



Анатичук Л.І.

Анатичук Л.І. акад. НАН України

Лисько В.В. канд. фіз.-мат. наук



Лисько В.В.

¹Інститут термоелектрики НАН і МОН України,
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна,
e-mail: anatysh@gmail.com;

²Чернівецький національний університет
імені Юрія Федьковича, вул. Коцюбинського 2,
Чернівці, 58012, Україна

КОМП'ЮТЕРНЕ ПРОЕКТУВАННЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ ДЖЕРЕЛА ТЕПЛА ТА ЕЛЕКТРИКИ ДЛЯ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ ВЕЛИКОЇ ПОТУЖНОСТІ

Розглянуто фізичну модель термоелектричного генератора для автономної системи передпускового розігріву транспортних засобів великої потужності. Шляхом комп'ютерного проектування визначено конструкції теплообмінників систем підведення та відведення тепла, які дозволяють забезпечити оптимальний режим роботи термоелектричних модулів. Розроблено конструкцію термоелектричного генератора електричною потужністю до 350 Вт, якої вистачатиме для живлення електричною енергією передпускових нагрівників тепловою потужністю 25-30 кВт. Така система, з врахуванням теплової енергії термоелектричного генератора, буде еквівалентною більш потужним передпусковим нагрівникам (36 – 40 кВт), але не потребуватиме при роботі використання електричної енергії акумулятора. Бібл. 8, рис. 9, табл. 1.

Ключові слова: передпусковий нагрівник, термоелектричний генератор, фізична модель, комп'ютерне моделювання.

Вступ

Експлуатація транспортних засобів в умовах понижених температур навколишнього середовища вимагає застосування методів попередньої теплової підготовки двигунів до запуску. До найпоширеніших методів попередньої теплової підготовки двигунів, що використовують для цивільної та військової техніки великої потужності відносять заправку системи охолодження двигуна і системи змащування гарячим антифризом і моторним маслом, застосування печей, які здійснюють підігрів картера двигуна прямим полум'ям, підігрів повітряних фільтрів шляхом введення в головки фільтрів невеликої кількості палива, що займається від спеціальної електричної свічки розжарювання, застосування калориферів для підігріву повітря, що надходить в циліндри двигуна тощо. Проте наведені методи попереднього розігріву двигунів є малоефективними і трудомісними. Тому все ширше використовуються передпускові нагрівники, що працюють від палива транспортних засобів та здійснюють розігрів охолоджуючої рідини двигунів [1, 2]. При цьому ефективним методом вирішення проблеми розрядки акумуляторної батареї транспортних засобів під час роботи

передпускових нагрівників є застосування термоелектричного генератора, який працює від тепла нагрівника та забезпечує автономне живлення його компонент [3 – 5]. Крім того надлишок електричної енергії термогенератора може використовуватись для підзарядки акумуляторної батареї та живлення іншого обладнання.

В Інституті термоелектрики створено експериментальний зразок термоелектричного передпускового нагрівника тепловою потужністю 3,5 кВт і максимальною електричною потужністю 100 Вт для обігріву транспортних засобів з об'ємом двигуна до 4 л [6, 7].

Попередній аналіз [8] свідчить про перспективи таких використань і для покращення експлуатаційних можливостей транспортних засобів великої потужності, у тому числі бронетанкової техніки.

Метою даної роботи є розробка та оптимізація конструкції термоелектричного генератора для автономного джерела тепла та електрики транспортних засобів великої потужності.

Фізична модель термоелектричного генератора та її математичний опис

Для пошуку оптимальної конструкції генератора необхідно розглянути його фізичну модель (рис. 1). Модель складається з п'яти секцій, кожна з яких містить гарячий теплообмінник, термоелектричні модулі та холодний теплообмінник. Конструкція теплообмінників кожної секції повинна бути оптимізована для досягнення оптимального режиму роботи усіх термоелектричних модулів. Модель передбачає окреме джерело тепла – повітряний нагрівач на дизельному паливі. Тепло до гарячого теплообмінника генератора надходить завдяки примусовій конвекції гарячих продуктів згоряння палива, що рухаються у каналах теплообмінника. Відведення тепла від термоелектричних модулів здійснюється рідким теплоносієм, що примусово циркулює у системі.

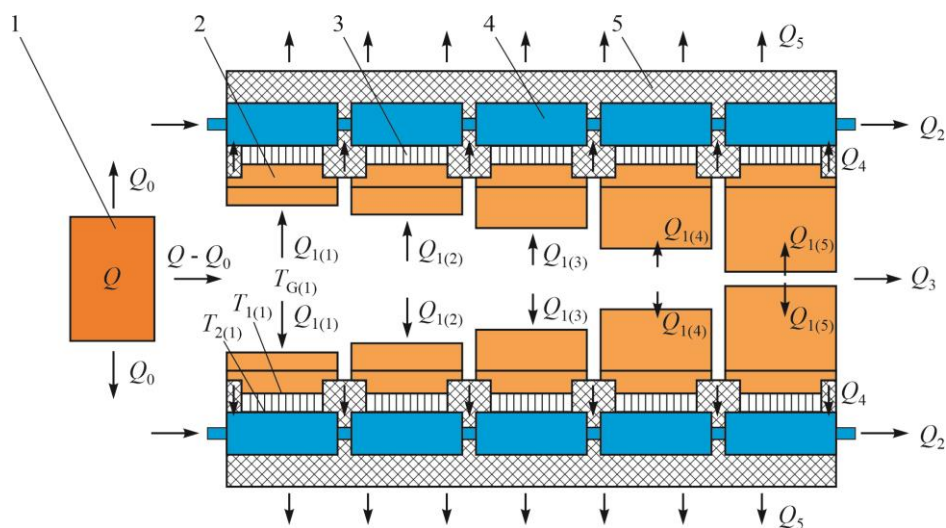


Рис. 1. Фізична модель термоелектричного генератора для джерела тепла та електрики для бронетанкової техніки: 1 — джерело тепла; 2 — гарячий теплообмінник (радіатор); 3 — термоелектрична батарея; 4 — холодний теплообмінник; 5 — теплоізоляція

Термоелектричний перетворювач складається зі стандартних термоелектричних модулів Altec-1061, які є найбільш підходящими для створення термоелектричних рекуператорів. Оптимальна температура гарячої сторони модулів складає близько 280-300°C, а холодної – 30-50°C.

Тепло $Q_{1(i)}$, яке надходить від до гарячого теплообмінника i -ї секції передається конвективним шляхом та випромінюванням:

$$Q_{1(i)} = \alpha_{(i)} \cdot (T_{G(i)} - T_{r(i)}) \cdot S_{R(i)} + \varepsilon_{(i)} \cdot \sigma_0 \cdot \left(\varepsilon_G \cdot \left(\frac{T_{G(i)}}{100} \right)^4 - A_{r(i)} \cdot \left(\frac{T_{r(i)}}{100} \right)^4 \right) \cdot S_{R(i)}, \quad (1)$$

де $\alpha_{(i)}$ – конвективний коефіцієнт тепловіддачі від гарячого газу до теплоприймальної поверхні гарячого теплообмінника i -ї секції; $T_{G(i)}$ – середня температура газів в гарячому теплообміннику i -ї секції; $T_{r(i)}$ – середня температура теплоприймальної поверхні гарячого теплообмінника i -ї секції; $S_{R(i)}$ – площа теплоприймальної поверхні гарячого теплообмінника i -ї секції; $\varepsilon_{(i)} = (\varepsilon_{r(i)} + 1)/2$ – ефективний ступінь чорноти системи «гарячий газ - теплоприймальна поверхня» гарячого теплообмінника i -ї секції; $\varepsilon_{r(i)}$ – ступінь чорноти теплоприймальної поверхні гарячого теплообмінника i -ї секції; σ_0 – стала Стефана-Больцмана; ε_G – ступінь чорноти газу; $A_{r(i)}$ – поглинальна здатність теплоприймальної поверхні гарячого теплообмінника i -ї секції.

Тепло Q_2 відводиться від холодної сторони термоелектричних модулів потоком теплоносія, який циркулює в холодному рідинному теплообміннику 4:

$$Q_2 = g_T \cdot c_{pT} \cdot (T_{\text{вх}} - T_{\text{вих}}), \quad (2)$$

де g_T – витрата теплоносія; c_{pT} – теплоємність теплоносія $T_{\text{вх}}$, $T_{\text{вих}}$ – температури теплоносія на вході та на виході системи охолодження термоелектричних модулів відповідно.

Оскільки холодні рідинні теплообмінники об'єднані в один гідравлічний контур з системою охолодження двигуна 5, відведене теплоносієм тепло від модулів використовується на передпусковий прогрів двигуна.

Основні втрати тепла визначаються наступним чином:

1) Q_3 – з продуктами реакції (водою H_2O , вуглекислим газом CO_2 і азотом N_2):

$$Q_3 = C_c \cdot m_c \cdot (T_{G(\text{вих.})} - T_0), \quad (3)$$

де C_c – середня теплоємність продуктів реакції, m_c – маса продуктів реакції, $T_{G(\text{вих.})}$ – температура продуктів реакції на виході з генератора.

2) Q_4 – на тепловій ізоляції :

$$Q_4 = \frac{\lambda S_{p2}}{L} (T_B - T_0), \quad (4)$$

де λ – теплопровідність ізоляційного матеріалу; S_{p2} – площа поверхні гарячого теплообмінника, яка не зайнята термоелектричною батареєю; L – товщина шару теплоізоляції.

Таким чином рівняння теплового балансу для даної фізичної моделі термоелектричного генератора можна записати у вигляді:

$$\begin{cases} Q = Q_0 + \sum_{i=1}^n Q_{1(i)} + Q_3 + Q_5, \\ Q_6 = P + Q_2 + Q_4. \end{cases} \quad (5)$$

де n – кількість секцій у гарячому теплообміннику термоелектричного генератора.

Зв'язок між швидкістю v та температурою гарячих газів T_G в теплообміннику визначатиметься формулою:

$$v = 5 \cdot \left[\frac{\frac{G_n}{T_G - T_0} - K_1}{K_2} + 1 \right] \cdot \frac{K(O_2) \cdot g_n}{\rho_{T_0} \cdot \pi \cdot d^2 / 4}, \quad (3.36)$$

де $K(O_2)$ – коефіцієнт, що визначає кількість кисню, необхідну для повного спалювання палива, d – діаметр камери згорання; K_1 і K_2 – коефіцієнти, що визначають вміст вуглекислого газу, води, азоту та повітря, які утворилися в результаті повного згорання палива і виводяться з врахуванням конкретних значень кількості ступенів вільності газу i , сталої Менделєєва - Клапейрона R та молярної маси газу μ ; g_n – витрата повітря; ρ_{T_0} – густина повітря при заданій температурі навколишнього середовища T_0 .

Розв'язок системи рівнянь теплового балансу (5) дає змогу визначити основні енергетичні та конструктивні параметри генератора. Він реалізовувався у пакеті прикладних програм Comsol Multiphysics чисельним методом скінчених елементів в два етапи, мета яких полягала у визначенні:

- ефективної геометрії гарячого теплообмінника, оптимальної витрати палива та швидкості повітря v для забезпечення максимальної робочої температури гарячих спаїв термобатарей;
- ефективної геометрії холодного теплообмінника та оптимальної витрати теплоносія для забезпечення необхідної робочої температури холодних спаїв термобатарей.

Вихідними даними для розрахунку конструктивних параметрів гарячого теплообмінника нагрівника є залежності електричної потужності $P_{\text{мод}}$ та коефіцієнта корисної дії (ККД) $\eta_{\text{мод}}$ використаних термоелектричних генераторних модулів типу Altec-1061 (рис. 2).

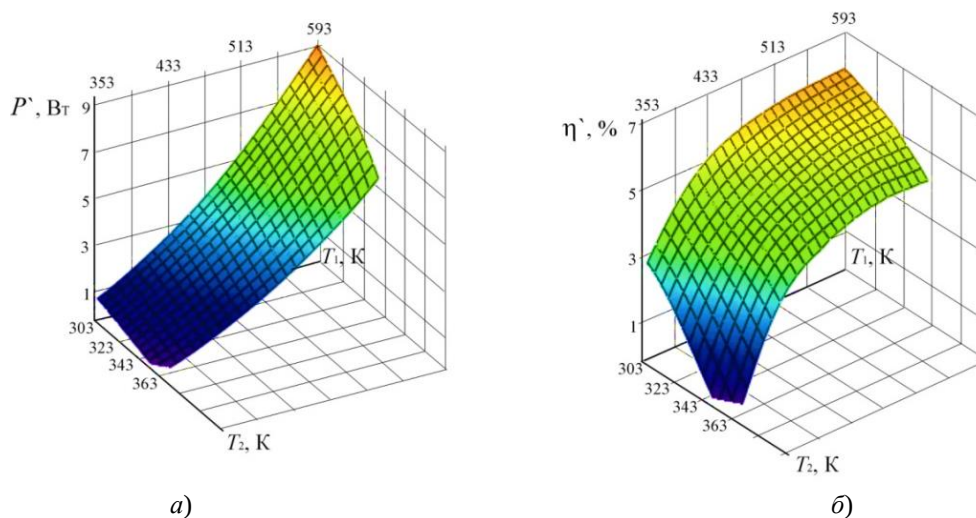


Рис. 2. Залежності ККД η (а) та електричної потужності P (б) термоелектричного модуля типу Altec-1061 від температур гарячої T_1 та холодної T_2 сторін модуля

Результати комп'ютерного проектування термоелектричного генератора

Комп'ютерна модель містить 5 секції, кожна з яких має посадочні місця для 8 термоелектричних модулів (рис. 3). У кожній секції є N_i каналів діаметром d_i для пропускання теплоносія. При цьому сумарна площа перерізу каналів кожної секції була однаковою, а збільшенням кількості каналів при одночасному зменшенні їх діаметру досягалось збільшення площі теплообмінника кожної наступної секції.

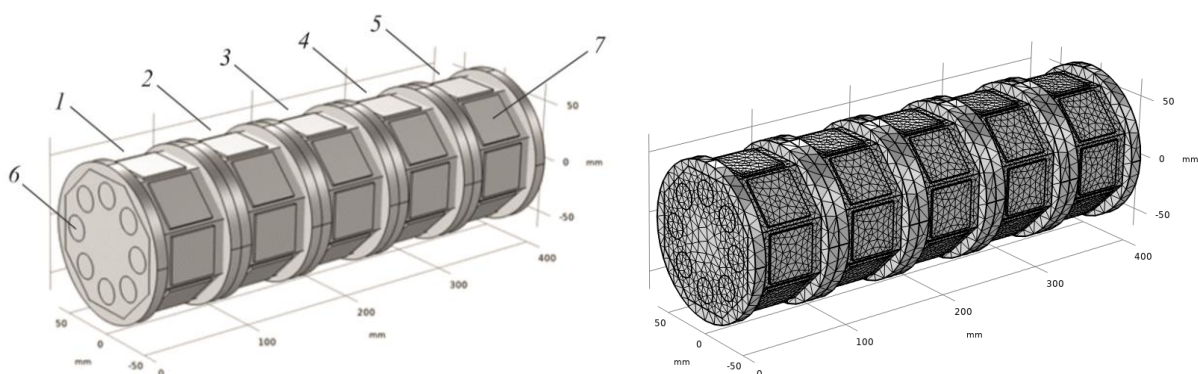


Рис. 3. Комп'ютерна модель гарячого теплообмінника термоелектричного генератора у пакеті прикладних програм Comsol Multiphysics: 1 – 5 – секції теплообмінника; 6 – канали для пропускання теплоносія; 7 – місця розміщення термоелектричних модулів

Оптимальна геометрія кожної секції визначалась з умови забезпечення оптимального температурного режиму на гарячій стороні всіх термоелектричних модулів – близько 280-300°C.

Приклад розподілу температур у гарячому теплообміннику термоелектричного генератора у пакеті прикладних програм Comsol Multiphysics наведено на рис. 4.

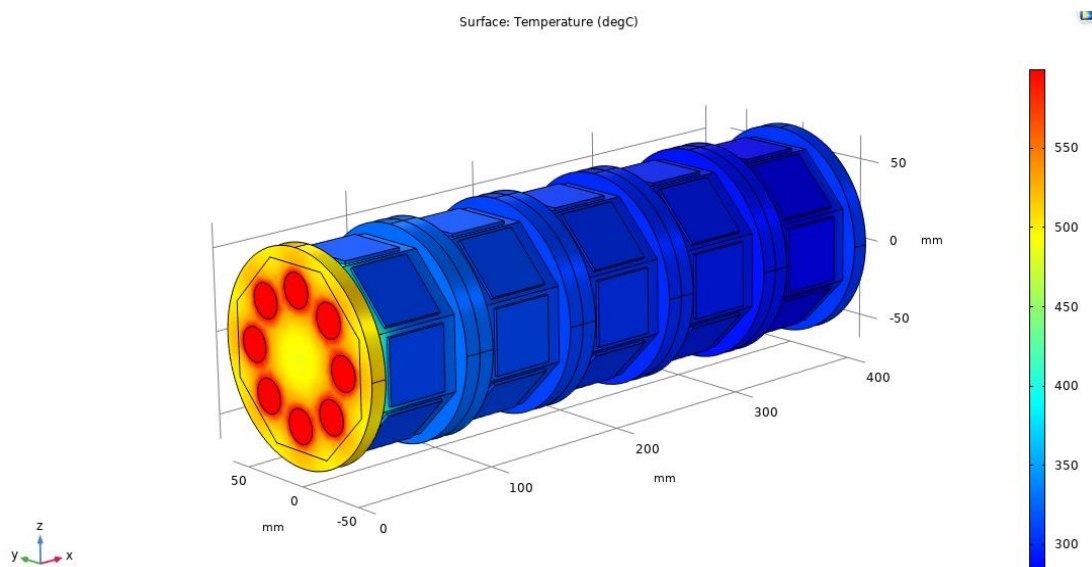


Рис. 4. Приклад розподілу температур у гарячому теплообміннику генератора

У табл. 1 представлено знайдені комп'ютерним моделюванням геометричні параметри теплообмінника (кількість N_i каналів кожної секції та їх діаметр d_i , площа теплообмінника), що дозволяють забезпечити необхідний температурний режим.

Таблиця 1

Результати оптимізації конструкції гарячого теплообмінника наведено

	Секція 1	Секція 2	Секція 3	Секція 4	Секція 5
Кількість каналів N_i	8	16	32	72	144
Діаметр каналів d_i , мм	21.2	15.0	10.6	7.1	5.0
Площа теплообмінника $S_{R(i)}$, м ²	0.037	0.053	0.075	0.112	0.158
Середня температура посадочної площадки модулів $T_1(i)$, °C	308.0	309.1	301.6	293.3	281.8

Розподіл температури газу, що проходить через теплообмінник показано на рис. 5. Координатою x задано положення вздовж теплообмінника у напрямку руху газу.

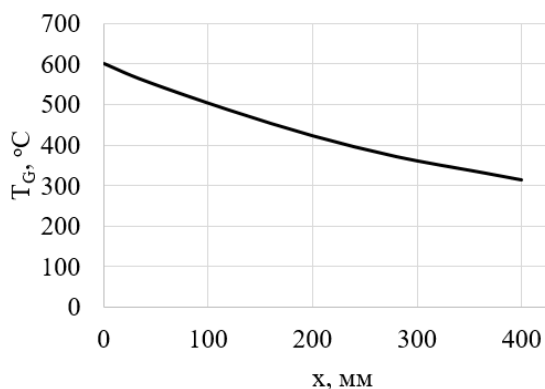


Рис. 5. Розподіл температури газу всередині гарячого теплообмінника термоелектричного генератора (для конструкції теплообмінника, заданої параметрами, наведеними у табл. 1)

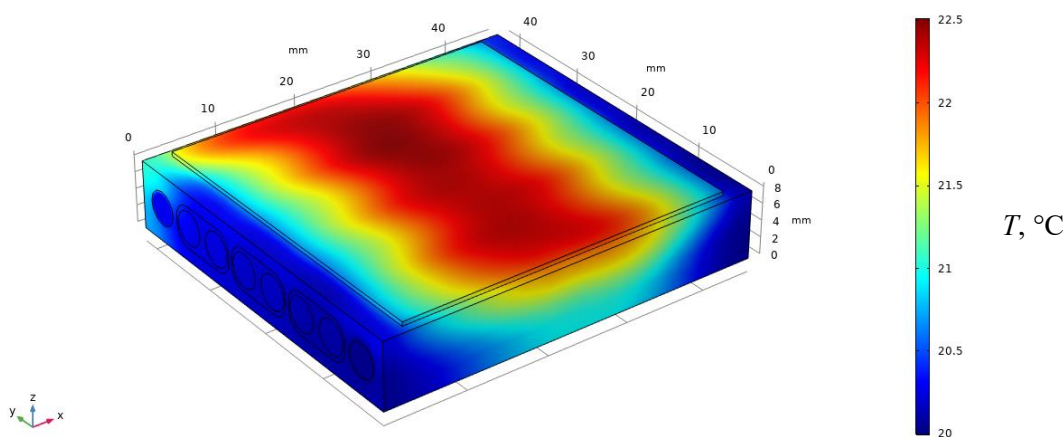


Рис. 6. Приклад розподілу температур у холодному теплообміннику генератора

Для визначення розподілу температур в холодних теплообмінниках нагрівника (рис. 6) розглядався процес передачі теплової потужності від термоелектричного модуля до системи обігріву транспортного засобу шляхом теплообміну між холодною стороною термобатареї і потоком теплоносія, який циркулює в каналах холодного теплообмінника з швидкістю v та температурами $T_{вх.}$ і $T_{вих.}$ відповідно на вході та виході з теплообмінника. На рис. 6 показано випадок теплообмінника з

діаметром каналів 4 мм при витраті теплоносія – 0.05 м³/год. На рис. 7, 8 також наведено розподіли швидкості та температури теплоносія у каналі теплообмінника.

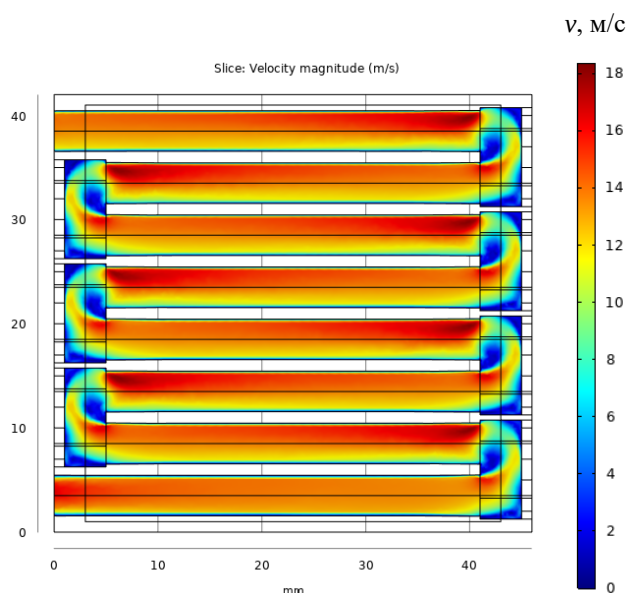


Рис. 7. Приклад розподілу швидкості теплоносія у холодному теплообміннику термоелектричного генератора

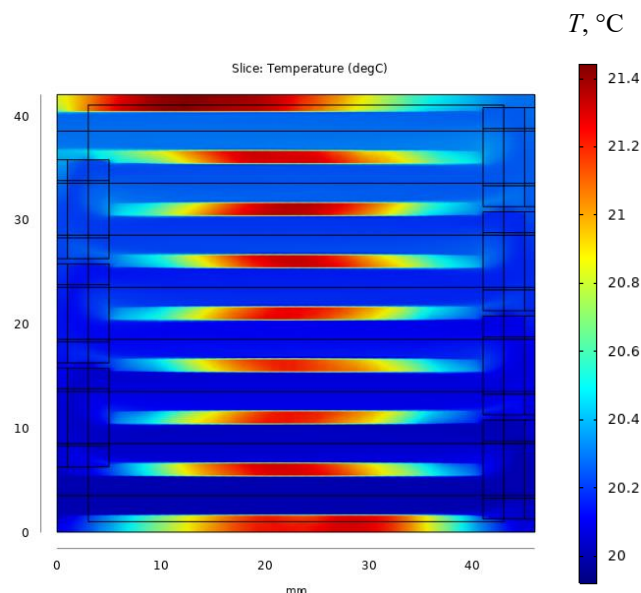


Рис. 8. Приклад розподілу температури теплоносія у холодному теплообміннику термоелектричного генератора

В результаті моделювання отримано залежності перепаду температур між входом і виходом з холодних теплообмінників від геометрії каналів та від витрати теплоносія (рис. 9).

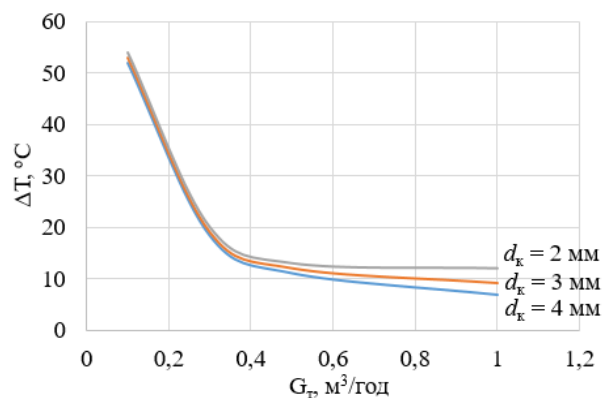


Рис. 9. Залежність перепаду температур ΔT між входом і виходом з системи холодних теплообмінників від витрати теплоносія G_m та діаметра каналів d_k

Для випадку системи теплообмінників, яка містить 40 індивідуальних теплообмінників з діаметром каналів 4 мм, об'єднаних у один гідравлічний контур двома послідовними ланками по 20 шт., для забезпечення необхідних робочих температур холодної сторони модуля (30 – 50°C) витрата теплоносія, що прокачується через систему, повинна складати 0.5 – 0.7 м³/год.

Отримані результати стали основою для розробки конструкції термоелектричного генератора електричною потужністю до 350 Вт, якої вистачатиме для живлення електричною енергією передпускових нагрівників типу PROHEAT M90 24V (з корисною тепловою потужністю 26 кВт та споживаною електричною потужністю до 230 Вт) або ОЖД30.8106010 (з корисною тепловою потужністю 30 кВт та споживаною електричною потужністю до 140 Вт). Така система з врахуванням

теплової енергії термоелектричного генератора (близько 10 кВт) буде еквівалентною за тепловою потужністю – 36 – 40 кВт (але автономною) і дозволить замінити передпусковий нагрівник типу ПЖД-44Ш (з корисною тепловою потужністю 37 кВт та споживаною електричною потужністю до 340 Вт), що широко використовується у цивільній та військовій техніці великої потужності.

Висновки

1. Побудовано фізичну, математичну та комп'ютерну моделі термоелектричного генератора для джерела тепла та електрики для транспортних засобів великої потужності. Комп'ютерним моделюванням визначено оптимальні конструкції теплообмінників систем підведення та відведення тепла, які дозволяють забезпечити необхідний режим роботи термоелектричних модулів.
2. Розроблено конструкцію термоелектричного генератора електричною потужністю до 350 Вт та тепловою – до 10 кВт. У поєднанні з передпусковим нагрівником тепловою потужністю 25-30 кВт, генератор утворюватиме автономну систему передпускового розігріву з тепловою потужністю до 40 кВт. Така система може замінити еквівалентний за потужністю передпусковий нагрівник та не потребуватиме при роботі використання електричної енергії акумулятора.

Література

1. Техническая эксплуатация автомобилей: Учебник для вузов. 4-е изд., перераб. и дополн. / Е.С. Кузнецов, А.П. Болдин, В.М. Власов и др. - М.: Наука, 2001, 535 с.
2. Резник Л.Г., Ромалис Г.М., Чарков С.Т. Эффективность использования автомобилей в различных условиях эксплуатации. М.: Транспорт, 1989. – 128 с.
3. Пат. (UA) на винахід № 102303 МПК F01N 5/00 H01L 35/00. Термоелектричне джерело живлення для автомобіля / Анатичук Л.І., Михайловський В.Я. – Опубл. 25.06.2013, бюл. №12, Заявка u2011 13957 від 28.11.2011.
4. Пат. (UA) №72304. МПК: F01N 5/00; H01L35/00. Автомобільний обігрівач з термоелектричним джерелом живлення / Анатичук Л.І., Михайловський В.Я. – Опубл. 10.08.2012, бюл. №15, Заявка u2012 02055 від 23.02.2012.
5. Пат. (UA) №124999. МПК: F02N 19/10; H01L35/00. Автомобільний обігрівач з термоелектричним джерелом живлення / Максимук М.В. – Опубл. 25.04.2018, бюл. №8, Заявка u2017 11819 від 04.12.2017.
6. Михайловський В.Я., Максимук М.В. Рациональні потужності термогенераторів для передпускових нагрівачів транспортних засобів // Термоелектрика. – №4.– 2015. – С.65-74.
7. Максимук М.В. Проектування автомобільного передпускового джерела тепла з термоелектричним генератором. Дизельний варіант // Термоелектрика. – 2017. – С.32-43.
8. Л.І. Анатичук, В.В. Лисько. Про можливість використання термоелектричних генераторів для транспортних передпускових нагрівачів великих потужностей // Термоелектрика – 2019, №3. – С. 80-92.

Надійшли до редакції: 10.05.2021

Анатичук Л.І. акад. НАН України

Лисько В.В. канд. физ.-мат. наук

¹Институт термоэлектричества НАН и МОН Украины, ул. Науки, 1,
Черновцы, 58029, Украина, e-mail: anatykh@gmail.com ;

²Черновицкий национальный университет им. Юрия Федьковича,
ул. Коцюбинского, 2, Черновцы, 58012, Украина

КОМПЬЮТЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ ИСТОЧНИКА ТЕПЛА И ЭЛЕКТРИКИ ДЛЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

Рассмотрена физическая модель термоэлектрического генератора для автономной системы предпускового разогрева транспортных средств большой мощности. Путем компьютерного проектирования определены конструкции теплообменников систем подвода и отвода тепла, позволяющие обеспечить оптимальный режим работы термоэлектрических модулей. Разработана конструкция термоэлектрического генератора электрической мощностью до 350 Вт, которой будет хватать для питания электрической энергией предпусковых отопителей тепловой мощностью 25-30 кВт. Такая система, с учетом тепловой энергии термоэлектрического генератора, будет эквивалентна более мощным предпусковым отопителям (36 – 40 кВт), но не потребует при работе использования электрической энергии аккумулятора. Библ. 8, рис. 9. Табл. 1.

Key words: preheater, thermoelectric generator, physical model, computer simulation.

Anatychuk L.I., *acad. National Academy
of Sciences of Ukraine*^{1,2}
Lysko V.V., *cand. phys.-math. sciences*^{1,2}

¹Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine,
1 Nauky str., Chernivtsi, 58029, Ukraine,
e-mail: anatych@gmail.com;

²Yu.Fedkovych Chernivtsi National University,
2, Kotsiubynskyi str., Chernivtsi, 58012, Ukraine;

COMPUTER DESIGN OF A THERMOELECTRIC GENERATOR FOR HEAT AND ELECTRICITY SUPPLY TO HEAVY-DUTY VEHICLES

The physical model of the thermoelectric generator for the autonomous system of pre-heating of high-power vehicles is considered. The design of heat exchangers of heat supply and exhaust systems, which allow to ensure the optimal mode of operation of thermoelectric modules, has been determined by computer design. The design of a thermoelectric generator with an electric power of up to 350 W has been developed, which will be enough to supply electric energy to preheaters with a thermal power of 25-30 kW. Such a system, taking into account the thermal energy of the thermoelectric generator, will be equivalent to more powerful preheaters (36 - 40 kW), but will not require the use of battery electricity. Bibl. 8, Fig. 9, Table. 1.

Key words: starting heater, thermoelectric generator, physical model, computer simulation.

References

1. Kuznetsov E.S., Boldin A.P., Vlasov V.M., et al. (2001). *Tekhnicheskaya ekspluatatsia avtomobilei. Uchebnik dlia vuzov. 4-e izdaniie, pererabotannoie i dolnennoie [Technical maintenance of automobiles College textbook. 4th ed., revised and enlarged]*. Moscow: Nauka [in Russian].
2. Reznik L.G., Romalis G.M., Charkov S.T. (1989). *Effektivnost ispolzovaniia avtomobilei v razlichnykh usloviakh ekspluatatsii [The efficiency of using automobiles in different operating conditions]*. Moscow: Transport [in Russian].
3. *Patent UA № 102303* (2013) L.I. Anatyshuk, V.Ya. Mykhailovsky. Thermoelectric supply for automobile (in Ukrainian).
4. *Patent UA № 72304* (2012). L.I. Anatyshuk, V.Ya. Mykhailovsky. Automobile heater with a thermoelectric supply (in Ukrainian).
5. *Patent UA № 124999*. (2018). M.V. Maksimuk. Automobile heater with a thermoelectric heat source (in Ukrainian).
6. Mykhailovsky V.Ya., Maksimuk M.V. (2015). Rational powers of thermal generators for starting pre-heaters of transport means. *J. Thermoelectricity*, 4, 65-74.
7. Maksimuk M.V. (2017). Design of automobile starting heat source with a thermoelectric generator. Diesel variant. *J. Thermoelectricity*, p. 32-43.
8. Anatyshuk L.I., Lysko V.V. (2019). On the possibility of using thermoelectric generators for high-power transport starting pre-heaters. *J. Thermoelectricity*, 3, 80-92.

Submitted 10.05.2021