУЛІВ АВТОМОБІЛЬНОГО ПЕРЕДПУСКОВОГО НАГРІВНИКА

---

*Наведено результати комп'ютерного проектування та експериментальних досліджень зі створення нової конструкції термоелектричного термодарного генераторного модуля «Алтек-1061» для підвищення теплопродуктивності термоелектричного автомобільного передпускового нагрівника. Проектування здійснено з урахуванням температурних залежностей параметрів матеріалів, теплових і електричних втрат на контактах і комутації модуля.*

**Ключові слова:** передпусковий нагрівник, термоелектричний генератор, комп'ютерне проектування, фізична модель, термоелемент.

*Наведено результати комп'ютерного проектування та експериментальних досліджень зі створення нової конструкції термоелектричного термодарного генераторного модуля «Алтек-1061» для підвищення теплопродуктивності термоелектричного автомобільного передпускового нагрівника. Проектування здійснено з урахуванням температурних залежностей параметрів матеріалів, теплових і електричних втрат на контактах і комутації модуля.*

**Key words:**

### Вступ

Для подолання проблеми розрядки акумуляторної батареї автомобіля під час роботи передпускових нагрівників в Інституті термоелектрики створено експериментальний зразок термоелектричного генератора електричною потужністю 70 – 90 Вт, який працює від тепла передпускового нагрівника та забезпечує автономне живлення його компонентів [1 – 5]. Крім того надлишок електричної енергії термогенератора може використовуватись для підзарядки акумуляторної батареї та живлення іншого автомобільного обладнання (штатного вентилятора опалення, сигнальних систем, навігаторів і т.п.).

Експериментальні випробування нагрівника в стендових умовах довели працездатність конструкції та підтвердили раціональність проведених в [3] теоретичних розрахунків. Проте дослідження зразка в умовах понижених температур показали, що тепла потужність, яка «перекачується» термоелектричними модулями є недостатньою для нагріву двигуна до оптимальної для його запуску температури [4]. Річ в тім, що при від'ємних температурах повітря в'язкість машинного масла зростає, тому перед запуском автомобіля двигун потрібно розігріти до температури не менше 70 °С, перш ніж відбудеться повне змащування деталей циліндро-поршневої групи [6]. В ході ж натурних досліджень термоелектричного нагрівника

встановлено, що максимальна температура двигуна в режимі «передпусковий підігрів» складає  $50^{\circ}\text{C}$ , в режимі «передпусковий підігрів + опалення салону» –  $30^{\circ}\text{C}$ . У зв'язку з цим актуальними є дослідження спрямовані на подальшу оптимізацію конструкції розробленого термоелектричного нагрівника.

Підвищити температуру прогріву охолоджуючої рідини двигуна (теплоносія) можна двома шляхами. Перший полягає у використанні всієї теплової потужності джерела тепла нагрівника. Як показано в [4], в нагрівнику реалізовано лише такі режими роботи, при яких теплова потужність пальника не перевищує 2.3 кВт. В протилежному випадку спостерігається перегрів гарячої сторони термоелектричної батареї і, як наслідок, вихід з ладу основних функціональних вузлів приладу. Тому для нарощення теплової потужності джерела тепла до максимальних 4 кВт необхідно використовувати в конструкції нагрівника термобатарею, створену на основі середньотемпературних чи високотемпературних термоелектричних матеріалів [7 – 8]. Перспективним також є застосування комбінованих секційних, каскадних та проникних структур [9 – 10]. Однак, на нашу думку, такий підхід є не зовсім раціональним, оскільки для його реалізації необхідно кардинально змінювати вже відпрацьовану конструкцію нагрівника: здійснювати пошук оптимальних алгоритмів роботи як самого приладу, так і нових режимів роботи його компонент, створювати нову конструкцію електронного блоку і т.п.

Підвищити теплову потужність нагрівника можна в інший спосіб. Ідея даного підходу в тому, щоб за рахунок зменшення висоти віток термоелектричних модулів знизити їх тепловий опір і, відповідно, збільшити тепловий потік від джерела до теплоносія.

Конкуруючими факторами, що перешкоджають безперервному зменшенню висоти вітки, є контактні теплові й електричні опори. Так, зі зменшенням вітки значно зростають втрати перепадів температури в теплових контактах, а також значно більше проявляється негативний вплив тепла Джоуля, що виділяється в електричних контактних переходах термобатареї [11].

Тому метою даної роботи є аналіз впливу конструкції термоелектричного модуля на його енергетичні характеристики та створення на основі проведених досліджень нового варіанта термобатареї для термоелектричного передпускового нагрівника.

### Фізична модель термоелектричного модуля та її опис

В якості термоелектричної батареї в конструкції нагрівника використано 12 генераторних термопарних модулів «Алтек-1061», розроблених в Інституті термоелектрики [12], характеристики яких наведено на рис. 1.

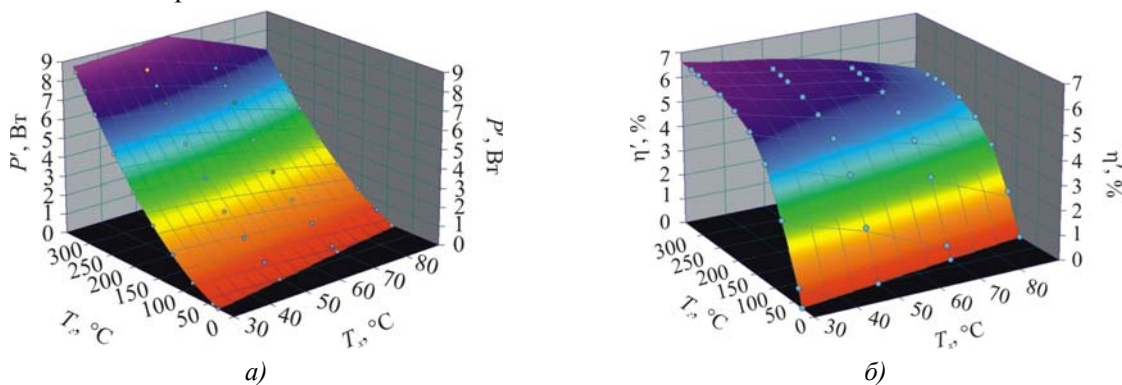


Рис. 1 Тривимірні залежності електричної потужності  $P$  (а) і ККД  $\eta$  (б) від температури гарячої  $T_h$  і холодної  $T_c$  сторін термоелектричного модуля «Алтек – 1061» [6].

З використанням наведених залежностей в [4] показано, що теплова потужність нагрівника  $Q$ , яка затрачається для нагрівання двигуна автомобіля від  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  складає в середньому  $1500\text{ Вт}$  ( $125\text{ Вт}$  в розрахунку на один термоелектричний модуль). Відповідно, щоб нагріти двигун до температури  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  необхідно визначити таку висоту вітки, при якій рівень теплової потужності модуля складатиме не менше  $180\text{ Вт}$ . Дане припущення справедливе, оскільки рівняння, що описує процес нагрівання носить лінійний характер:

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta T, \quad (1)$$

де  $Q$  – кількість теплоти, отримана тілом при нагріванні,  $m$  – маса тіла, що нагрівається,  $\Delta T = T_1 - T_0$ , різниця кінцевої  $T_1$  і початкової  $T_0$  температури тіла.

Для розрахунків оптимальної висоти вітки термоелектричного генераторного модуля «Алтек-1061» (рис. 2а) використано структурну одиницю модуля – термоелемент, фізичну модель якого наведено на рис. 2б. Модель містить вітки  $n$ -типу 1 і  $p$ -типу 2 провідності, з'єднані в послідовне електричне коло комутаціями 3 і 4 на гарячій та холодній стороні відповідно. Електричні контакти 7 і 8 між вітками й комутаційними пластинами характеризуються електричними контактними опорами. Армваною основою термоелектричного модуля служать електроізоляційні теплопровідні пластини 5 і 6, які перебувають в тепловому контакті 9 і 10 з термостатом.

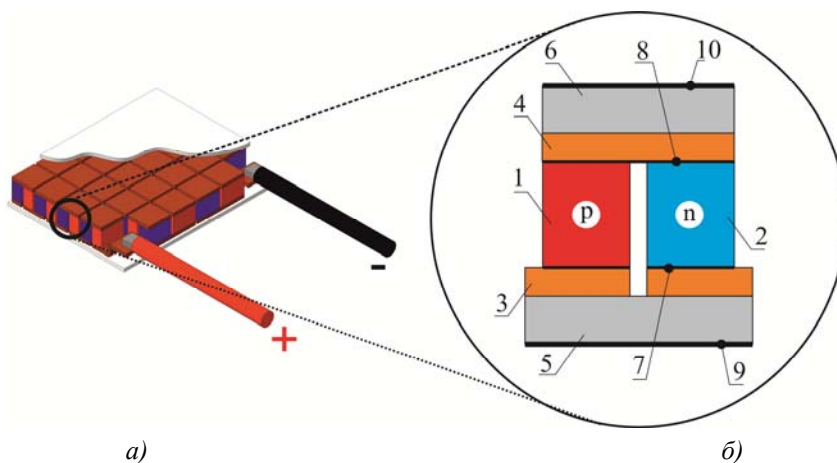


Рис. 2 Схематичне зображення термоелектричного модуля «Алтек-1061» (а) та фізична модель його елементарної структурної одиниці (б):

- 1 – вітка  $n$ -типу; 2 – вітка  $p$ -типу; 3, 4 – електричні комутації; 5, 6 – керамічні пластини;  
7, 8 – електричні контакти між вітками й комутаційними пластинами;  
9 – тепловий контакт між електроізоляційною пластиною й холодним термостатом;  
10 – тепловий контакт між керамічною пластиною й гарячим термостатом.

Для знаходження розподілів температури в термоелементі використовується закон збереження енергії.

$$\operatorname{div} \vec{w} = 0, \quad (2)$$

$$\vec{w} = \vec{q} + U\vec{j}. \quad (3)$$

В (2) і (3)  $\vec{w}$  – густина потоку енергії,  $\vec{q}$  – густина потоку тепла,  $U$  – електрхімічний потенціал,  $\vec{j}$  – густина електричного струму,

$$\vec{q} = -\kappa \nabla T + \Pi \vec{j}, \quad (4)$$

де  $\Pi$  – коефіцієнт Пельтьє,  $\kappa$  – питома теплопровідність.

$$\Pi = \alpha T, \tag{5}$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт термоЕРС,  $T$  – температура.

Густина електричного струму знаходиться з рівняння

$$\vec{j} = -\sigma \nabla U - \sigma \alpha \nabla T, \tag{6}$$

де  $\sigma$  – питома електропровідність.

Підставивши (3), (4) в (2), отримаємо

$$-\nabla(\kappa \nabla T) + (\nabla \Pi + \nabla U) \vec{j} = 0. \tag{7}$$

З виразу (7), використавши (5) і (6), отримаємо рівняння для знаходження розподілу температури

$$-\nabla((\sigma \alpha^2 T + \kappa) \nabla T) - \nabla(\sigma \alpha T \nabla U) = \sigma((\nabla U)^2 + \alpha \nabla T \nabla U). \tag{8}$$

Для знаходження розподілу електричного потенціалу застосовується законом збереження електричного заряду

$$\text{div } \vec{j} = 0. \tag{9}$$

Підставивши (5) в (8), отримаємо таке рівняння:

$$-\nabla(\sigma \alpha \nabla T) - \nabla(\sigma \nabla U) = 0. \tag{10}$$

Рівняння (8), (10) є системою диференціальних рівнянь зі змінними коефіцієнтами другого порядку в частинних похідних, що описує розподіл температури й потенціалу в неоднорідному термоелектричному середовищі.

### Комп'ютерна модель термоелемента

Розв'язок системи рівнянь (8) та (10) реалізовувався в програмному середовищі «Comsol Multiphysics» [13] чисельним методом скінченних елементів. У процесі комп'ютерного проектування за вхідні дані використовувались наступні величини:

– температурні залежності термоелектричних параметрів  $\alpha_n(T)$ ,  $\alpha_p(T)$ ,  $\sigma_n(T)$ ,  $\sigma_p(T)$ ,  $\kappa_n(T)$ ,  $\kappa_p(T)$  (стандартні для матеріалів на основі  $n$ - і  $p$ - $Bi_2Te_3$  (рис. 3 – 5));

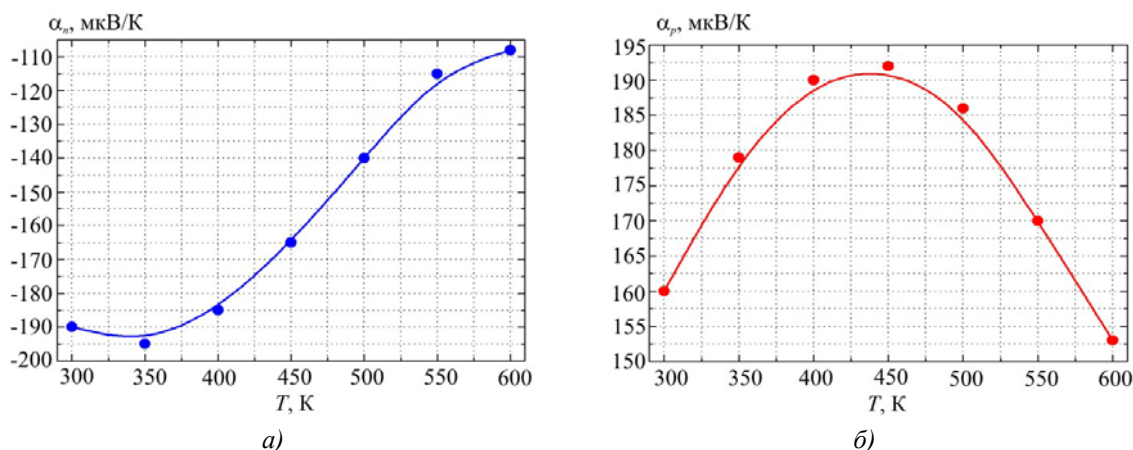


Рис. 3 Залежність коефіцієнта термоЕРС від температури: а)  $n$ - $Bi_2Te_3$ ; б)  $p$ - $Bi_2Te_3$ .

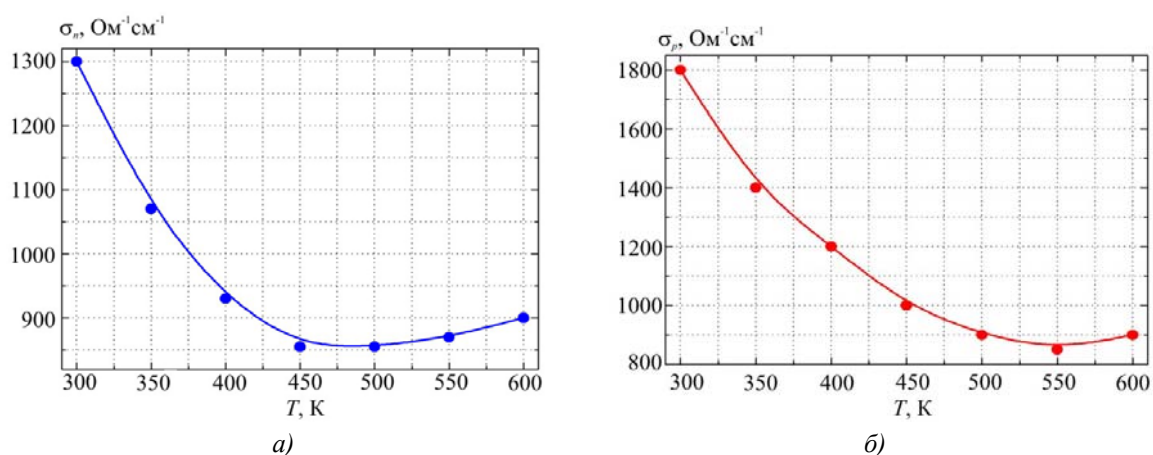


Рис. 4 Залежність коефіцієнта електропровідності від температури: а) n-Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>; б) p-Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>.

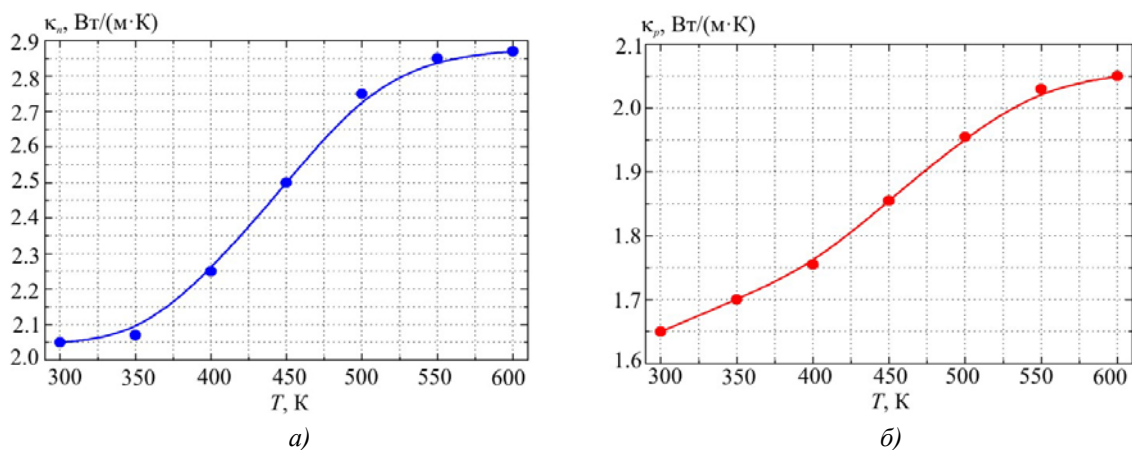


Рис. 5 Залежність коефіцієнта теплопровідності від температури: а) n-Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>; б) p-Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>.

- поперечний переріз віток ( $a \times b$ ) = (1.8 × 4.2) мм;
- відстань між вітками  $d = 0.4$  мм;
- висота комутаційних пластин  $h_{com} = 0.25$  мм;
- висота ізоляційних пластин  $h_{ins} = 0.65$  мм.
- кількість пар віток у модулі  $N = 56$  шт;
- тепловий контактний опір між термостатом та ізоляційними пластинами  $R = 4$  К/Вт;
- контактний електричний опір між вітками та комутаційними пластинами  $r = 10^{-5}$  Ом·см<sup>2</sup>;

На рис. 6 зображено геометрію та сітку кінцевих елементів, побудовані в Comsol, для моделювання термоелемента.

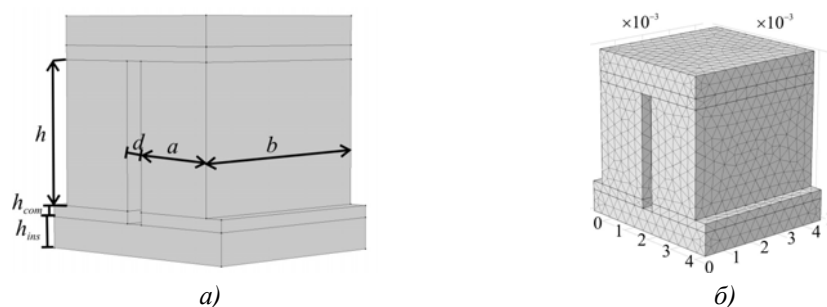


Рис. 6. Геометрія (а) та метод скінченних елементів (б), побудовані в Comsol у застосуванні до моделі термоелемента.

Проектування здійснювали при висоті  $h$  вітки термоелемента, яку послідовно змінювали в діапазоні від 3 мм до 1 мм з кроком 0.5 мм.

Граничні умови для розв'язку рівнянь (8) і (10) вибиралися таким чином. Фіксувалися температури теплопоглинальної та тепловиділяючої поверхонь термоелемента  $T_h = 280$  °С та  $T_c = 50$  °С. На всіх інших границях накладалися умови адіабатичної теплової ізоляції. Задавалося нульове значення потенціалу на комутаційній пластині вітки  $n$ -типу провідності. На іншій комутаційній пластині вітки  $p$ -типу провідності задавалося значення  $U$ , яке становить половину термоЕРС, що генерується термоелементом. У свою чергу значення генерованої термоЕРС визначалося системою рівнянь (8) і (10) за відсутності протікання струму через термоелемент.

На границях віток і контактного шару, контактного шару та комутаційних пластин, ізоляційних і комутаційних пластин враховувалися умови рівності температур та теплових потоків.

### Результати досліджень

В результаті моделювання отримано розподіли температури та електричного потенціалу в термоелементі генераторного модуля «Алтек-1061» (рис. 7).

На рис. 8, 9 наведено залежності енергетичних характеристик термоелектричного модуля «Алтек-1061» від висоти вітки термоелемента.

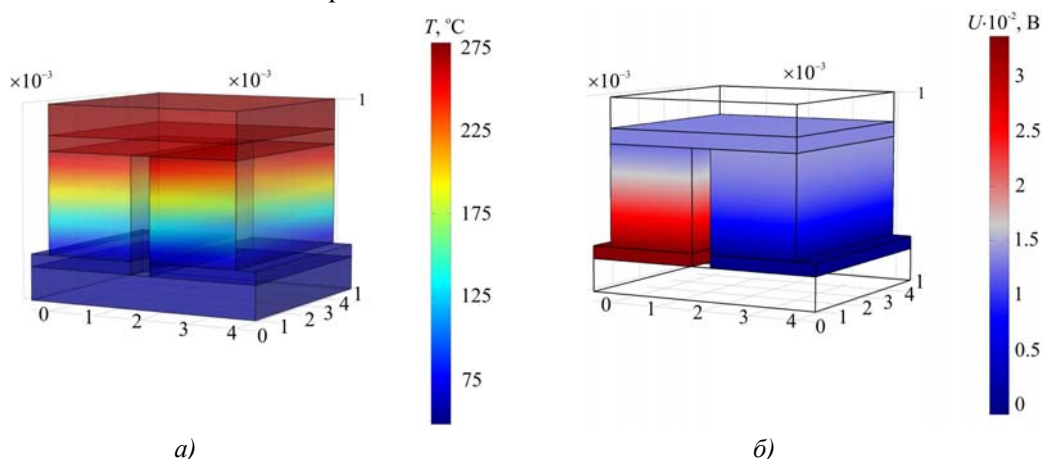


Рис. 7 Розподіл температури (а) та електричного потенціалу (б) в термоелементі генераторного модуля «Алтек-1061».

Висота вітки  $h = 2$  мм.

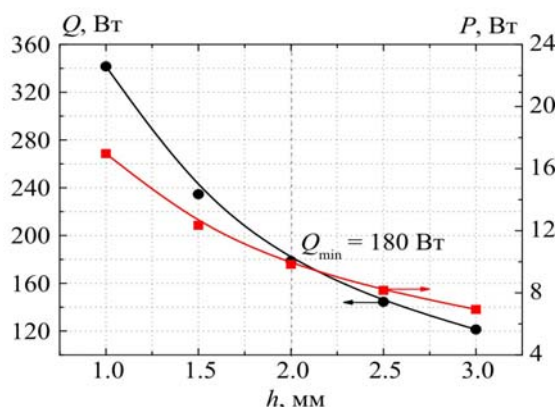
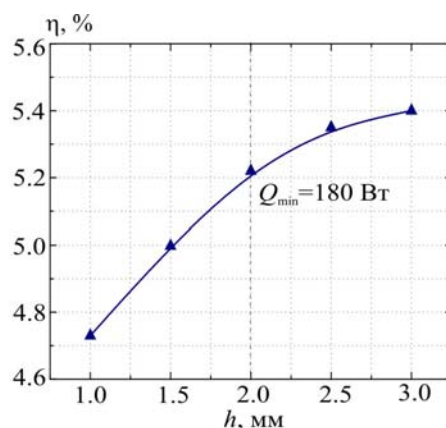


Рис. 8. Залежність теплової  $Q$  та електричної  $P$  потужності модуля «Алтек-1061» від висоти вітки  $h$ .

Рис. 9. Залежність ККД модуля «Алтек-1061» від висоти вітки  $h$ .

З представлених даних слідує, що зі зменшенням висоти вітки термоелемента в інтервалі 3 – 1 мм спостерігається ріст як теплової ( $Q_{h=3} = 120$  Вт –  $Q_{h=1} = 340$  Вт) так і генерованої електричної ( $P_{h=3} = 7$  Вт –  $P_{h=1} = 17$  Вт) потужності модуля, що спричинене зниженням його теплового опору. Причому необхідний рівень теплової потужності  $Q_{min} = 180$  Вт досягається при висоті вітки термоелементів 2 мм. В цьому випадку електрична потужність модуля складає  $\sim 10$  Вт (рис.8). Таким чином, для підвищення теплопродуктивності, в нагрівнику повинна використовуватись конструкція модуля «Алтек-1061» з вітками, висота яких не перевищує 2 мм. Проте, зменшення висоти також призводить і до посилення впливу контактних електричних та теплових опорів, що наглядно демонструє поведінка ККД (рис. 9). Так, в інтервалі висот (3 – 2) мм ефективність модуля зменшується з 5.4 % до 5.2 %, в той час як на проміжку  $h = (2 - 1)$  мм зниження  $\eta$  є більш інтенсивним:  $\eta = 5.2$  % при  $h = 2$  мм,  $\eta = 4.4$  % при  $h = 1$  мм.

Тому, на наш погляд, використання в нагрівнику модулів з висотою віток 2 мм є найраціональнішим варіантом, оскільки дозволяє забезпечити необхідний для передпускового нагріву рівень теплової потужності з найменшими втратами ККД приладу.

Доцільність застосування віток з мінімальними втратами висоти цілком виправдане і з точки зору надійності. Зі зменшенням висоти, внаслідок градієнта температур вздовж вітки, дія теплового розширення посилюється, що спричиняє деформацію вітки та, відповідно, знижує механічну міцність модуля. Це особливо важливо в умовах експлуатації нагрівника на транспортних засобах під час їх руху, де вплив вібрацій, ударів та інших навантажень проявляється одночасно, що збільшує ризик виходу термобатарей нагрівника з ладу.

На основі результатів комп'ютерного проектування створено модифікований ряд термоелектричних генераторних модулів «Алтек-1061» з висотою вітки термоелементів 2 мм, що призначені для оптимізації термоелектричного передпускового нагрівника. Результати експериментальних досліджень енергетичних характеристик модуля при температурі гарячої сторони 280 °С і інтервалу температур холодної сторони 30 – 70 °С представлено в таблиці.

Як видно з наведених в таблиці даних, експериментальні результати добре корелюють із комп'ютерними розрахунками (рис. 8, 9). Так, електрична  $P$  та тепла  $Q$  потужність модуля за  $T_h = 280^\circ\text{C}$  і  $T_c = 50^\circ\text{C}$  становлять 9 Вт та 190 Вт відповідно. Ефективність термоелектричного перетворення  $\eta = 4.5$  %. Розбіжність ( $\sim 13$  %) між розрахованим та отриманим ККД найімовірніше пов'язана з відхиленням значень параметрів матеріалів  $\alpha$ ,  $\sigma$ ,  $\kappa$  від стандартних

температурних залежностей, а також із теплообміном бічних поверхонь віток з навколишнім середовищем.

Таблиця

Залежність енергетичних характеристик термоелектричного модуля «Алтек-1061» з висотою вітки 2 мм від температури холодної сторони за  $T_h = 280$  °С

№ п/п	$T_c$ , °С	$U$ , В	$I$ , А	$P$ , Вт	$Q$ , Вт	$\eta$ , %
1	30	1.98	5.6	11.0	205	5.1
2	40	1.9	5.3	10.0	198	4.8
3	50	1.8	5.0	9.0	190	4.52
4	60	1.73	4.8	8.3	184	4.32
5	70	1.65	4.5	7.4	176	4.0

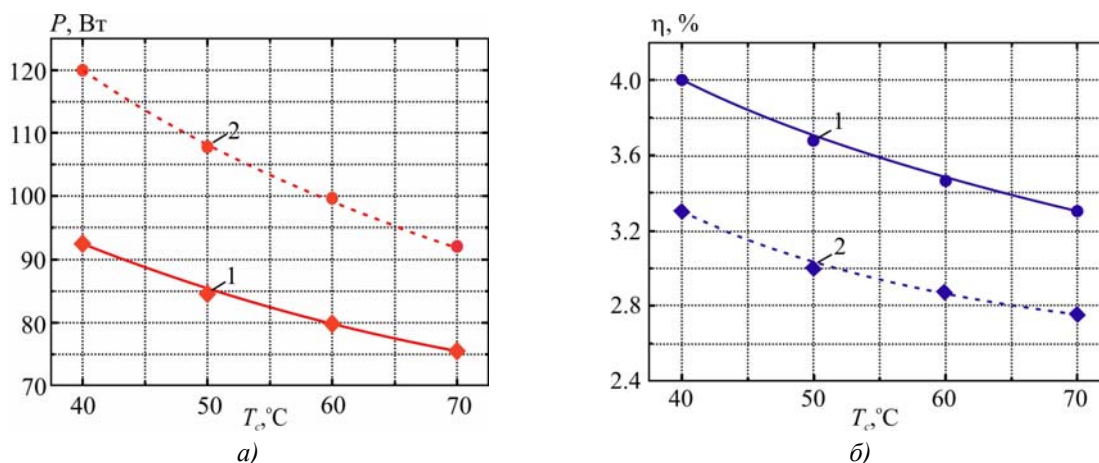


Рис. 10. Залежність максимальної електричної потужності  $P$  (а) та ККД  $\eta$  (б) термоелектричного нагрівника від температури холодного теплоносія  $T_c$ :  
1 – отримана в I варіанті нагрівника; 2 – прогнозована в II варіанті нагрівника.

Таким чином, використання в якості термоелектричної батареї модулів розробленої модифікації дає можливість збільшити теплову потужність термоелектричного передпускового нагрівника  $\sim$  в 1.5 рази, на рівень 2.3 кВт. При цьому в інтервалі температур холодного теплоносія (40 – 70) °С очікується підвищення генерованої електричної потужності нагрівника до (120 – 90) Вт (рис. 10а), а прогнозований діапазон значень ККД складатиме відповідно 3.3 % - 2.75% (рис. 10б).

## Висновки

1. Показано, що для передпускового підігріву двигуна автомобіля до оптимальної для його запуску температури 70 °С, теплова потужність термоелектричного нагрівника повинна складати не менше 2.2 кВт, в розрахунку на один термоелектричний модуль термобатареї нагрівника – не менше 180 Вт тепла.
2. Встановлено, що найраціональнішим варіантом є використання в термоелектричному передпусковому нагрівнику генераторних модулів «Алтек-1061» з висотою віток 2 мм. Це дозволяє забезпечити необхідний для попереднього нагріву рівень теплової потужності з найменшими втратами ККД та надійності приладу.



3. Визначено, що за температури гарячої сторони 280 °С та інтервалу температур холодної сторони 30 – 70 °С, електрична потужність модифікованих модулів «Алтек-1061» знаходиться в межах 11 Вт – 7.4 Вт, ефективність термоелектричного перетворення складає 5.1 % – 4 %.
4. Встановлено, що використання в якості термоелектричної батареї модулів розробленої модифікації дає можливість збільшити теплову потужність термоелектричного передпускового нагрівника на рівень 2.3 кВт. При цьому очікується підвищення генерованої електричної потужності нагрівника до 120 Вт – 90 Вт, а прогнозований діапазон значень ККД складає відповідно 3.3 % – 2.75 %.

## Література

1. Михайловський В.Я., Максимук М.В. Режими роботи автомобілів при понижених температурах. Необхідність використання нагрівачів та раціональність застосування термогенераторів для їх роботи. *Термоелектрика*. 2015. № 3. С. 20 – 31.
2. Михайловський В.Я., Максимук М.В. Раціональні потужності термогенераторів для передпускових нагрівачів транспортних засобів. *Термоелектрика*. 2015. № 4. С. 65 – 74.
3. Михайловський В.Я., Максимук М.В. Комп'ютерне проектування термоелектричного автомобільного передпускового нагрівача на дизельному паливі. *Термоелектрика*. 2016. № 1. С. 52 – 65.
4. Анатичук Л.І., Михайловський В.Я., Максимук М.В., Андрусак І.С. Експериментальні дослідження термоелектричного автомобільного передпускового нагрівача на дизельному паливі. *Термоелектрика*. 2016. № 4. С. 84 – 94.
5. Максимук М.В., Андрусак І.С. Електронний блок керування термоелектричним передпусковим автомобільним нагрівником. *Термоелектрика*. 2016. № 5. С. 44 – 51.
6. Найман В.С. Все о предпусковых обогревателях и отопителях. Москва, 2017. 213 с.
7. Вихор Л.М., Михайловський В.Я., Мочернюк Р.М. Оптимізація матеріалів та оцінка характеристик генераторних модулів для рекуператорів тепла. *Фізика і хімія твердого тіла*. 2014. № 1. Т 15. С.206 – 213.
8. Михайловський В.Я., Кузь Р.В., Лисько В.В., Максимук М.В., Мочернюк Р.М. Термоелектричні генераторні модулі із матеріалів на основі *n-InSe* і *p-PbTe* для діапазону робочих температур 30 – 500 °С. *Термоелектрика*. 2014. № 5. С. 39 – 48.
9. Черкез Р.Г., Максимук М.В., Феняк П.П. Проектування термоелектричних проникних структур на основі силіцидів *Mg* і *Mn*. *Термоелектрика*. 2013. № 6. С. 62 – 70.
10. Михайловський В.Я., Вихор Л.М., Максимук М.В., Мочернюк Р.М. Проектування термоелектричних каскадних модулів із секційними вітками на основі *Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>-PbTe-TAGS*. *Термоелектрика*. 2015. № 2. С. 48 – 59.
11. Анатичук Л.І., Кузь Р.В., Хванг Дж.Д. Енергетичні й економічні показники термоелектричних генераторних модулів на основі *Bi-Te* для рекуперації відходів тепла. *Термоелектрика*. 2012. № 4. С. 75 – 82.
12. <http://inst.cv.ua>
13. [www.comsol.com](http://www.comsol.com)

Надійшла до редакції 15.03.2017