

УДК 621.315.592

DOI: 10.18372/0370-2197.1(94).16472

М. О. ВОЛЬЧЕНКО¹, Д. Ю. ЖУРАВЛЬОВ², В. В. НИЦУК², О. С. БУРАВА²,
Л. Б. МАЛИК³,

¹Кубанський державний технологічний університет, Росія

²Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Україна

³Дрогобицький фаховий коледж нафти і газу, Україна

ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ ІНТЕНСИФІКАТОРИ ТЕПЛООБМІНУ У ПАРАХ ТЕРТЯ ГАЛЬМ

У даній статті розглянуті питання: особливості роботи термоелектричних інтенсифікаторів у парах тертя гальм; принципи розробки пристроїв та систем термоелектричного охолодження фрикційних вузлів; обговорення результатів. Відзначено, що матеріали на основі Bi_2Te_3 при великому перепаді температур у гільці термоелемента володіють істотно меншим, ніж його максимальне значення, загальним параметром ефективності. Даний параметр близький до максимуму, і у кожній точці гільки рекомендовано підтримувати його зміною складу матеріалу по довжині термоелементу. Представлена робота термоелектричного інтенсифікатора теплообміну стосовно пар тертя стрічково-колодкового гальма бурової лебідки. Наводяться критерії ефективності застосування таких інтенсифікаторів і на цій основі аналізується їх робота. Даються оцінки позитивного ефекту від застосування термоелектричного модуля. Встановлено, що ребра обода шківів збільшують поверхню теплообміну до 20% і при цьому досягається зниження енергонавантаженої пар тертя гальма на 6-8%. Термоелектричні інтенсифікатори теплообміну знижують енергонавантаженисть пар тертя стрічково-колодкового гальма на 18-20%. Проведений порівняльний аналіз двох видів охолодження обода шківів стрічково-колодкового гальма бурової лебідки та оцінена їх ефективність. Показано, що здебільшого використання інтенсифікатора в парах тертя різних видів гальм сприяє інтенсифікації теплообміну. Запропоновано принципи розробки пристроїв і систем термоелектричного охолодження фрикційних вузлів гальм, що використовуються в машинобудуванні.

Ключові слова: термоелектричний охолоджувач, теплообмін, інтенсифікатор, ефективність охолодження пар тертя гальм.

Вступ. Для зниження енергонавантаженої металевих фрикційних елементів гальм рекомендують використовувати термоелектричний охолоджувач, за рахунок роботи якого досягається збільшення відведення теплоти у навколишнє середовище. Такі пристрої називають інтенсифікаторами теплообміну [1 - 4]. Ясно, що якщо об'ємна температура металевих фрикційних елементів гальм при електротермомеханічному терті помітно вища за температуру навколишнього середовища, незрозуміло які переваги в порівнянні з пасивним вимушеним повітряним охолодженням має термоелектричний інтенсифікатор теплообміну. У цьому дослідженні наводиться аналіз роботи такого інтенсифікатора та даються критерії ефективності його роботи.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. У роботі [1] для підтримки оптимального значення (параметра ефективності) в PbTe використовують носії лише одного знака, електрони, концентрація яких визначається концентрацією легуючої домішки.

Відзначено, що матеріали на основі Bi_2Te_3 при великому перепаді температур у гілці термоелемента володіють істотно меншим, ніж його максимальне значення, загальним параметром ефективності. Даний параметр близький до максимуму, і у кожній точці гілки рекомендовано підтримувати його зміною складу матеріалу по довжині термоелементу [2].

Існують принаймні дві можливості підвищення ефективності: за допомогою змінної концентрації носіїв заряду: оптимізація параметра ефективності Z у кожній точці гілки в робочому інтервалі температури [3] та використання розподіленого ефекту Пельтьє [4].

У роботі [5] вказується, що визначення оптимального профілю неоднорідності домішки є складним математичним завданням, перераховуються деякі методи розрахунку температурного профілю гілки термоелемента та розглядаються технології створення неоднорідностей.

Реальні низькотемпературні термоелектрики з високою ефективністю не мають широкої забороненої зони, тому необхідно враховувати і власні носії заряду [6, 7].

Як показано у роботі [3], в оптимізованій гілці з повною компенсацією теплоти Джоуля електропровідність на холодному кінці гілки на 2 порядки більша, ніж на гарячому, а модуль диференціальної термоерс в 4 рази менший.

Застосування розподіленого ефекту Пельтьє вважається одним із перспективних шляхів підвищення ефективності термоелектриків. Реалізація цієї ідеї містить у собі ряд труднощів пов'язаних з математичним моделюванням, визначенням оптимального розподілу концентрації носіїв заряду, що призводить до максимальної ефективності гілки, виготовлення гілки з оптимальним розподілом концентрації носіїв заряду. Оскільки термоелектрики, що практично використовуються, - це леговані напівпровідники n - і p -типу, то зазвичай при оптимізації розглядаються тільки основні носії заряду. Передбачається, що їхню концентрацію можна змінювати за допомогою легування відповідними домішками в дуже широкому інтервалі її концентрацій, не враховуючи власних носіїв заряду. У цьому виникає спокуса повністю компенсувати теплоту Джоуля з допомогою розподіленого ефекту Пельтьє [4, 8].

У роботі [9] використані термоелектричні інтенсифікатори теплообміну в парах тертя гальм, вмонтовані у їх фрикційні елементи. Однак не було враховано залежності: температури пар тертя гальма (T_1) від температури гарячого спаю термоелектрохолодильника (T_0); ефективності охолодження пар тертя гальма (T_1-T_0) від температури їх нагрівання (T_1).

Постановка задачі. Основні питання статті: особливості роботи термоелектричних інтенсифікаторів у парах тертя гальм; принципи розробки пристроїв та систем термоелектричного охолодження фрикційних вузлів; обговорення результатів.

Мета роботи – розкрити особливості роботи термоелектричних інтенсифікаторів охолодження пар тертя гальм та запропонувати принципи їх розробки.

Особливості роботи термоелектричних інтенсифікаторів охолодження у парах тертя гальм. У 20-х роках ХХ століття радянський фізик О. Ф. Іоффе, вивчаючи властивості напівпровідників, у яких електропровідність різко зростає з підвищенням температури, встановив, що підтримуючи температуру гарячого спаю термобатареї сталою (приблизно рівну кімнатній), на холодному спаї можна досягти дуже низьких температур. Пізніше розпочалися роботи із створення напівпровідникових термоелектричних холодильників.

Теоретичні дослідження, підтвержені експериментально [4], показали, що найбільшою ефективністю володіють термобатареї, які є термоелектричними інтенсифікаторами охолодження і складені з матеріалів, що мають діркову та електронну провідності (p - та n -типу). У цьому випадку струми, що виникають у напівпровідниках, збігаються у напрямку, посилюючи один одного. Пояснюється це тим, що вільні електрони в напівпровіднику з n -типом провідності накопичуються на його холодному кінці, заряджаючи холодний спай негативно, а гарячий - позитивно. У напівпровіднику ж з дірковою провідністю, навпаки, гарячий кінець заряджається негативно, а холодний - позитивно.

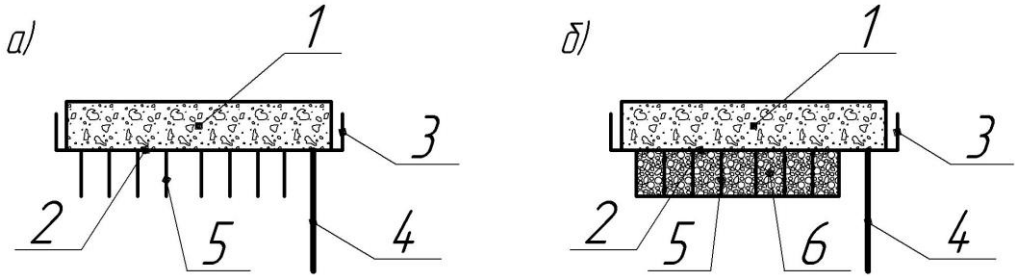


Рис. 1. Система охолодження обода шків з ребра (а) і термоелектричним охолоджувачем (б): 1 – фрикційна накладка; 2, 3, 4 – обід шків, реборди та кріпильний виступ; 5 – оребрення обода; 6 – термоелектричний модуль охолодження

Розглянемо два способи охолодження нагрітого обода 1 стрічково-колодкового гальма з оребренням 5 (а) та систему охолодження того ж об'єкта за допомогою термоелектричного модуля 6 (б). При цьому виділяється теплота Q_0 при електротермомеханічному терті "метал - полімер". Перший спосіб (рис. 1, а) передбачає, що теплота від обода 2, його елементів реборд 3 та кріпильного виступу 4 відводиться з ребра 5, взаємодіючи з навколишнім середовищем.

У другому випадку між ребрами 5 та ободом 1 шків міститься охолоджувальний термоелектричний модуль 6 (рис. 1, б). Спробуємо з'ясувати, чи дозволяє використання термоелектричного охолоджувача більш ефективно знижувати температуру обода 1 охолоджувального шків, якщо ця температура навіть після використання термоелектричного охолоджувача залишається вище навколишнього середовища T_a , тобто $T_0 > T_a$.

Для випадку, наведеного на рис. 1, а зв'язок між перепадом температур між ободом шків і навколишнім середовищем ΔT_a описується виразом

$$\Delta T_a = T_1 - T_a = R_r Q_0, \quad (1)$$

де R_r – тепловий опір оребрення обода шків.

При використанні додаткового термоелектричного охолоджувача рівняння теплового балансу на холодному та гарячому кінцях модуля має вигляд

$$\alpha I T_0 - \frac{1}{2} I^2 R - K \Delta T_1 = Q_0 \alpha I T_1 + \frac{1}{2} I^2 R - K \Delta T_1 = Q_1, \quad (2)$$

де α – сумарна термоємність гілок модуля, I – струм через модуль, R – електричний опір модуля, K – теплопровідність модуля, $\Delta T_1 = T_1 - T_0$ – різниця на модулі, Q_1 – теплота, яка виділяється на гарячому кінці модуля. Температурні залежності величин α , R , K не враховувались.

У випадку, наведеному на рис. 1, б, перепад температур на оребренні охолодження дорівнює

$$\Delta T_{mr} = T_1 - T_a = R_r Q_1 = R_r \mu Q_0,$$

де $\mu = Q_1/Q_0$ – тепловий коефіцієнт.

Для того, щоб схема з термоелектричним охолодженням працювала ефектніше за просту схему з оребренням потрібно щоб об'ємна температура на робочій поверхні обода шківів при використанні термоелектричного охолоджувача (див. рис. 1, б) була меншою, ніж температура у випадку рис. 1, а, тобто [9]

$$\Delta T_r > \Delta T_{mr} - \Delta T_1 = \mu \Delta T_r - \Delta T_1. \quad (4)$$

Враховуючи зв'язок між холодильним та тепловим коефіцієнтом $\varepsilon = \frac{1}{\mu - 1}$,

отримуємо

$$\Delta T_1 \varepsilon \geq \Delta T_r. \quad (5)$$

При виконанні нерівності (5) використання термоелектричного охолоджувача дозволяє знизити температуру обода шківів порівняно з охолодженням тільки оребренням.

Тому нерівність (5) є основним критерієм оцінки ефективності роботи термоелектричного інтенсифікатора теплообміну. З нерівності (5) також видно, що збільшення дозволяє збільшувати допустиму величину ΔT_r .

Розглянемо випадок роботи модуля в режимі максимальної енергетичної ефективності (максимального ε), що дозволяє мінімізувати теплоту, яка виділяється на гарячому кінці модуля. Для цього режиму відомий вираз [3]

$$I = \frac{\alpha \Delta T_1}{R(M-1)}, \quad (6)$$

де

$$M = \sqrt{1 + Z \frac{T_0 + T_1}{2}}, \quad (7) \quad Z = \frac{\alpha^2}{RK}. \quad (8)$$

У такому режимі максимальна холодопродуктивність досягається при $\Delta T_1 \approx \Delta T_{\max}/2$ і $\varepsilon \approx 1$, де ΔT_{\max} – максимальна різниця температур на модулі. З (5) отримуємо приблизну оцінку для $\Delta T_1 \leq \Delta T_{\max}/2$, при якій використання термоелектричного модуля є виправданим.

Встановлено, що ребра обода шківів збільшують поверхню теплообміну до 20% і при цьому досягається зниження енергонавантаженості пар тертя гальма на 6-8%.

Надалі на підставі теплового балансу гарячого та холодного кінців термобатарей було отримано вираз для оцінки енергонавантаженості пар тертя стрічково-колодкового гальма:

$$T = \left\{ \frac{\alpha_T \cdot T_0 \cdot (3\alpha_T + \alpha_1 - \alpha_2) - (\rho_1 + \rho_2) \cdot (\chi_1 + \chi_2) \pm \sqrt{2(\alpha_1 - \alpha_2) \cdot T_0 \cdot [2(\alpha_1 - \alpha_2) \cdot \alpha_T^2 \cdot T_0 - (\rho_1 + \rho_2) \cdot (\chi_1 + \chi_2) \cdot (\alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_T)] + (\rho_1 + \rho_2)^2 \cdot (\chi_1 + \chi_2)^2}}{(\alpha_1 - \alpha_2 + \alpha_T) \cdot (3\alpha_T - \alpha_1 + \alpha_2)} \right\} \times \quad (9)$$

З аналізу даного рівняння видно, що за однакових діаметрів гілок термоелектроохолодильника його ефективність залежить від геометричних розмірів і

визначається виключно термоелектричними властивостями напівпровідникових матеріалів. Ефективність останніх оцінюється залежністю [10]:

$$z = \frac{\alpha^2 \cdot \sigma}{\chi},$$

де σ – питома електропровідність, $\sigma = 1/\rho$, т. е. $z = \alpha^2/(\rho \cdot \chi)$.

Логічно було б припустити, що найвищу ефективність має термобатарея, складена з напівпровідників з максимальним значенням z . Однак це припущення справедливе тільки для ідеальних умов експлуатації термобатарей, у яких перехідний опір спаю дорівнює нулю. Реальні умови далекі від ідеальних, крім того, одним з основних завдань при конструюванні термобатарей було отримання струмів, близьких до оптимального, що можливо при використанні паралельно включених напівпровідникових стрижнів з максимальними значеннями коефіцієнтів термоерс. У зв'язку з цим були вибрані недефіцитні напівпровідникові матеріали з найвищими значеннями α і досить високими значеннями z : цинкова сурма [ZnSb(+)] та телуристий свинець [PbTe(-)], основні термодинамічні параметри яких наведені у табл. 1. Вибір зазначених матеріалів обумовлений також вимогами $\rho_1 \gg \rho_2$. Виконання записаної умови є гарантією того, що гілка з більш низькою ефективністю не вплине на z термобатареї. [11].

Таблиця 1

Термоелектричні і теплофізичні параметри напівпровідникових матеріалів, які застосовуються у термоелементах

Параметри	ZnSb (+)	PbTe (-)
Коефіцієнт термо-е.р.с., α , мкВ / °С	+200	-160
Електропровідність матеріалу гілок, σ , Ом ⁻¹ ·мм ⁻¹	3500	15000
Питомий опір матеріалу гілок, ρ , (Ом·мм ²)/м	0,059	0,221
Коефіцієнт теплопровідності матеріалу гілок, λ , Вт / (м·°С)	100	50
Питома теплопровідність матеріалу гілок, $\chi \cdot 10^3$, Вт / (мм·°С)	200	240
Коефіцієнт температуропровідності матеріалу гілок, $a \cdot 10^6$, м ² /с	39	30
Питома теплоємність матеріалу гілок, $c \cdot 10^3$, Дж/(кг·°С)	0,37	0,2
Ефективність, $Z \cdot 10^3$, 1/°С	0,8	0,9
Коефіцієнт Томсона, α_T , мкВ/°С	129	

Підставивши наведені у табл. 1 значення параметрів рівняння (7) отримали наступне вираз:

$$T = 7,299 \cdot T_0 - 12550,814 \pm 7,57 \sqrt{0,863 \cdot T_0^2 - 2756,062 \cdot T_0 + 2745927,3} \quad (10)$$

За результатами розрахунків було побудовано графічну залежність $T=f(T_0)$ (рис. 2, а), з якої випливає, що для забезпечення допустимого теплового режиму фрикційного вузла (для накладок, виготовлених із матеріалу ФК-24А, $T_d=390$ °С) температура гарячого спаю термоелектроохолодильника не повинна перевищувати 340 °С. Крім того, із рис. 2 б видно, що із збільшенням температури поверхні тертя гальма ефективність його охолодження стрімко зростає, що пояснюється збільшенням сили струму, який виробляється електрогенераторами на збігаючій гілці

стрічки. Термоелектричні інтенсифікатори теплообміну знижують енергонавантаженисть пар тертя стрічково-колодкового гальма на 18-20%.

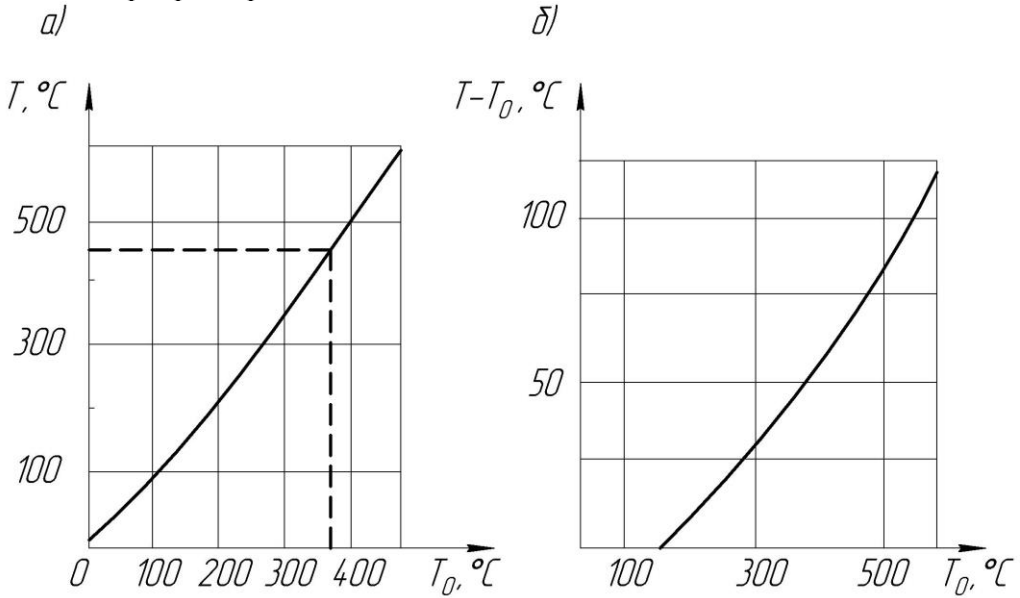


Рис. 2. Залежності: *a* – температури пар тертя стрічково-колодкового гальма (T) від температури гарячого спаю термоелектроохолодильника (T_0); *б* – ефективності охолодження пар тертя гальма ($T - T_0$) від температури їх нагрівання (T)

Таким чином, теоретично обґрунтовано доцільність та доведено ефективність термоелектричного охолодження важконавантажених фрикційних вузлів гальмівних пристроїв.

Принципи розробки пристроїв та систем термоелектричних інтенсифікаторів охолодження фрикційних вузлів. Для вирішення проблеми підвищення ефективності та надійності фрикційних вузлів гальмівних пристроїв на етапі проектування необхідно мати можливість розраховувати динамічні навантаження, які діють на їх пари тертя, давати оцінку втомної міцності та зносостійкості пар тертя гальм в екстремальних умовах навантаження, а також прогнозувати рівень поверхневих температур і оцінити ефективність його охолодження.

Основні принципи розробки конструкцій пристроїв і систем термоелектричного охолодження, підбору матеріалів для термоелементів, виготовлення, установки в або на деталі гальма та оцінки ефективності дії термоелектричних батарей в лабораторних та експлуатаційних умовах стосовно будь-якого типу гальма полягають у наступному:

1. Конкретизуються умови роботи термобатарей. Розробка конструкції пристроїв і систем термоелектричного охолодження ведеться стосовно гальмівних барабанів і колодок з фрикційними накладками (барабанно-колодкові гальма), гальмівного шків, стрічки і фрикційних накладок (стрічково-колодкові гальма), а також гальмівних суцільних і самовентильованих дисків і колодок з фрикційними накладками (дисково-колодкові гальма), використовуючи при цьому їх конструктивні особливості. Так, наприклад, для барабанно-колодкових гальм такими особливостями є: наявність орєбрення обода гальмівного барабана і колодок, товщина обода барабана і фрикційної накладки спільно з основою колодки, кількість

і розміри отворів під заклепки або болти в основі колодки, допустимий знос фрикційних накладок та ін. Інакше кажучи, необхідно раціонально використовувати будівні об'єми робочих деталей фрикційних вузлів гальм для встановлення в або на них термоелементів батарей з радіаторами. При цьому важливо знати теплонавантаженість пар тертя гальма в переважаючих режимах навантаження при експлуатації. Слід вибирати термоелектричні матеріали, які працюють у діапазоні об'ємних температур від 100 до 400 °С.

2. Вибір матеріалів для гілок та термоелементів є складним та відповідальним етапом, оскільки необхідно отримати гілки термобатарей із найбільшою рухливістю носіїв зарядів електрики. Значення термо-е.р.с. коливається не більше 160-200 мкВ/°С. Для гальмівних пристроїв необхідно використовувати напівпровідникові матеріали з величиною термо-е.р.с. в межах 170-180 мкВ / °С, так як значення α і σ (α - коефіцієнт термо-е.р.с, мкВ/°С; σ - електропровідність матеріалів гілок, Ом⁻¹·мм⁻¹) для таких матеріалів досягає своєї максимальної величини. Що стосується інших термоелектричних і теплофізичних параметрів, то вони повинні відповідати граничним рівням інтервалу їх зміни (для однієї гілки приймати максимальні значення, тоді для іншої - мінімальні і навпаки). Сказане відноситься до всіх параметрів, крім питомої теплопровідності та коефіцієнта температуропровідності.

3. Довжина гілки термоелементів визначається розрахунковим шляхом з урахуванням термоелектричних та теплофізичних параметрів залежно (8) з подальшим вибором їх поперечного перерізу. При цьому необхідною умовою є мінімальний перепад температур на кінцях термелементів.

4. Для підвищення ефективності термоелектричного охолодження шляхом збільшення температурного перепаду між гарячим та холодним спаєм термобатарей необхідно використовувати інші види охолодження, наприклад ефект теплової трубки. Останній використовується на холодному спаї термобатарей як радіатор. При застосуванні на холодних спаях термобатарей перемичок як радіаторів товщина останніх має перевищувати 5% від довжини гілки термоелементів [10, 12]. В іншому випадку ефективність термоелектричного охолодження падає через збільшення інерційності термобатарей.

5. Можливе досягнення теплової рівнонавантаженості як окремих зон фрикційних накладок, що мають набігаючі та збігаючі поверхні, так і кожної фрикційної накладки при роботі елементів термобатарей у режимі термоелектрогенератора та термоелектроохолодильника.

6. Застосування каскадного охолодження, тобто коли кілька термобатарей послідовно з'єднані, збільшує ефект зниження поверхневих температур фрикційних вузлів гальмівних пристроїв. Сутність такого типу охолодження полягає в наступному: гарячі спаї першої термобатарей відводять теплоту Q_1 безпосередньо від металевого фрикційного елемента при гальмуванні, друга батарея відводить теплоту Q_2 , що виділяється на гарячих спаях першої батареї, третя - теплоту Q_3 з гарячих спаяв другої і т. д. При цьому ефективність охолодження першого каскаду (термобатарей) найвища, що зумовлено максимальним для даної системи перепадом температур на спаях термоелементів.

Знання принципів розробки пристроїв та систем для термоелектричного охолодження пар тертя гальмівних механізмів дозволяє перейти до обговорення результатів досліджень.

Обговорення результатів. Теоретичні та експериментальні дослідження термоелектричних інтенсифікаторів охолодження в парах тертя гальм дозволили констатувати:

– реалізувати повну компенсацію теплоти Джоуля за допомогою розподіленого ефекту Пельтьє, що дозволить мати електропровідність на холодному кінці гілки на два порядки більше, ніж на гарячому, а модуль диференціальної термоерс вчетверо менший;

– враховувати фізико-енергетичні основи термоелектрики та не забувати, що рухливність електронів у чотири-шість разів більша, ніж дірок у матеріалі термоелектронів;

– для зниження об'ємної температури металевих фрикційних елементів гальм одночасно з використанням термоелектричного модуля необхідно зменшити термічний опір радіатора;

– однорідна за складом гілка термоелемента в режимі максимального перепаду температури не може мати однаково високого параметра ефективності Z по всій довжині гілки термоелемента;

– оптимізація гілки відповідно до максимального значення Z на холодному та гарячому кінцях та лінійному розподілі концентрації носіїв заряду не призводить до підвищення її ефективності через тепловиділення у розподіленому ефекті Пельтьє;

– розподілений ефект Пельтьє можна використовувати для часткової компенсації теплоти Джоуля та перерозподілу теплового балансу вздовж гілки термоелемента, що підвищує перетворення енергії у разі зниження середньої величини параметра ефективності Z ;

– ефективність примусового повітряного охолодження обода шків гальма за допомогою оребрення становить 6-8%, а термоелектричне охолодження - 18-20%.

Висновки. Таким чином, проведений порівняльний аналіз двох видів охолодження обода шків стрічково-колодкового гальма бурової лебідки та оцінена їх ефективність.

Список літератури

1. S. Dashevsky, S. Shusterman, M.P. Dariel, I. Drabkin. J. Appl. Phys., 92 (3), 1425 (2002).
2. A. E. Kaliazin, V. L. Kuznetsov, D. M. Rowe. Proc. 20th Int. Conf. on Thermoelectrics, Beijing, China, June, 8—11 (IEEE, Piscataway, NJ, 2001) p. 286.
3. Е. К. Иорданишвили. ФТГ, 8 (10), 3118 (1966).
4. Ю. И. Агеев, К. Ф. Иванова, М. А. Каганов, Л. С. Стыльбанс, Э. М. Шер. ЖТФ, 55 (11), 2266 (1985).
5. V. L. Kuznetsov. Functionally Graded Materials for Thermoelectric Application, In book: CRC Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano, ed. by D. M. Rowe (CRC Press, Taylor and Francis Group, Boca Ration, London – N. Y., 2006) chap. 38.
6. О. И. Марков. Докл. XIII Межгос. сем. «Термоэлектрики и их применения», 2013, с. 180.
7. О. И. Марков. ЖТФ, 91 (11), 1722 (2021).
8. Иванова К. Ф., Ривкин А. С. ЖТФ, 52(7), 1406 (1982).
9. Драбкин И. А. Термоэлектрические интенсификаторы теплообмена / И. А. Драбкин, Л. Б. Ершова. Физика полупроводников, 2021, том 56, вып. 1. С. 3-6.
10. Марков О. И. Вклад распределенного эффекта Пельтье в эффективность ветви термоэлектрического охладителя / О. И. Марков. Физика полупроводников, 2021, том 56, вып. 1. С. 48-52.

-
11. Термоэлектрические генераторы. Изд. 2-е, перераб. и доп. / А. С. Охотин, А. А. Ефремов, В. С. Охотин, А. С. Пушкарский. М., Атомиздат, 1976, 320 с.
12. Фрикционные узлы / А. А. Петрик, Н. А. Вольченко, П. Ю. Пургал, Д. А. Вольченко. Краснодар, 2003. – 220 с.

Стаття надійшла до редакції 12.02.2022.

Вольченко Микола Олександрович – канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри матеріалознавства та автосервіса Кубанського національного технологічного університета.

Журавльов Дмитро Юрійович – канд. техн. наук, доцент кафедри технічної механіки Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна, 76000, тел.: +38 0342 72 71 41, моб. 050-950-04-18, E-mail: dmytro.2103@ukr.net.

Ніщук Віктор Вікторович - викладач, майор кафедри військової підготовки Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна, 76019, тел.: +38 0342 50 25 06, E-mail: nviktorv@ukr.net.

Бурава Олександр Степанович – старший викладач, підполковник кафедри військової підготовки Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна, 76019, тел.: +38 0342 50 25 06, E-mail: burava2012@ukr.net.

Малик Леся Богданівна – канд. пед. наук, викладач ДВУЗ «Дрогобицький фаховий коледж нафти і газу», циклової комісії «Загальнотехнічних дисциплін», Львівська обл., м. Дрогобич, вул. М. Павлика, 5 б, 82100, Україна. Моб. тел.: [067 305 90 75](tel:0673059075) E-mail: drreg@ukr.net.

*M. O. VOLCHENKO, D. Yu. ZHURAVLEV, V. V. NISHCHUK, O. S. BURAVA,
L. B. MALYK*

THERMOELECTRIC HEAT TRANSFER INTENSIFIERS IN FRICTION PAIRS OF BRAKES

In the article questions are considered: features of work of thermoelectric intensifiers in pairs of friction of brakes; principles of development of devices and systems of thermoelectric cooling of friction units; discussion of results. It is noted that materials based on Bi₂Te₃ with a large temperature difference in the branch of the thermocouple have significantly less than its maximum value, the general efficiency parameter. This parameter is close to the maximum, and at each point of the branch it is recommended to maintain it by changing the composition of the material along the length of the thermocouple. Criteria of efficiency of application of such intensifiers are resulted and on this basis their work is analyzed. Estimates of the positive effect of the application of the thermoelectric module are given. It is established that the ribs of the pulley rim increase the heat transfer surface by up to 20% and at the same time reduce the energy load of the brake friction pairs by 6-8%. Thermoelectric heat exchange intensifiers reduce the energy load of the friction pairs of the belt-pad brake by 18-20%. A comparative analysis of two types of cooling of the rim of the pulley-block brake pulley of the drilling winch was carried out and their efficiency was evaluated. It is shown that mostly the use of the intensifier in the friction pairs of different types of brakes contributes to the intensification of heat transfer. The principles of development of devices and systems of thermoelectric cooling of friction knots of brakes used in mechanical engineering are offered.

Key words: thermoelectric cooler, heat exchange, intensifier, cooling efficiency of brake-friction pairs.

References

1. S. Dashevsky, S. Shusterman, M.P. Dariel, I. Drabkin. *J. Appl. Phys.*, 92 (3), 1425 (2002).
2. A. E. Kaliazin, V. L. Kuznetsov, D. M. Rowe. *Proc. 20th Int. Conf. on Thermoelectrics*, Beijing, China, June, 8—11 (IEEE, Piscataway, NJ, 2001) p. 286.
3. Ye. K. Iordanishvili. *FTG*, 8 (10), 3118 (1966).
4. Yu. I. Ageyev, K. F. Ivanova, M. A. Kaganov, L. S. Stil'bans, E. M. Sher. *ZHTF*, 55 (11), 2266 (1985).
5. V. L. Kuznetsov. *Functionally Graded Materials for Thermoelectric Application*, In book: *CRC Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano*, ed. by D. M. Rowe (CRC Press, Taylor and Francis Group, Boca Ration, London – N. Y., 2006) chap. 38.
6. O. I. Markov. *Dokl. KHIII Mezghos. sem. «Termoelektriki i ikh primeneniya»*, 2013, s. 180.
7. O. I. Markov. *ZHTF*, 91 (11), 1722 (2021).
8. Ivanova K. F., Rivkin A. S. *ZHTF*, 52(7), 1406 (1982).
9. Drabkin I. A. *Termoelektricheskiye intensifikatory teploobmena / I. A. Drabkin, L. B. Yershova. Fizika poluprovodnikov*, 2021, tom 56, vyp. 1. S. 3-6.
10. Markov O. I. *Vklad raspredelennogo efekta Pel't'ye v effektivnost' vetvi termoelektricheskogo okhladitelya / O. I. Markov. Fizika poluprovodnikov*, 2021, tom 56, vyp. 1. S. 48-52.
11. *Termoelektricheskiye generatory. Izd. 2-ye, pererab. i dop. / A. S. Okhotin, A. A. Yefremov, V. S. Okhotin, A. S. Pushkarskiy. M., Atomizdat, 1976, 320 s.*
12. *Friktsionnyye uzly / A. A. Petrik, N. A. Vol'chenko, P. YU. Purgal, D. A. Vol'chenko. Krasnodar, 2003. – 220 s.*