

УДК 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

Здійснено аналіз характеристик термоелектричних генераторів теплообмінного типу, які використовують теплоту вихлопних газів 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 exhaust gas heat of marine engines are analyzed. The prospects of using such TEG are outlined.

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

Вступ

Використанню термоелектричних генераторів (ТЕГ) для утилізації енергії вихлопних газів автомобільних двигунів внутрішнього згоряння присвячено велику кількість робіт. Цей напрям вважається однією з перспективних сфер впровадження ТЕГ [1-8]. У той же час застосування ТЕГ у подібних схемах на водному транспорті є більш привабливим через відсутність суттєвих обмежень, характерних для автомобільного транспорту. В [7] наведено перелік переваг такого застосування:

- значно більші потужності силових установок;
- значно більший масштаб економії енергоресурсів;
- значно кращі умови охолодження (забортна вода);
- відсутність масо-габаритних обмежень;
- численні варіанти схем використання;
- можливість уніфікації ТЕГ, що забезпечує їх використання для суден будь-якого типу.

Умови використання ТЕГ на судах суттєво відрізняються від умов на автомобільному транспорті, тому ці застосування потребують окремих розробок. З огляду на велику потужність силових установок звичайні схеми автомобільних ТЕГ з розміщенням на вихлопній трубі для суднових установок непридатні. Розглядаються схеми з застосуванням термобатарей касетного типу, які розміщено в потоці вихлопних газів [8], або схеми з проміжним теплоносієм [4]. Досить ефективними також видаються схеми з застосуванням фазових переходів для транспортування теплової енергії - теплових труб [5] або двофазних

термосифонів [3], у яких термобатареї обігріваються парами теплоносія, що конденсуються на їх поверхні (рис. 1).

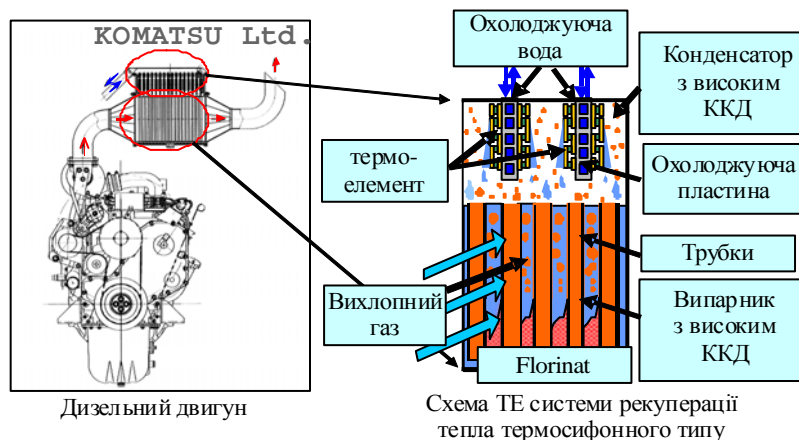


Рис. 1. Схема ТЕГ з використанням двофазного термосифону, [3].

На мій погляд, найбільш ефективною для застосування, що розглядається, може бути схема ТЕГ теплообмінного типу, запропонована в [9]. Вона допускає використання як рідкого теплоносія, так і пароподібного, забезпечує найбільш високу питому потужність, добре адаптується в технологічну схему силової установки. Нижче розглянуто основні особливості такого ТЕГ у поєднанні з судновою силовою установкою, проведено аналіз техніко-економічних показників схеми.

Схема ТЕГ теплообмінного типу для дизельної силової установки

Розподіл потоків енергії в судновому дизельному двигуні ілюструє рис. 2, з якого випливає, що з вихлопними газами втрачається приблизно 25% первинної енергії. Зазвичай температура газів дорівнює близько 500°C.



Рис.2. Розподіл потоків енергії в судновому дизельному двигуні, [7].

Схему ТЕГ, що розглядається, представлено на рис. 3.

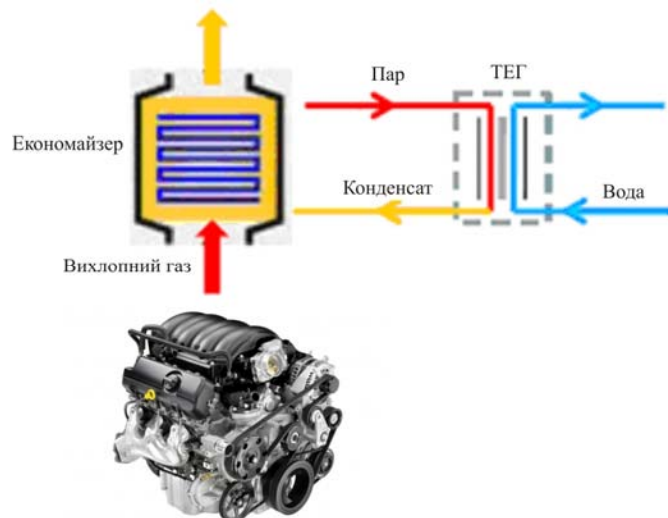


Рис.3. Схема ТЕГ для суднової установки.

Вихлопні гази з температурою $t_{hg}=500^{\circ}\text{C}$ від двигуна надходять до теплообмінника-економізатора, в якому підігрівають теплоносії, що надходить з ТЕГ, до точки кипіння. Пара з температурою t_{ho} надходить в канали, утворені термобатареями, де конденсується й повертається в економізатор. Охолодження термобатарей здійснюється забортною водою з температурою t_{xo} , яка циркулює крізь канали ТЕГ. Ущільнення термобатарей для запобігання витoku теплоносіїв здійснюється за допомогою прокладок спеціальної форми, які утворюють канали й колектори для проходу теплоносіїв.

Робоча температура теплоносія на вході в ТЕГ t_{ho} легко регулюється шляхом підтримання необхідного тиску в системі. Від вибору цього параметра в доступному інтервалі температур $t_{xo} < t_{ho} < t_{hg}$ значною мірою залежить ефективність системи та потужність ТЕГ. Зрозуміло, що з підвищенням t_{ho} зменшується кількість теплоти, що відбирається від вихлопних газів (Q_h), тобто зменшується ККД теплообмінника K_{heat} й кількість теплоносія, що генерується економізатором (G_h). За $t_{ho} \rightarrow t_h$; $Q_h \rightarrow 0$; а $K_{heat} \rightarrow 0$. З іншого боку, одночасно зростає робочий перепад температур на термоелементах й відповідно ККД ТЕГ. Під впливом цих факторів потужність ТЕГ досягає максимуму в межах наявного інтервалу температур (рис. 4). Як видно з наведених даних, у першому наближенні оптимальною є робоча температура $t_{ho}=(t_{hg}-t_{xo})/2$. У нашому випадку це відповідає приблизно $t_{ho}=250^{\circ}\text{C}$.

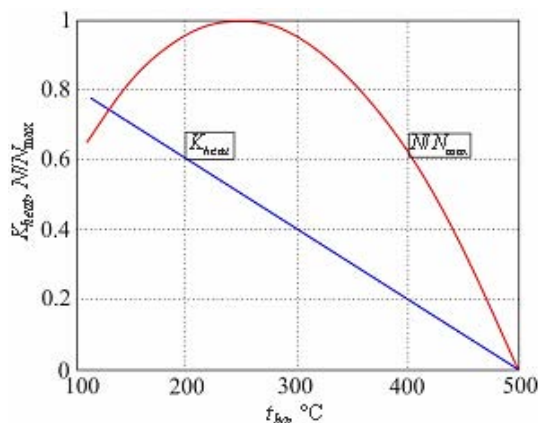


Рис.4. Залежність ефективності теплообмінника K_{heat} та потужності ТЕГ N від температури теплоносія на вході t_{ho} .

Іншим обмеженням на температуру теплоносія є допустимі робочі температури термоелектричного матеріалу та елементів конструкції. Для схеми, що розглядається, на даний момент критичною є максимально допустима робоча температура ущільнюючих прокладок, яка для серійних виробів становить 180°C.

Математична модель ТЕГ

З огляду на те, що нагрівання ТЕГ здійснюється за рахунок фазових переходів (конденсація), температуру гарячих спаїв термоелементів вздовж каналів можна вважати постійною. Наявність необмеженого джерела води для охолодження дає можливість прийняти припущення щодо незначних змін температури вздовж холодних каналів ТЕГ. У такому разі досить коректним буде використання математичної моделі термоелемента в граничних умовах III роду, без врахування змін температури вздовж термобатарей. Згідно з [10] запишемо рівняння для розподілу температур в ТЕГ у вигляді

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

Постійні C_1, C_2 визначаються як:

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

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

де

$$\Theta = \frac{T}{T_p} \text{ – безрозмірна температура термоелемента;}$$

$$\Theta = \frac{t}{T_p} \text{ – безрозмірна температура теплоносія;}$$

$$I_0 = zT_p \text{ – критерій Іоффе;}$$

$$Bi = \frac{h}{\lambda R_t} \text{ – критерій Біо;}$$

$$J = \frac{jeh}{\lambda} \text{ – безрозмірна щільність струму.}$$

Індекси h та x стосуються гарячої та холодної сторони ТЕГ відповідно.

У наведеному вище виразі для критерію Біо коефіцієнт R_t характеризує суму термічних опорів на шляху теплового потоку від поверхні термоелемента до теплоносія, тобто

$$Rt = \frac{1}{\alpha} + \sum_i \frac{h_i}{\lambda_i}, \quad (3)$$

де α – коефіцієнт теплообміну між теплоносієм та термобатареею; h_i та λ_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 – 3) нелінійна, її розв'язання знаходимо числовими методами.

Завдяки тому, що в схемі забезпечуються ізотермічні умови на поверхнях термобатарей, для її розрахунку та аналізу достатньо розглянути характеристики одного модуля з визначеними властивостями в умовах, які наведено вище. Максимальна потужність такого модуля в загальному випадку дорівнює

$$N_m = \frac{E^2}{4R}, \quad (4)$$

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

З урахуванням викладеного вище визначимо характеристики схеми ТЕГ, що розглядається, за таких вихідних даних:

- потужність дизельної установки $P = 1$ МВт (ентальпія газів $Q_h = 500$ кВт);
- температура гріючого теплоносія на вході в ТЕГ $t_{ho} = 180^\circ\text{C}$;
- температура води в системі охолодження $t_{xo} = 15^\circ\text{C}$;
- швидкість води в каналах охолодження ТЕГ – $V_x = 2$ м/с;
- ККД теплообмінника визначасмо, виходячи з відомої t_{ho} як $K_{heat} = (t_{hg} - t_{ho})/t_{hg} = 0,64$;
- добротність термоелектричного матеріалу $z = 0.0026 \text{ K}^{-1}$;
- кількість термоелементів в модулях $n_v = 526$;
- переріз термоелемента $s = 0.026 \text{ см}^2$;
- термічний опір $R_{t_x} = 1,7 \text{ см}^2\text{K/Вт}$; $R_{t_h} = 1,5 \text{ см}^2\text{K/Вт}$.

Як випливає з (1-4), характеристики схеми ТЕГ визначаються наявним перепадом температур $\Delta t_o = t_{ho} - t_{xo}$, властивостями термоелектричного матеріалу I_o , умовами теплообміну R_t та характеристиками модуля – n_v , h , s . З означених параметрів більшість є визначеною за умовами постановки задачі й має фіксовані значення. Лише характеристики модуля можна розглядати як незалежні параметри, які можна змінювати в досить широких межах. Зважаючи на те, що вплив n_v та s має екстенсивний характер, до незалежних параметрів слід віднести тільки висоту термоелементів h . Вплив висоти полягає в тому, що вона визначає термічний ($R_o = h/\lambda$) та електричний (R) опір термоелементів. Збільшення h призводить до зростання термічного опору й збільшення корисного перепаду температур, у той же час зростає й електричний опір модуля, що негативно впливає на його потужність. Внаслідок цього завжди можна знайти оптимальне значення h , яке забезпечує максимум потужності модуля (рис. 5 а). Залежність ККД модуля від h має монотонний характер, оскільки зростання термічного опору термоелемента одночасно призводить до зростання перепаду температур та зменшення теплового потоку крізь термоелементи (рис. 5 б).

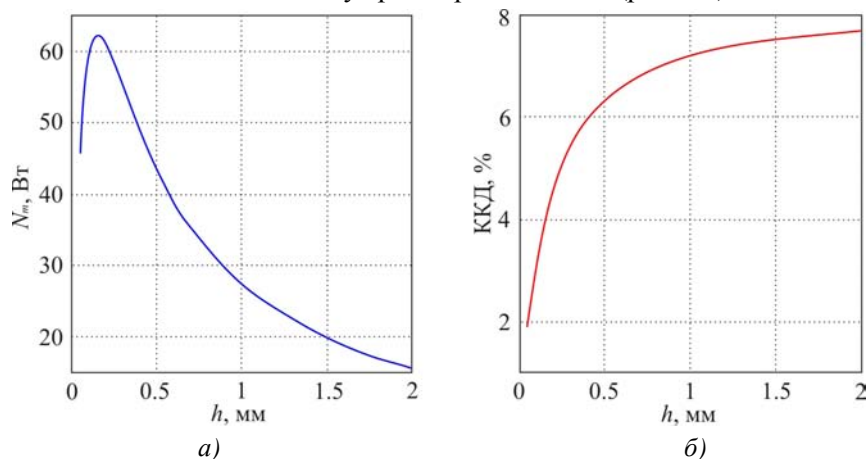


Рис. 5. Залежності потужності (а) та ККД (б) модуля від висоти термоелементів.

Аналіз задачі показує, що оптимальне співвідношення термічних опорів термоелемента R_o та теплопередачі R_t є постійним і завжди дорівнює $R_o/R_t = 2$ (рис. 6). Внаслідок цього режим максимальної потужності реалізується за перепаду температур, що дорівнює половині наявного (рис. 7). Зрозуміло, що збільшення R_t призводить до відповідного зменшення максимальної потужності.

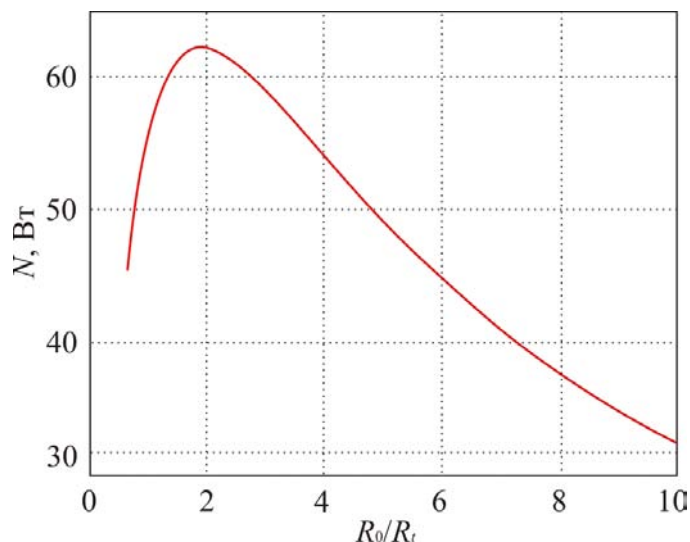


Рис.6. Залежність потужності модуля від співвідношення термічних опорів термоелемента R_o та теплопередачі R_t .

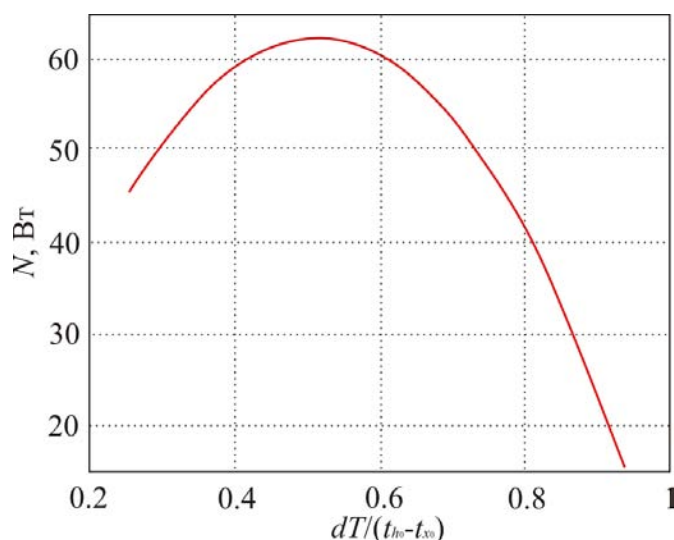


Рис. 7. Співвідношення між потужністю модуля N та перепадом температур, який є функцією висоти $\Delta T = f(h)$.

Знаючи тепловий потік крізь модуль Q_m , загальну кількість модулів у ТЕГ можна визначити як

$$n_m = Q_h K_{heat} / Q_m. \quad (5)$$

Сумарна потужність ТЕГ дорівнює відповідно

$$NS = n_m N. \quad (6)$$

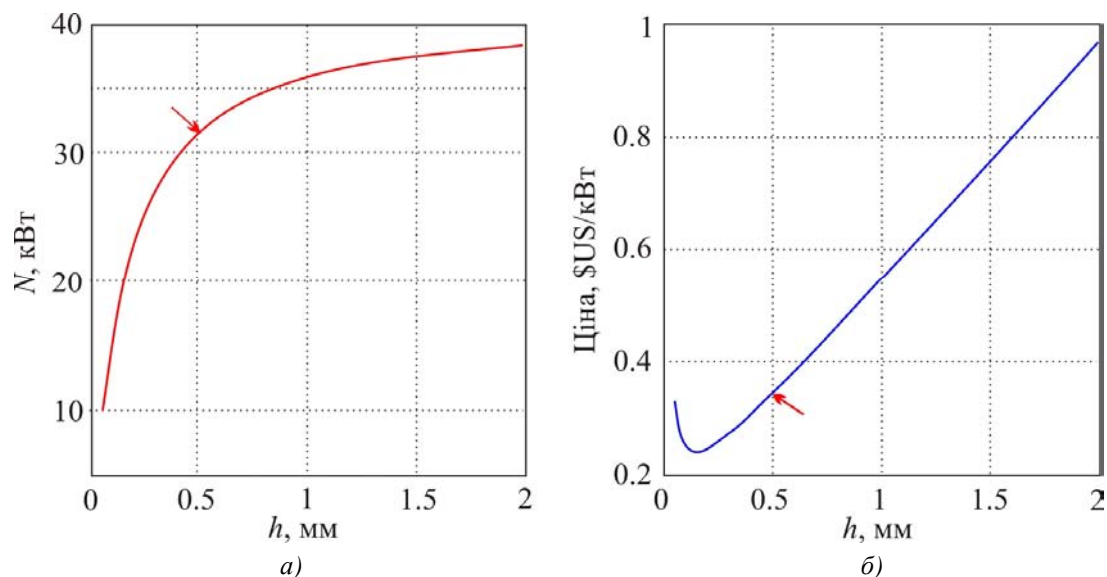


Рис. 8. Залежності потужності (а) та питомої вартості ТЕГ (б) від висоти термоелементів.

Як випливає з наведених на рис. 8 а даних, незважаючи на наявність екстремуму на кривій $N=f(h)$, залежність сумарної потужності ТЕГ від висоти термоелементів має монотонний характер і подібна до залежності ККД. Водночас слід мати на увазі, що за $h > h_{opt}$ значно зростає необхідна кількість модулів й відповідно вартість ТЕГ (рис. 8 б). Очевидно, що компромісним має бути вибір h у зоні прийнятної вартості ТЕГ, близько до лінії граничного значення N , так як це позначено стрілками на рис. 8. За такого підходу схема ТЕГ, що розглядається, забезпечує цілком прийнятні значення питомої вартості (на рівні 350 $\$/kW$), й ефективності (близько 5%). Слід відзначити також високу питому потужність такого генератора: за нашими оцінками розглянутий вище ТЕГ матиме габарити близько 250x700x300 мм. Ці дані не враховують вартість та габарити теплообмінника-економізатора. Для оцінки можливих масштабів застосування подібних ТЕГ можна зазначити, що морські судна середнього класу мають силові установки потужністю 10...15 МВт. Тобто, наприклад, використання розглянутої схеми ТЕГ на судні типу «Містраль» дало б можливість одержати додатково 400...500 кВт електричної потужності й забезпечити економію палива близько 100 літрів на годину.

Висновки

1. Розглянуто схему ТЕГ теплообмінного типу, що використовують як джерело теплоти вихлопні газы суднових силових установок.
2. Показано, що максимум потужності окремо взятого модуля в розглянутій схемі відповідає умові $R_o/R_t = 1$, в той час як загальна потужність ТЕГ може монотонно зростати до межі, яка лімітується теоретичним ККД, тобто визначається лише властивостями термоелектричного матеріалу.
3. Техніко-економічні показники розглянутої схеми дозволяють розраховувати на широке використання подібних ТЕГ на водному транспорті.

Література

1. Анатычук Л.И. Теория и компьютерное моделирование автомобильных термоэлектрических генераторов / Л.И. Анатычук, Р.В. Кузь // XIII Межгосударственный Семинар

- “Термоэлектрики и их применения”, 13-14 ноября 2012 г., ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург.
2. Anatyshuk L.I., Luste O.J., Kuz R.V. Theoretical and experimental studies of thermoelectric generator for vehicles // *Journal of Electronic Materials*. – 2011. – Vol. – 40. – Issue 5. – P.1326-1331.
 3. J.W.Fairbanks. Thermoelectric developments for vehicular applications// *Diesel Engine Efficiency and Emission Research Conference*, Detroit, August 24, 2006.
 4. Sumeet Kumar, Stephen D. Heister, Xianfan Xu, James R. Salvador and Gregory P. Meisner. Thermoelectric Generators for Automotive Waste Heat Recovery Systems. Part I: Numerical Modeling and Baseline Model Analysis// *Journal of Electronic Materials*. – 2013. – №4. – P.665-675
 5. Jorge Martins, Francisco P. Brito, L.M. Goncalves, Joaquim Antunes. Thermoelectric Exhaust Energy Recovery with Temperature Control through Heat Pipes// *Universidade do Minho, Portugal*, 2011. – Vol. – 5. – Issue1. – P.1-19.
 6. AleksanderKushch, Madhav Karri, Brian Helenbrook, Clayton J. Richter. The Effects of an Exhaust Thermoelectric Generator of a GM Sierra Pickup Truck//*2004 DEER Conference*. August 29-September 2, 2004, Coronado, California.
 7. Travis. T. Wallace. Development of Marine thermoelectric Heat recovery Systems. // *2011 DOE Thermoelectric Applications Workshop*, January 5, 2011.
 8. <http://www.alphabetenergy.com/product/e1/>
 9. Лобунець Ю.М. Термоелектричний генератор Ю.М. Лобунець // Патент України №8357 від 27.08.2013р.
 10. Лобунець Ю.М. Про критерії ефективності термоелектричних перетворювачів енергії / Ю.М. Лобунець // *Термоелектрика*. – 2014. – №2. – С.68 – 84.

Надійшла до редакції 20.11.2014