

Анатичук Л.І., Кузь Р.В.



Анатичук Л.І.

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

ВПЛИВ ПОВІТРЯНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ СЕКЦІЙНОГО ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ АВТОМОБІЛЯ З ДИЗЕЛЬНИМ ДВИГУНОМ



Кузь Р.В.

У роботі розглянуто фізичну модель секційного термогенератора (ТЕГ) для дизельного двигуна з системою відводу тепла від ТЕГ, що містить повітряно-рідинний теплообмінник і електричний вентилятор. Наведено математичний опис моделі. Розроблено комп'ютерну модель секційного ТЕГ. Здійснено моделювання для дизельного двигуна потужністю 75 кВт. Знайдено оптимальні гарячі температури секцій генератора й оптимальні потужності вентилятора, за яких досягається максимальна корисна потужність і відповідно максимальний реальний ККД ТЕГ з урахуванням витрат на живлення вентилятора за температур навколишнього середовища в інтервалі $-40...+50^{\circ}\text{C}$. Наведено порівняння ККД секційного генератора з раніше отриманими значеннями для односекційного ТЕГ. Показано, що реальний ККД секційного ТЕГ з системою відводу тепла в 1.2 – 1.4 рази вищий, ніж для односекційного.

Ключові слова: рекуперация тепла, термоелектричний генератор, двигуни внутрішнього згорання.

The paper is concerned with a physical model of sectional thermoelectric generator (TEG) for a diesel engine with a system of heat removal from TEG comprising an air-to-liquid heat exchanger and an electric fan. A mathematical description of the model is presented. A computer model of sectional TEG is developed. Computer simulation for a 75 kW diesel engine is performed. The optimal hot temperatures of the generator sections and the optimal fan powers whereby maximum net power is attained and, accordingly, maximum real efficiency of TEG with regard to expenditures on the fan supply for ambient temperatures in the range of $-40...+50^{\circ}\text{C}$ are found. A comparison of sectional generator efficiency to the previously obtained values for one-section TEG is made. It is shown that a real efficiency of sectional TEG with a heat removal system is 1.2 – 1.4 times higher than that of one-section TEG.

Keywords: heat recovery, thermoelectric generator, internal combustion engines.

Вступ

Використання відходів тепла від двигунів внутрішнього згорання – актуальне практичне застосування термоелектрики. Його метою є економія палива за рахунок використання відходів тепла двигуна для генерації електричної енергії [1, 2]. Відомо, що наявність термоелектричного генератора у складі автомобіля суттєво впливає на його роботу. Одним з негативних чинників, які знижують ефективність ТЕГ є витрати, пов'язані з необхідністю відводу тепла від термоелектричного генератора. Детальну оцінку витрат на тепловідведення від односекційного

термоелектричного генератора для автомобілів з різними типами двигунів наведено у роботах [3, 4]. Показано, що затрати на відвід тепла від односекційного ТЕГ теплообмінниками з електроventильторами можуть досягати 15-25% від виробленої ТЕГ електричної енергії. Також встановлено, що ефективність тепловідводу від ТЕГ для автомобіля має оптимальні значення, які залежать від потужності живлення системи тепловідводу та температури навколишнього повітря. Актуальним є подальше дослідження з метою встановлення аналогічних закономірностей для секційних ТЕГ, тому що, як відомо [1, 2], використання секційних ТЕГ забезпечує вищу ефективність рекуперації скидуваного тепла.

Мета цієї роботи – створити методичку комп'ютерного моделювання секційного термоелектричного генератора для автомобіля з дизельним двигуном та рідинно-повітряним охолодженням і перевірити ефективність методу для конкретного випадку двигуна та термогенератора.

Фізична модель секційного термоелектричного генератора для автомобіля

Детально фізичну модель автомобіля з односекційним ТЕГ, де враховано забезпечення тепловідводу від ТЕГ, та її математичний опис розглянуто в [3]. Відмінністю моделі в цій роботі є те, що ТЕГ містить 3 секції. Як показано в [6], секціонування дає можливість підвищити ефективність ТЕГ, проте використання більшої кількості секцій не раціональне. Тому зупинимось детальніше на моделі ТЕГ.

Розрахунок максимальної ефективності секційного термоелектричного генератора проводився за методикою [1]. Розглянемо ТЕГ, що складається з 3-х секцій, з'єднаних послідовно відносно потоку гарячого газу й холодного теплоносія (рис. 1).

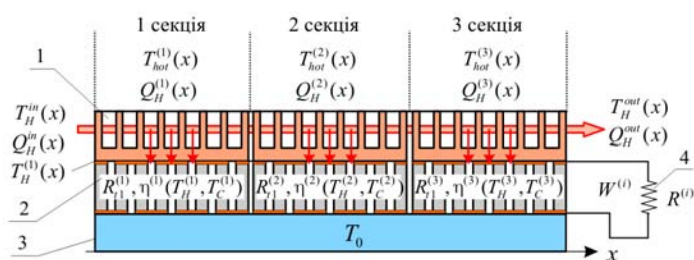


Рис. 1. Фізична модель секційного термоелектричного генератора:

- 1 – гарячий теплообмінник; 2 – термоелектричні батареї; 3 – холодний теплообмінник;
- 4 – узгоджене електричне навантаження секції.

Кожна секція ТЕГ складається з гарячого теплообмінника (1), термоелектричної батареї (2) з тепловим опором $R_{t2}^{(i)}$ і коефіцієнтом корисної дії $\eta(T_H, T_0)$; холодного теплообмінника (3) з температурою T_0 . Термоелектричні батареї кожної із секцій навантажені на узгоджене електричне навантаження $R^{(i)}$ (4). Вхідний потік гарячого газу має температуру T_H^{in} і теплову потужність Q_H^{in} . Гарячий газ віддає частину тепла $Q_H^{(i)}(x)$ за температури $T_{hot}^{(i)}(x)$ гарячому теплообміннику. На виході ТЕГ потік газу має температуру T_H^{out} й теплову потужність Q_H^{out} . З гарячого теплообмінника тепло передається термоелектричній батареї, нагріваючи її гарячу сторону до температури $T_H^{(i)}(x)$. Холодна сторона термоелектричних батарей підтримується за температури T_0 . Для розрахунків максимально можливої потужності ТЕГ будемо нехтувати тепловими втратами.

Математичний та комп'ютерний опис моделі

Для оптимізації термоелектричного генератора необхідно знайти розподіли температур та теплових потоків у термоелектричних батареях кожної з секцій. Такий розрахунок для показаної моделі можливий тільки з застосуванням комп'ютерного моделювання.

Розглянемо одну із секцій генератора та умовно розділимо її на 3 області $\Omega_1 - \Omega_3$ з границями $g_1 - g_{10}$ (рис. 2). Область Ω_1 являє собою гарячий теплообмінник з теплоносієм, область Ω_2 – термоелектричну батарею, область Ω_3 – гарячий та холодний теплообмінники.

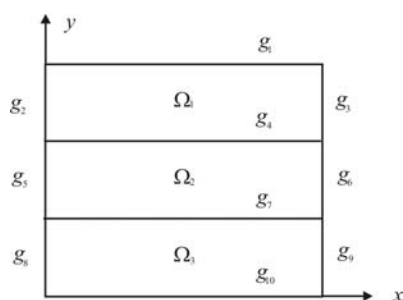


Рис. 2. Комп'ютерне представлення областей та границь секції ТЕГ.

В області Ω_1 наявне масоперенесення гарячого теплоносія. Для цієї області рівняння теплопровідності матиме вигляд

$$-\nabla(\kappa_H(T)\nabla T) = -\rho_H(T)C_H(T)\vec{v}\nabla T, \quad (1)$$

де ρ_H – густина газу, C_H – теплоємність газу, κ_H – теплопровідність газу, v_H – швидкість руху газу. Граничні умови для області Ω_1 враховують неперервність потоку газу в межах секції та між секціями, потік тепла через теплообмінники.

В області Ω_2 наявне виділення тепла Джоуля в термоелектричній батареї. Для області Ω_2 рівняння теплопровідності має вигляд

$$-\nabla(\kappa_{TE}(T)\nabla T) = Q_J, \quad (2)$$

де κ_{TE} – ефективна теплопровідність термоелектричної батареї, Q_J – тепло Джоуля, що виділяється в об'ємі термоелектричної батареї.

Граничні умови для області Ω_2 враховують взаємодію термобатареї з теплообмінниками.

Область Ω_3 в цій моделі ТЕГ вважається термостатованою з температурою T_0 .

Сукупність граничних умов математично виражається таким чином:

$$g1: \quad q_1^{(i)}(x) = 0, \quad (3)$$

$$g2, g3: \quad Q_H^{in(1)} = Q_H^{in}, \quad Q_H^{in(i+1)} = Q_H^{out(i)}, \quad Q_H^{out(N)} = Q_H^{out}, \quad (4)$$

$$g4: \quad Q_H^{(i)}(x) = (T_H^{(i)}(x) - T^{(i)}(x)) / R_{t1}^{(i)} \quad (5)$$

$$g5, g6: \quad q_4^{(i)}(y) = 0, \quad (6)$$

$$g7: \quad Q_C^{(i)}(x) = (T_C^{(i)}(x) - T^{(i)}(x)) / R_{t2}, \quad (7)$$

$$T(x) = T_0 \quad (7)$$

$$\Omega_3, g8, g9, g10: \quad T(x, y) = T_0. \quad (8)$$

Сукупність рівнянь (1)-(2) з граничними умовами (3-8) робить можливим знайти поле температур $T(x, y)$ в ТЕГ та визначити розподіл температур $T_H^{(i)}(x)$ по гарячих сторонах термоелектричних батарей секцій.

Тоді потужність кожної секції можна визначати з наступного виразу:

$$W^{(i)} = \int Q_H^{(i)}(x) \eta(T_H^{(i)}(x), T_C^{(i)}(x)) dx. \quad (9)$$

Загальна потужність генератора

$$W_{TEG} = W^{(1)} + W^{(2)} + W^{(3)}. \quad (10)$$

ККД термоелектричного генератора

$$\eta_{TEG} = \frac{W_{TEG}}{Q_H^{in}}. \quad (11)$$

Для розрахунку електричної потужності ТЕГ з урахуванням забезпечення роботи системи тепловідводу необхідно знати ефективність повітряно-рідинного теплообмінника

$$Q_{cool} = f(W_{cool}, T_L, T_A), \quad (12)$$

де Q_{cool} – теплова потужність системи тепловідводу, W_{cool} – електрична потужність живлення системи тепловідводу, T_L – температура рідини, T_A – температура повітря. Така залежність отримана з експериментальних досліджень теплообмінника [3].

Ефективний ККД ТЕГ вводиться виразом:

$$\eta_{ef} = (W_{TEG} - W_{cool}) / Q_{in}. \quad (13)$$

Система рівнянь (1)-(2) з граничними умовами (3)-(8) розв'язувалася методом скінченних елементів [6] на двомірній сітці.

На рис. 3 наведено приклад розрахованого комп'ютерним моделюванням двомірного температурного поля в секціях ТЕГ.

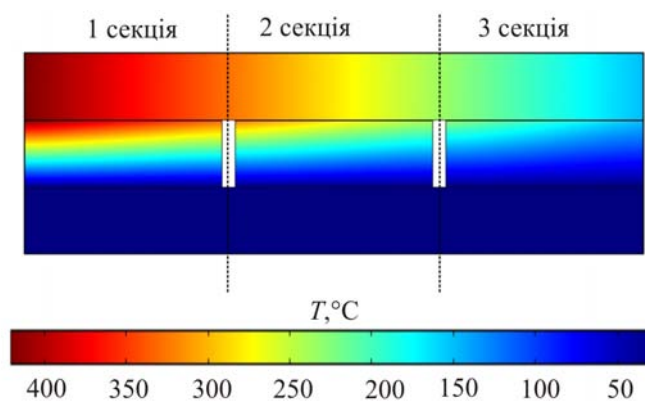


Рис. 3. Розподіл температури в секціях ТЕГ.

Подальша оптимізація ТЕГ полягає у знаходженні оптимальних гарячих температур секцій варіацією теплових опорів секцій для досягнення максимального інтегрального ККД ТЕГ.

Приклад розрахунку параметрів ТЕГ

Для прикладу розрахуємо основні параметри секційного ТЕГ для дизельного двигуна потужністю 75 кВт, з температурою вихлопних газів 420°C.

Для розрахунку ККД та потужності було обрано термоелектричні матеріали на основі *Bi-Te*, які є одними з кращих за добротністю в робочому діапазоні температур ТЕГ для дизельних двигунів [6]. Необхідні для розрахунків характеристики повітряно-рідинного теплообмінника взято з роботи [3].

Оптимізація гарячої температури ТЕГ. Спочатку здійснювалась оптимізація гарячих температур секцій ТЕГ за методикою [2]. На рис. 4 наведено приклад такої оптимізації для третьої секції ТЕГ. Як видно, наявний оптимум по ККД ТЕГ, залежний від гарячої та холодної температур. На рис. 5 наведено значення оптимальних гарячих температур секцій в залежності від їх холодної температури.

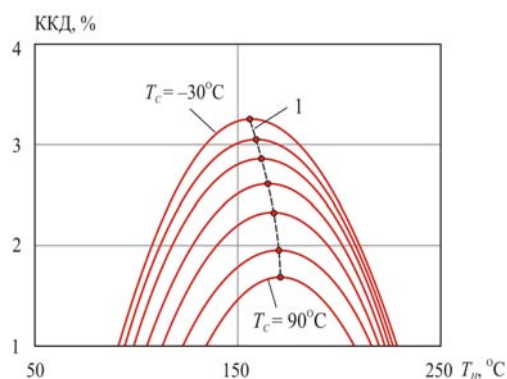


Рис. 4. Залежність ККД 3-ї секції ТЕГ від гарячої температури секції. T_c змінюється від -30°C до $+90^\circ\text{C}$. 1 – оптимальні гарячі температури.

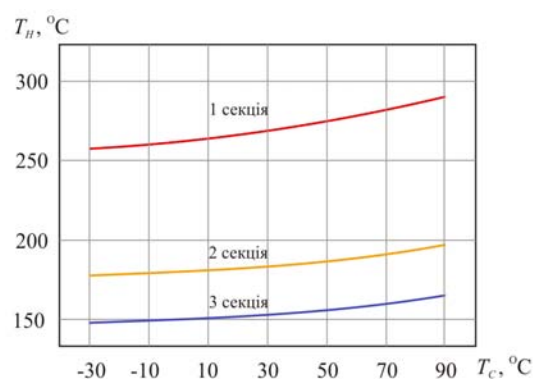


Рис. 5. Залежність оптимальної гарячої температури секцій ТЕГ від їх холодної температури.

Оптимізація системи тепловідводу. Розрахунок оптимальних витрат на відвід тепла від секцій ТЕГ робився за методикою [3, 4]. На рис. 6 наведено величину теплової потужності, яку необхідно відводити від ТЕГ залежно від холодної температури ТЕГ.

На рис. 7. наведено величини ККД кожної з трьох секцій ТЕГ та інтегрального ККД ТЕГ залежно від холодної температури ТЕГ.

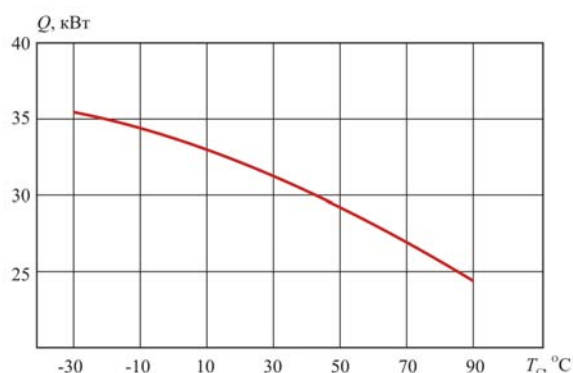


Рис. 6. Залежність теплової потужності, яку потрібно відводити від ТЕГ від холодної температури ТЕГ.

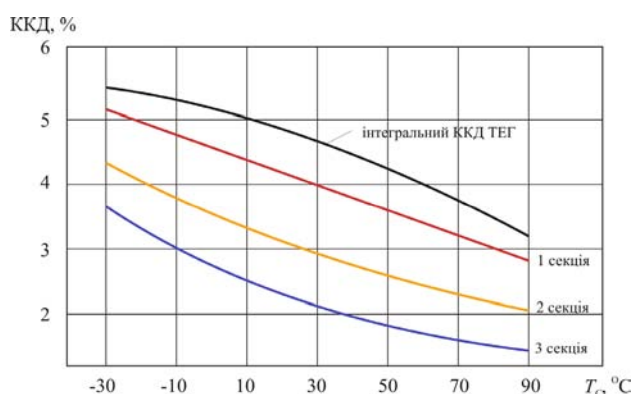


Рис. 7. Залежність ККД секцій та інтегрального ККД ТЕГ від температури холодної сторони ТЕГ.

На рис. 8 наведено результати оптимізації системи «ТЕГ-система охолодження» для різних температур навколишнього середовища T_{amb} . Тут показано величини оптимальних потужностей вентилятора системи охолодження. Вони становлять $\sim 14\% \dots 24\%$ від потужності термогенератора. На рис. 9 показано залежність електричної потужності ТЕГ з урахуванням витрат на тепловідвід.

На рис. 10 наведено порівняння ККД односекційного ТЕГ [3] та трисекційного ТЕГ, проаналізованого в цій роботі.

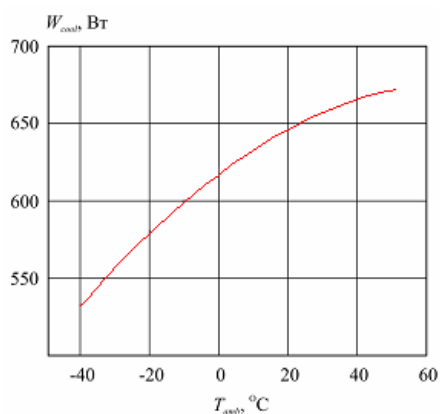


Рис. 8. Залежність оптимальної електричної потужності системи охолодження ТЕГ від температури навколишнього середовища.

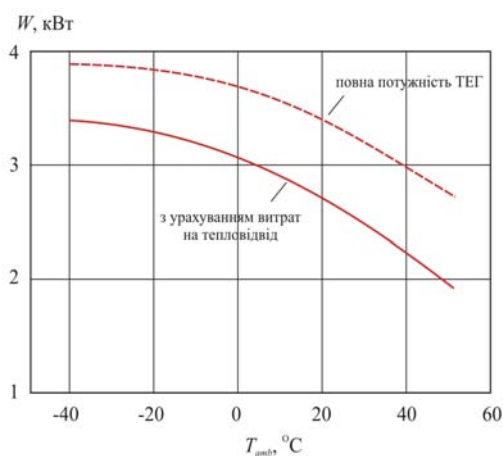


Рис. 9. Залежність електричної потужності ТЕГ від температури навколишнього середовища.

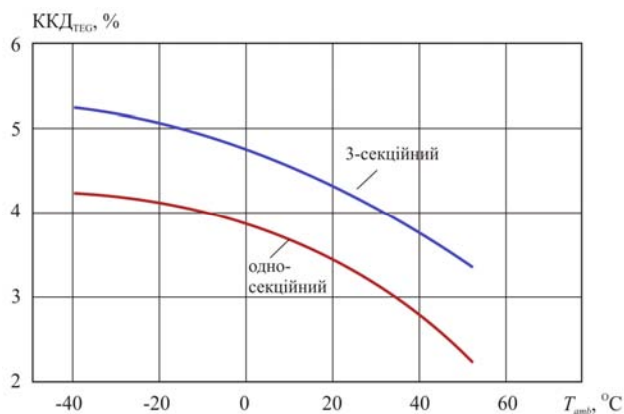


Рис. 10. Залежність ККД ТЕГ від температури навколишнього середовища.

Видно, що використання секцій у генераторі за однакових інших умов дає кращі показники по ККД. Використання секцій дає можливість забезпечити в 1.2 -1.4 рази вищу ефективність ТЕГ. Відповідно до результатів роботи [3] це може дати економію палива близько 3-7%.

Висновки

1. Створено фізичну модель трисекційного термоелектричного генератора для автомобіля з дизельним двигуном. Наявність трьох секцій попередньо була обґрунтована під час дослідження багатосекційного генератора. Здійснено математичний опис трисекційного генератора та розроблено програмне забезпечення для його дослідження й оптимізації.
2. Ефективність комп'ютерного моделювання продемонстровано на конкретному варіанті генератора

- для автомобіля з дизельним двигуном потужністю 75 кВт. Отримано залежності оптимальних значень температур гарячих сторін секцій залежно від температури холодної сторони ТЕГ в інтервалі –30...+90 °С. Встановлено, що з підвищенням температури холодної сторони оптимальні температури гарячої сторони також зміщуються в область вищих значень.
3. Здійснено оптимізацію системи тепловідводу. Знайдено оптимальні витрати електричної енергії на відвід тепла. Встановлено, що ці витрати зростають від 530 Вт до 670 Вт зі збільшенням температури навколишнього середовища від –40 °С до +50 °С.
4. Визначено потужність ТЕГ залежно від температури навколишнього середовища. Встановлено, що найвище значення потужності (~4 кВт) досягається за $T_{amb} = -40^{\circ}\text{C}$ і зменшується до 2.8 кВт при $T_{amb} = +50^{\circ}\text{C}$. Частина цієї енергії витрачається на забезпечення відводу тепла від ТЕГ. З урахуванням цих витрат потужність генератора при $T_{amb} = -40^{\circ}\text{C}$ становить 3.2 кВт і зменшується до 2 кВт за $T_{amb} = +50^{\circ}\text{C}$.
5. Знайдено значення ККД секцій та інтегрального ККД ТЕГ залежно від температури холодної сторони ТЕГ. Найбільші значення ККД отримані на першій секції, до якої безпосередньо підводиться вихлопний газ від двигуна. ККД змінюється від ~5% до 3% зі зміною холодної температури ТЕГ в інтервалі –30...+90 °С. Наступна секція, до якої підводиться газ, що пройшов першу секцію, реалізує значення ККД від 4.3% до 2%. Третя секція, якою утилізується тепло вихлопних газів, що пройшли першу і другу секції, дає найменші значення ККД в інтервалі 3.6...1.4%. При цьому інтегральний ККД є найвищим за $T_c = -30^{\circ}\text{C}$ і становить ~5.5%. Він зменшується до 3.2% за $T_c = +90^{\circ}\text{C}$.
6. Порівняння ККД односекційного генератора з трисекційним демонструє зростання ККД за використання 3-х секцій від 4.2% до 5.2% при $T_{amb} = -40^{\circ}\text{C}$. ККД трисекційного генератора залишається вищим і за більш високих температур навколишнього середовища. За $T_{amb} = +50^{\circ}\text{C}$ ККД трисекційного ТЕГ становить 3.3%, в той час як ККД односекційного ТЕГ становить всього 2.2%.
7. В цілому здійснені дослідження демонструють переваги трисекційного ТЕГ у електричній потужності та ККД в 1.2...1.4 рази. Отримані результати також підтверджують ту обставину, що ТЕГ для дизельного двигуна є більш ефективним при експлуатації за низьких температур навколишнього середовища. Витрати електричної енергії на забезпечення відводу тепла від ТЕГ також мінімальні.

Література

1. Анатичук Л.І. Ефективність термоелектричних рекуператорів тепла вихлопних газів двигунів внутрішнього згорання / Л.І. Анатичук, Р.В. Кузь, Ю.Ю. Розвер // Термоелектрика, 2011. – №4. – С.78-83.
2. Анатичук Л.І. Термоелектричний генератор для бензинового двигуна / Л.І. Анатичук, Р.В. Кузь, Ю.Ю. Розвер // Термоелектрика, 2012. – №2. – С.93-100.
3. Анатичук Л.І. Вплив повітряного охолодження на ефективність термоелектричного генератора дизельного автомобіля / Л.І. Анатичук, Р.В. Кузь, Ю.Ю. Термоелектрика, 2014. – №2. – С.60-67.
4. Анатичук Л.І. Вплив повітряного охолодження на ефективність термоелектричного генератора бензинового автомобіля / Л.І. Анатичук, Р.В. Кузь, Ю.Ю. // Термоелектрика, 2014. – №3. – С.87-91.
5. PTC Mathcad – Engineering Calculations Software. www.ptc.com.
6. Anatychuk L.I., Kuz' R.V. Materials for vehicular thermoelectric generators // Proc. of ICT-2011, Michigan, USA.
7. Кузь Р.В. Компьютерное моделирование термоэлектрического однокаскадного генераторного модуля / Кузь Р.В., Струтинский М.Н. // Термоэлектричество, 2010. – №3. – С. 22-28.

Надійшла до редакції 17.10.2014