

537.322.11



Лобунець Ю.М.

Лобунець Ю.М.

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

## ТЕГ ТЕПЛООБМІННОГО ТИПУ ДЛЯ СУДНОВИХ СИЛОВИХ УСТАНОВОК. ЧАСТИНА II

---

*Здійснено аналіз характеристик термоелектричних генераторів теплообмінного типу, які використовують теплоту системи охолодження суднових двигунів. Окреслено перспективи застосування подібних ТЕГ.*

**Ключові слова:** термоелектричний генератор, низькопотенціальне джерело теплоти, суднові установки.

*The characteristics of heat exchange-type thermoelectric generators using the heat of marine engine cooling system are analyzed. The prospects of using such TEG are outlined.*

**Key words:** thermoelectric generator, low-grade heat source, marine propulsion plants

### Вступ

В роботі [1] проаналізовано схему термоелектричного генератора теплообмінного типу, що використовує теплоту вихлопних газів суднових дизельних двигунів. Було показано, що техніко-економічні показники такої схеми роблять можливим розраховувати на широке використання подібних ТЕГ на водному транспорті. Водночас у цій схемі наявне ще одне джерело вторинної енергії – теплота системи охолодження двигуна, на яку припадає до 10...15% витрат палива. Незважаючи на порівняно низький температурний потенціал, використання цього джерела може бути не менш привабливим через простоту схеми застосування – практично вона потребує лише заміни штатного теплообмінника термоелектричним генератором, який, виконуючи функції теплообмінника, одночасно генерує додаткову електричну потужність. Нижче розглянуто особливості такого ТЕГ та наведено оцінки його техніко-економічних характеристик.

### Схема ТЕГ теплообмінного типу для системи охолодження дизельної силової установки

У загальному випадку система охолодження суднової дизельної установки (рис. 1) включає два контури теплоносія, в одному з яких циркулює охолоджуюча рідина (прісна

вода або антифриз), а в другому – забортна вода. Оптимальна температура охолоджуючої рідини становить  $90...100^{\circ}\text{C}$ ; температура забортної води коливається в межах  $5...30^{\circ}\text{C}$ . Різниця температур теплоносія на вході й виході системи охолодження не повинна перевищувати  $5...10^{\circ}\text{C}$ . Витрати теплоносіїв в контурах визначаються потужністю силової установки й ефективністю теплообмінника. Найбільш ефективні системи охолодження використовують пластинчасті теплообмінники [2].

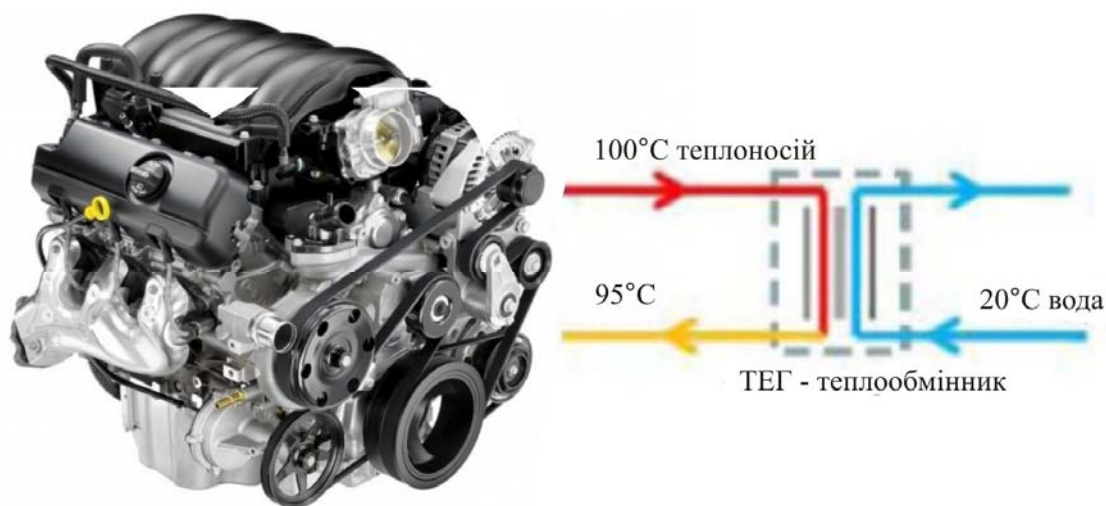


Рис.1. Схема ТЕГ для суднової установки.

Схема ТЕГ теплообмінного типу аналогічна схемі пластинчатого теплообмінника, в якому замість пластин встановлено термобатарей [3]. Термобатарей складаються з термоелектричних модулів, розміщених між двома металевими пластинами з чотирма отворами, що утворюють колектори для теплоносіїв. Батарей розділено еластичними прокладками, які формують канали для проходу теплоносіїв й ущільнюють всю конструкцію, яка затискається між двома торцевими плитами, рис.2.

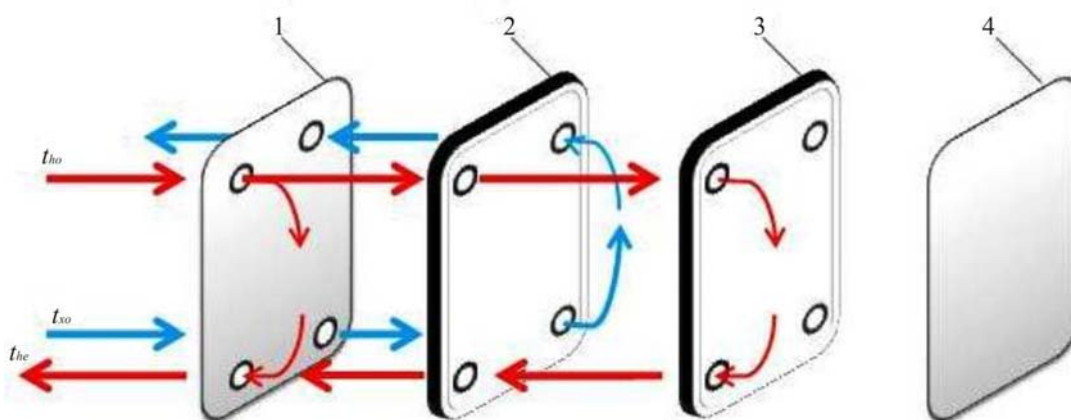


Рис.3. Схема ТЕГ теплообмінного типу  
1, 4 – торцеві плити (корпус ТЕГ), 2, 3 – термобатарей.

Головна функція ТЕГ теплообмінного типу в схемі, що розглядається, полягає в забезпеченні охолодження теплоносія до заданої температури. Одночасно необхідно оптимізувати параметри ТЕГ з метою одержання максимальної електричної потужності.

Вихідними параметрами задачі є:

$Q_o$  – теплова потужність теплообмінника (в наведених нижче розрахунках прийнято  $Q_o=10$  кВт) ;

$t_{ho}=100^{\circ}\text{C}$  – температура теплоносія на вході в ТЕГ;

$t_{he}=95^{\circ}\text{C}$  – температура теплоносія на виході з ТЕГ;

$t_{xo}=30^{\circ}\text{C}$  – температура забортної води.

### Математична модель ТЕГ

Розрахункову схему ТЕГ показано на рис.3.

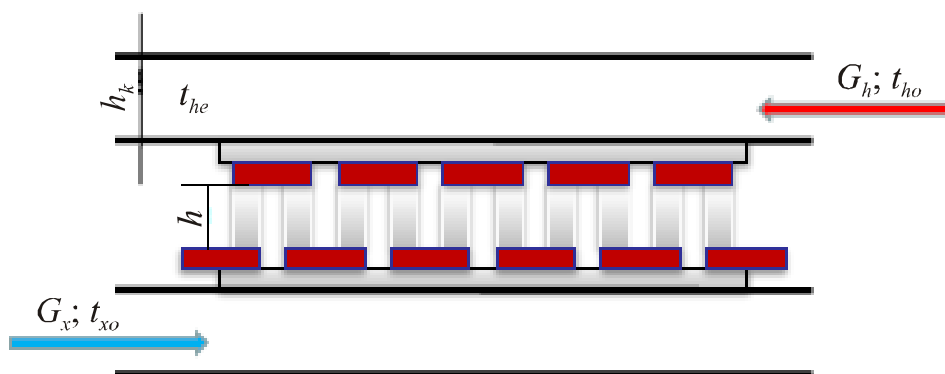


Рис.3 . Розрахункова схема ТЕГ.

У загальному випадку математична модель ТЕГ складається з системи рівнянь, які дають можливість визначити розподіл температур в теплоносіях та термоелементах [4]:

- рівняння для розподілу температур в термоелементах для граничних умов III роду –

$$\Theta(Y) = C_1 + C_2 Y - \frac{J^2}{2I_0} Y^2, \quad (1)$$

де постійні інтегрування  $C_1, C_2$  визначаються як

$$C_1(J + Bi_x) - C_2 = Bi_x \Theta_x, \quad (2)$$

$$C_1(Bi_h - J) + C_2(Bi_h - J + 1) = Bi_h \Theta_h + \frac{J^2}{I_0}(1 + 0.5Bi_h - J), \quad (3)$$

- рівняння для визначення коефіцієнтів тепловіддачі –

$$Nu = 0.022Re^{0.8}Pr^{0.43}, \quad (4)$$

- рівняння для визначення розподілу температур теплоносіїв вздовж каналу –

$$\frac{dvh}{dX} = \frac{dKih}{Wh}; \quad (5)$$

$$\frac{dvh}{dX} = \frac{dKix}{Wx};$$

$$Ki_h = Bi_h(\vartheta_h - \Theta_h); \quad (6)$$

$$Ki_x = Bi_x(\Theta_x - \vartheta_x).$$

У наведених вище рівняннях критерій  $Bi$  являє собою співвідношення термічного опору термоелектричного матеріалу та суми термічних опорів на шляху теплового потоку від поверхні термоелемента до теплоносія, тобто

$$Bi = R_o / R_t, \quad (7)$$

де  $R_t = \frac{1}{\alpha} + \sum_i \frac{hi}{\lambda i}$ ,  $hi$  та  $\lambda i$  товщина та коефіцієнт теплопровідності кожного з шарів на шляху теплового потоку (комутаційні елементи, теплоперехід, корпус термобатарей, прошарки припою і т.п.).

Оскільки система рівнянь (1– 7) є нелінійною, її розв'язання знаходимо числовими методами.

## Результати аналізу

Постановка задачі, що розглядається, жорстко регламентує параметри теплоносія в першому контурі й, відповідно, визначає його загальні витрати:

$$G_o = Q_o / [Cp(t_{ho} - t_{he})]. \quad (8)$$

Метою розрахунків є визначення загальної площі ТЕГ, що задовольняє вихідним умовам задачі. Оскільки ТЕГ складається з однакових термобатарей, на першому етапі слід визначити умови, за яких забезпечується заданий температурний режим теплоносія системи охолодження в межах однієї термобатарей. Тобто, для заданої конструкції термобатарей слід визначити необхідні витрати теплоносія  $G_i$  через один канал ТЕГ, за яких гарячий теплоносій охолоджується до заданої температури. Це дає можливість визначити необхідну кількість термобатарей  $n_b$ , а також температурний режим кожного модуля в

термобатареях, його потужність  $N_m$ , а також потужність термобатареї  $NS$  та генератора в цілому  $N_T$  –

$$N_m = \frac{E^2}{4R}; NS = \Sigma N_m; N_T = n_b NS, \quad (9)$$

де  $E = n_v e(T_h - T_x)$  – ЕРС модуля;  $R = n_v \frac{\rho h}{s}$  – його електричний опір.

Розподіл температур теплоносіїв та спаїв термоелементів вздовж термобатареї, яка складається з 10 модулів, ілюструє рис.4.

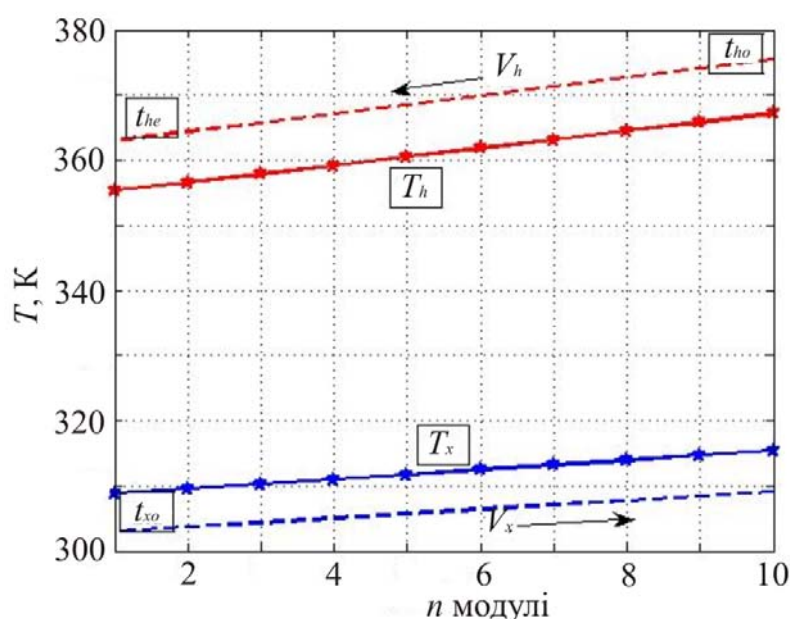


Рис.4. Розподіл температур уздовж термобатареї.

Наступне завдання – оптимізація параметрів термоелектричних модулів з метою забезпечення найкращої економічності ТЕГ. З огляду на те, що габарити термобатареї лімітовано розмірами корпусу штатного теплообмінника двигуна внутрішнього згорання (ДВЗ), практично єдиним незалежним параметром залишається висота термоелементів  $h$ , яка визначає термічний опір термобатареї і відповідно всі технічні параметри ТЕГ – необхідну кількість термобатареї та модулів, умови теплообміну в каналах, перепад температур на термоелементах, потужність генератора та його вартість.

Залежність потужності та ККД ТЕГ від висоти термоелементів наведено на рис.5. Очевидно, що збільшення висоти термоелементів забезпечує можливість більш повного використання наявного перепаду температур й відповідного зростання ККД термоелементів та загальної потужності ТЕГ. Однак зростання термічного опору термоелементів призводить до зниження коефіцієнта теплопередачі, що викликає необхідність збільшення поверхні теплообміну, тобто збільшення кількості термобатареї і зростання вартості ТЕГ. Залежність

необхідної кількості модулів від висоти термоелементів наведено на рис.6 (коливання кривих зумовлені дискретним характером математичної моделі – розміри ТЕГ можуть змінюватись тільки на цілочисельні значення кількості модулів).

Слід зазначити, що вартість окремого модуля також залежить від висоти термоелемента, оскільки змінюється необхідна кількість термоелектричного матеріалу. Залежність питомої вартості встановленої потужності ТЕГ від висоти термоелементів з урахуванням цього фактора, й без нього, наведено на рис.7 (за базову ціну прийнято роздрібну вартість модуля 40x40 мм з висотою термоелементів 2 мм –  $P_s=5\$US$ ; вартість термоелектричного матеріалу в ціні модуля становить 20%).

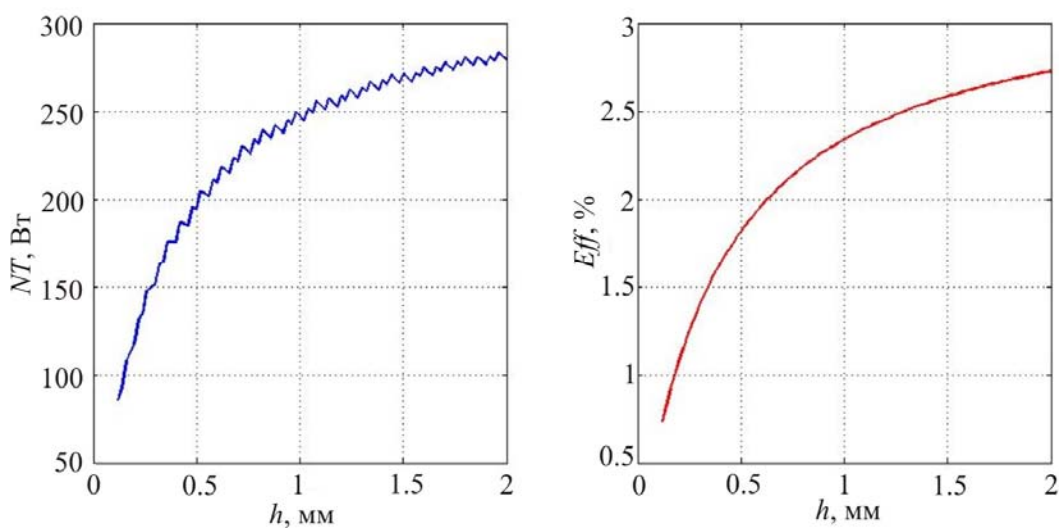


Рис.5. Залежності потужності ( $NT$ ) та ККД ( $Eff$ ) ТЕГ від висоти термоелементів  $h$ .

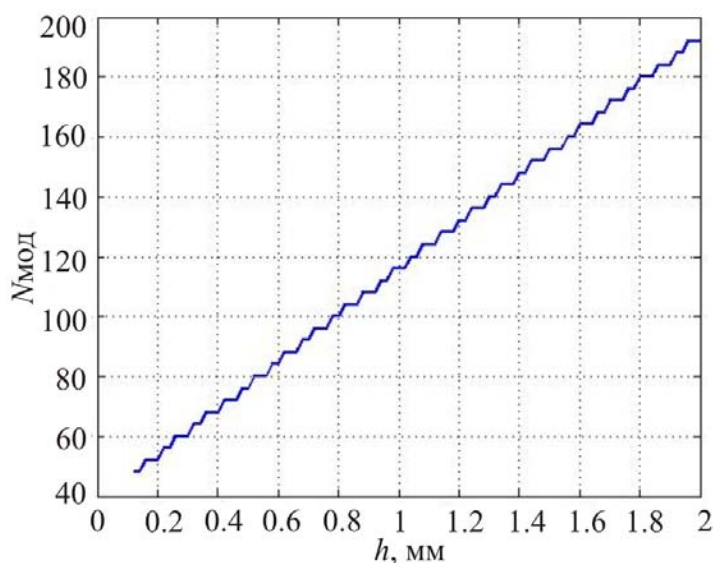


Рис.6. Залежність необхідної кількості модулів  $N_{mod}$  від висоти термоелементів  $h$ .

З наведених даних видно, що мінімальна питома вартість ТЕГ досягається в зоні відносно невеликих потужностей, тобто прагнення забезпечити максимальну потужність ТЕГ призводить до суттєвого зростання капітальних витрат.

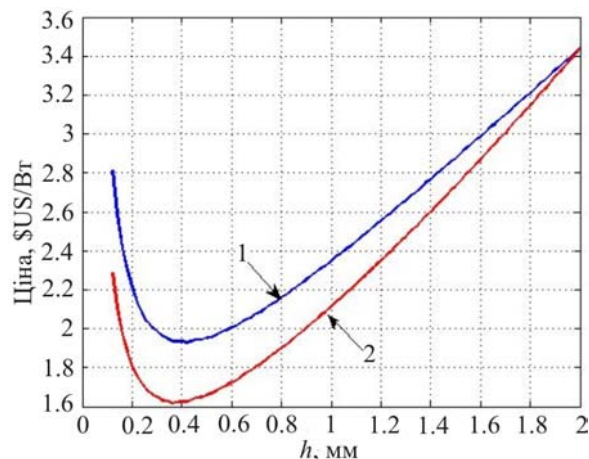


Рис.7. Залежність питомої вартості ТЕГ, \$US/Вт від висоти термоелементів  $h$ . 1. – без урахування впливу  $h$  на кількість матеріалу; 2. – з урахуванням впливу  $h$  на кількість матеріалу.

Для подолання цього протиріччя необхідно знайти компромісне рішення, яке забезпечить найкращі техніко-економічні характеристики ТЕГ. Як критерії для такого рішення можуть бути використані показники економії палива, або термін окупності ТЕГ, який можна вирахувати як

$$T_0 = \frac{\text{Price}}{\tau g P_f}, \text{ років} \quad (10)$$

де Price – питома вартість ТЕГ, \$US/кВт;  $g$  – питомі витрати палива на виробництво 1 кВт-години електроенергії судновою установкою (0.2 кг/кВт-годину);  $P_f$  – вартість палива (орієнтовно 1\$US/кг);  $\tau = 8640$  годин/рік.

Залежність строків окупності ТЕГ від висоти термоелементів ілюструє рис. 8.

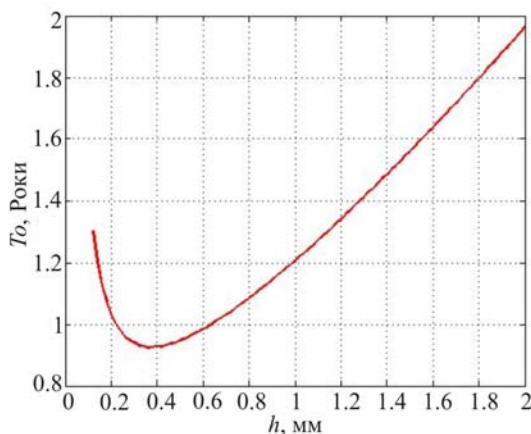


Рис. 8. Залежність строків окупності ТЕГ від висоти термоелементів  $h$ .



Як впливає з наведених даних, розглянута схема ТЕГ забезпечує цілком прийнятні техніко-економічні показники в широкому діапазоні можливих конструктивних рішень.

## Висновки

1. Розглянуто схему ТЕГ теплообмінного типу, що використовують як джерело енергії теплоту системи охолодження суднових силових установок.
2. Показано, що розглянута схема забезпечує цілком прийнятні терміни окупності, що дає можливість розраховувати на широке використання подібних ТЕГ на водному транспорті.

## Умовні позначення

$L$  – довжина термобатареї, см;  $b$  – ширина термобатареї, см;  $F$  – площа термобатареї,  $\text{см}^2$ ;  $h$  – висота термоелемента, см;  $n_v$  – кількість термоелементів в модулі;  $n_m$  – кількість модулів в термобатареї;  $P_{\$}$  – вартість модуля, \$US;  $X = \frac{x}{L}$ ,  $Y = \frac{y}{L}$ , – безрозмірні координати;  $G$  – витрати теплоносія, кг/с;  $C_p$  – питома теплоємність теплоносія, Дж/кгК;  $W = GC_p/b\lambda$  – безрозмірний водяний еквівалент;  $T$  – температура термоелемента;  $t$  – температура теплоносія;  $\Theta = T / T_p$  – безрозмірна температура термоелемента;  $\vartheta = \frac{t}{T_p}$  – безрозмірна температура теплоносія;  $T_p$  – визначальна температура;  $\sigma$  – коефіцієнт електропровідності,  $(\text{Ом}\cdot\text{см})^{-1}$ ;  $e$  – коефіцієнт термоЕРС, В/К;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності, Вт/смК;  $j$  – густина струму, А/см<sup>2</sup>;  $R_o = \frac{h}{\lambda}$  – термічний опір термоелектричного матеріалу,  $\text{см}^2\text{К}/\text{Вт}$ ;  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/см<sup>2</sup>К;  $K$  – коефіцієнт теплопередачі, Вт/см<sup>2</sup>К;  $z = e^2\sigma/\lambda$  – термоелектрична добротність,  $\text{К}^{-1}$ ;  $Io = zT_p$  – критерій Іоффе;  $Bi = \frac{h}{\lambda Rt}$  – критерій Біо;  $Ki$  – критерій Кирпічова;  $Nu$  – критерій Нуссельта;  $Re$  – критерій Рейнольдса;  $Pr$  – критерій Прандтля;  $J = \frac{jeh}{\lambda}$  – безрозмірна густина струму.

Індекси:  $h$  – гарячий;  $x$  – холодний.

## Література

1. Лобунець Ю.М. ТЕГ теплообмінного типу для суднових силових установок. Частина I// Термоелектрика. – 2014. – №5. – С.31 – 38.
2. <http://www.alfalaval.com/industries/marine/cooling-heating/pages/cooling-and-heating.aspx>
3. Лобунець Ю.М. Термоелектричний генератор//Патент України №8357 від 27.08.2013р.
4. Лобунець Ю.М. Аналіз характеристик термоелектричного генератора теплообмінного типу// Термоелектрика. – 2014. – №1. – С.54 – 61.

Надійшла до редакції 15.12.2015