

**Дмитриченко М.Ф.** доктор техн. наук

**Гутаревич Ю.Ф.** доктор техн. наук

**Тріфонов Д.М.** канд. техн. наук

**Сирота О.В.** канд. техн. наук

**Шуба Є.В.** канд. техн. наук

Національний транспортний університет  
вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, м. Київ, 01010, Україна,  
*e-mail: kafedradvzntu@gmail.com*

---

**ПРО ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ  
ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ГЕНЕРАТОРІВ В СИСТЕМІ  
ПУСКУ ХОЛОДНОГО ДВИГУНА ВНУТРІШНЬОГО  
ЗГОРАННЯ З ТЕПЛОВИМ АКУМУЛЯТОРОМ**

---

*За результатами аналізу енергетичних можливостей системи пуску двигуна внутрішнього згорання в умовах низьких температур оточуючого повітря встановлено, що значний вплив на цей процес зумовлює температуру електроліту акумуляторної батареї. Запропоновано використання термоелектричної системи, що дозволяє утилізувати теплову енергію відпрацьованих газів термоелектричним генератором що акумульована в тепловому акумуляторі для забезпечення живлення інфрачервоного нагрівального елемента для підтримання теплового стану акумуляторної батареї під час утримування автомобіля в умовах низьких температур. Наведено опис запропонованої системи, принцип її функціонування та результати досліджень. Бібл. 15, рис. 4.*

**Ключові слова:** термоелектричний генератор, тепловий акумулятор фазового переходу.

## **Вступ**

Забезпечення ефективної експлуатації автомобіля, у відповідності до сучасних вимог, що до його паливної економічності та екологічної безпеки, неможливе без урахування умов експлуатації. Значний вплив на паливну економічність та екологічну безпеку автомобіля чинять природно-кліматичні фактори, в яких відбувається експлуатація транспортного засобу. В умовах низьких температур оточуючого повітря основною проблемою є забезпечення надійного і безаварійного пуску холодного двигуна внутрішнього згорання (ДВЗ).

Економія паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР) може бути реалізована завдяки утилізації частини вторинних енергетичних ресурсів, які виникають у значних обсягах під час роботи ДВЗ. Потенціал енергозбереження в наслідок використання вторинних енергетичних ресурсів досить великий і може становити до 40 % від витрати первинних ПЕР.

Багато дослідників визнають, що рекуперация частини теплової енергії відпрацьованих газів (ВГ) двигуна є одним з найбільш ефективних заходів, що дозволяє знизити загальну питому витрату палива, забезпечуючи при цьому збільшення загальної потужності енергетичної установки і зменшення негативного впливу транспортного засобу на навколишнє

середовище [1 – 7]. Утилізація теплової енергії ВГ, за допомогою термоелектричних генераторів (ТЕГ), забезпечує генерування електричної енергії.

Останні технологічні досягнення зробили системи рекуперації вторинних енергетичних ресурсів економічно ефективними, а посилення екологічних та паливно-економічних вимог до транспортних засобів і **конче** необхідними.

Тому підвищення енергоефективності енергетичної установки транспортного засобу, перш за все через зменшення втрат вторинних енергетичних ресурсів, є актуальною задачею і одним з пріоритетних напрямків наукових досліджень в цій галузі.

Метою даного дослідження є визначення можливості і ефективності застосування термоелектричної системи, яка дозволить підтримувати оптимальний тепловий стан стартерної акумуляторної батареї під час утримування автомобіля в умовах низьких температур оточуючого повітря, забезпечуючи поліпшення холодного пуску ДВЗ. Джерелом теплоти в запропонованій системі є тепловий акумулятор фазового переходу (ТАФП), що здійснює генерування електричної енергії термоелектричним генератором по завершенні функціонування ДВЗ.

### **Аналіз попередніх досліджень**

При зниженні температури оточуючого повітря різко втрачається електростартерна здатність системи пуску ДВЗ через погіршення роботи стартерної акумуляторної батареї. При зниженні температури сила розрядного струму і внутрішній опір акумуляторної батареї досить сильно зростають. В середньому, при зниженні температури електроліту на 1 °С ємність акумуляторної батареї зменшується на 1.0...1.5 %. При температурах електроліту нижче мінус 30 °С батарея практично не приймає заряд і функціонує фактично розрядженою до 50...60% номінальної ємності [8 – 10].

За даними Науково-дослідного інституту акумуляторів: при температурі 0°С коефіцієнт віддачі акумуляторної батареї по току дорівнює 90 %, а при мінус 40 °С – тільки 20 %. Тобто, акумулятор стає практично непрацездатним при температурі мінус 30...35 °С [11].

Великий вплив на внутрішній опір акумуляторної батареї чинить температура і густина електроліту. Мінімальний опір електроліт має при температурі плюс 15 °С і щільності 1.225 г/см<sup>3</sup>. Зі зниженням температури електроліту від плюс 30 °С до мінус 40 °С його питомий опір зростає в 6...8 разів [12 – 14].

Таким чином, пониження температури електроліту призводить до зменшення напруги на клеммах акумуляторної батареї, що призводить до зниження потужності стартера в процесі пуску холодного двигуна. Отже для забезпечення ефективного функціонування стартерної акумуляторної батареї слід підтримувати її оптимальну температуру. Для цього досить широко застосовують підігрів електроліту акумуляторної батареї електронагрівачами, вбудованими в моноблок, або розміщеними в теплоізоляційних контейнерах для акумуляторної батареї з живленням від зовнішньої електричної мережі або генератора автомобіля при роботі двигуна. Проте недоліком цього методу є необхідність додаткового використання енергетичних ресурсів, неможливість застосування зовнішньої електричної мережі при утримуванні автомобілів на відкритих майданчиках і те, що підтримування оптимальної температури акумуляторної батареї можливе лише під час функціонування ДВЗ.

Подолати ці недоліки можна якщо джерело теплоти використовує теплову енергію відпрацьованих газів акумуляовану в ТАФП, що забезпечує можливість генерації електричної енергії ТЕГ як під час роботи ДВЗ, так і по завершенні його роботи.

## Результати експериментальних досліджень

Відповідно до обраної схеми утилізації теплової енергії ВГ теплова модель термоелектричної системи має вигляд, зображений на рис. 1. Під час функціонування ДВЗ частина теплової енергії від ВГ передається до ТАФП, в якому теплова енергія акумулюється. При утримуванні автомобіля в умовах низьких температур оточуючого повітря, після завершення функціонування ДВЗ, частина теплової енергії акумульованої в ТАФП передається до “гарячих” спаїв ТЕГ і далі від “холодних” спаїв ТЕГ в оточуюче повітря.



Рис. 1. Схема потоків теплової енергії в запропонованій термоелектричній системі утилізації теплової енергії ВГ з тепловим акумулятором фазового переходу.

Запропонована термоелектрична система складається (рис. 2) з ТАФП 1, шара термостійкого компаунда 2, термоелектричного генератора, що містить послідовно з'єднані елементарні термопари 3, терморегулятора 4 та інфрачервоного нагрівального елемента 5.

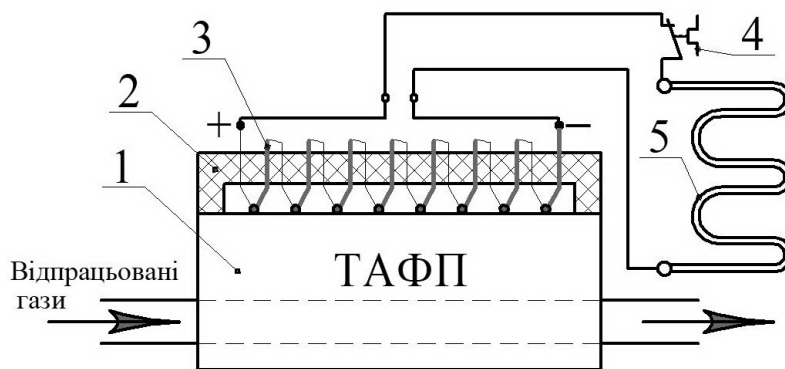


Рис. 2. Термоелектрична система утилізації теплової енергії ВГ з тепловим акумулятором фазового переходу:  
1 – тепловий акумулятор фазового переходу, 2 – шар термостійкого компаунда, 3 – термоелектричний генератор, 4 – терморегулятор, 5 – інфрачервоний нагрівальний елемент.

Принцип функціонування запропонованої системи полягає в наступному (рис. 2): під час роботи двигуна внутрішнього згорання потік відпрацьованих газів проходить по пучках трубок

крізь ТАФП 1, віддаючи частину теплової енергії теплоакумулюючому матеріалу (ТАМ). Впродовж зберігання автомобіля в умовах низьких температур оточуючого повітря термоелектричний генератор 3, який функціонує за ефектом Зеебека, перетворює частину теплової енергії акумульованої в ТАФП в електричну. Отримана електрична енергія живить інфрачервоний нагрівальний плівковий елемент 5. Терморегулятор 4 забезпечує підтримку оптимальної температури акумуляторної батареї, що створює умови необхідні для поліпшення холодного пуску ДВЗ.

Виготовлений на кафедрі двигунів і теплотехніки Національного транспортного університету за участю працівників Інституту газу НАН України ТАФП (рис. 3) являє собою теплообмінний апарат кожухотрубчатого типу з коробчатим кожухом, який складається з корпусу з шаром теплової ізоляції, двох газових трубних пучків (теплообмінників), змонтованих на трубних дошках, між якими знаходиться фазоперехідний ТАМ. Теплоакумулюючим матеріалом є октагідрат гідроксиду барію  $Ba(OH)_2 \cdot 8H_2O$ , температура плавлення якого становить 351.2 К [15].

Термоелектричний генератор (рис. 3а) складається з термоелектричних перетворювачів типу ТХК (хромель-копелевих термопар: хромель - сплав 90 % нікелю і 10 % хрому, копель - сплав 56 % міді і 44 % нікелю), з'єднаних послідовно.

Інфрачервоний нагрівальний елемент виготовлений з алюмінієво-магнієвого сплаву захищеного поліметалами. Цей сплав поєднує в собі досить високу міцність і відмінну корозійну стійкість, нагрівальний елемент з температурою на поверхні  $+60...65$  °С, має високу надійність і ефективність.

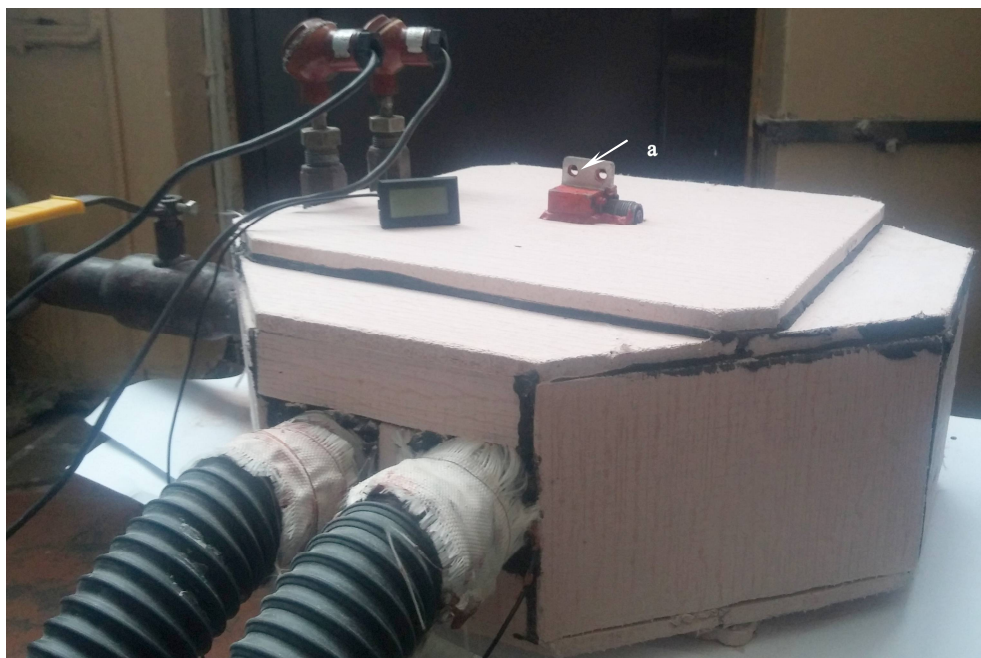


Рис. 3. Тепловий акумулятор фазового переходу з термоелектричним генератором (а).

Під час проведення експериментальних досліджень середня температура оточуючого повітря склала близько 1.5°С, температура поверхні ТАФП під шаром теплової ізоляції в місці контакту с “гарячими” спаями ТЕГ становила +116 °С.

При природному охолодженні, час розрядки ТАФП в інтервалі температур від 116 °С до 65 °С склав 320 хв., за цей час середня швидкість зниження температури ТАФП становила близько 0.16 °С за одну хвилину. Кількість втрат теплової енергії в оточуюче повітря при зберіганні теплової енергії при безгаражному утримуванні автомобіля залежить від якості теплової ізоляції ТАФП (рис. 4).

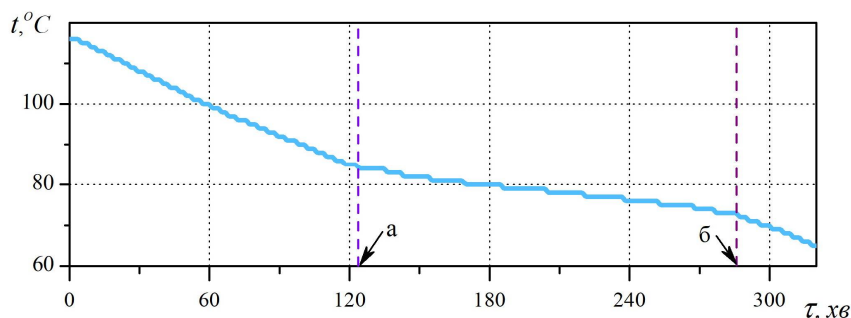


Рис. 4. Зміна температури поверхні ТАФП під шаром теплової ізоляції в місці контакту з "гарячими" спаями ТЕГ при природному охолодженні (а – початок, б – кінець кристалізації ТАМ).

Уповільнення зниження температури поверхні ТАФП під шаром теплової ізоляції в місці контакту з "гарячими" спаями ТЕГ спостерігається з 124 по 286 хв. (рис. 4). Дане уповільнення можна пояснити періодом кристалізації ТАМ. Тривалість періоду кристалізації ТАМ становить близько 160 хв. Температура поверхні ТАФП в місці контакту з "гарячими" спаями ТЕГ, відносно стабілізувалася в інтервалі температур +84...73 °С, середня температура становить +78,5°С, при цьому швидкість зниження температури становила близько 0.07 °С за одну хвилину.

Таким чином, дослідження теплового акумулятора фазового переходу показало, що тепловий акумулятор розміщений в підкапотному просторі здатен забезпечити різницю температур між "гарячими" і "холодними" спаями ТЕГ в межах 70...80 °С практично постійною протягом майже 320 хв.

За результатами експериментальних досліджень встановлено, що при застосуванні в ТЕГ п'ятнадцяти термопар з'єднаних послідовно за різниці температур між "гарячими" і "холодними" спаями близько 75 °С термоелектрорушійна сила (термоЕРС) досягала 45 мВ.

В подальшому заплановано проведення розрахункових та експериментальних досліджень з метою визначення кількості пар термоелектричних елементів в ТЕГ для забезпечення необхідної напруги для живлення інфрачервоного нагрівального елемента, енергетичних характеристик ТЕГ, визначення залежності термоелектрорушійної сили ТЕГ від різниці температур між "гарячими" і "холодними" спаями ТЕГ, дослідження фізичної моделі запропонованої термоелектричної системи з тепловим акумулятором фазового переходу в процесі її функціонування.

## Висновки

1. Випробування запропонованої термоелектричної системи показали, що вона дозволяє утилізувати акумульовану в ТАФП теплову енергію відпрацьованих газів ДВЗ

термоелектричним генератором для живлення інфрачервоного нагрівального елемента з метою підтримування теплового стану стартерної акумуляторної батареї під час утримування автомобіля в умовах низьких температур оточуючого повітря. За різниці температур між “гарячими” і “холодними” спаями ТЕГ близько 75 °С термоЕРС сягала близько 45 мВ.

2. Випробування теплового акумулятора фазового переходу, розробленого і виготовленого на кафедрі двигунів і теплотехніки Національного транспортного університету за участю працівників Інституту газу НАН України, при температурі оточуючого повітря близько 1.5 °С, показало, що час зберігання теплової енергії складає 320 хв. За цей час температура поверхні ТАФП під шаром теплової ізоляції в місці контакту с “гарячими” спаями ТЕГ знизилась від 116 °С до 65 °С.

3. Результатами даного дослідження підтверджена можливість та ефективність використання термоелектричних генераторів в системі пуску холодного двигуна внутрішнього згорання з тепловим акумулятором для генерування електричної енергії на борту автомобіля впродовж тривалого часу після завершення функціонування ДВЗ.

## Література

1. J. Vazquez, M.A. Zanz-Bobi, R. Palacios, A. Arenas, “State of the art of thermoelectric generators based on heat recovered from the exhaust gases of automobiles,” Proceedings of 7th European workshop on thermoelectric, 2002.S.
2. Gritsuk, I., Gutarevych, Y., Mateichyk, V., and Volkov, V., "Improving the Processes of Preheating and Heating after the Vehicular Engine Start by Using Heating System with Phase-Transitional Thermal Accumulator," SAE Technical Paper 2016-01-0204, 2016, <https://doi.org/10.4271/2016-01-0204>.
3. Трифонов Д.М. Аналіз напрямів рекуперації теплової енергії відпрацьованих газів двигуна внутрішнього згорання / Д.М. Трифонов // Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування. 9-а Міжнародна науково-практична конференція – Херсон: Херсонська державна морська академія. 2018. С. 194-199
4. Sprouse C. Iii and Depcik C., "Review of organic Rankine cycles for internal combustion engine exhaust waste heat recovery," Applied Thermal Engineering, vol. 51, pp. 711-722, 2013.
5. Jadhao J.S., Thombare D.G. «Review on exhaust gas heat recovery for I.C. Engine». International journal of engineering and innovative technology (IJEIT) Volume 2, Issue 12, June 2013.
6. Recovery of Exhaust Waste Heat for ICE Using the Beta Type Stirling Engine, Wail Aladayleh, Ali Alahmer, Hindawi Publishing Corporation, Journal of Energy, Volume 2015, Article ID 495418, 8 pages, <http://dx.doi.org/10.1155/2015/495418>.
7. Duraisamy Sivaprahasam, Subramaniam Harish, Raghavan Gopalan and Govindhan Sundararajan (July 11th 2018). Automotive Waste Heat Recovery by Thermoelectric Generator Technology, Bringing Thermoelectricity into Reality, Patricia Aranguren, IntechOpen, DOI: 10.5772/intechopen.75443.
8. Кузнецов Е.С. Техническая эксплуатация автомобилей: учебник для вузов / Е.С. Кузнецов, А.П. Болдин, В.М. Власов и др. // – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 2001. – 535 с.
9. Лыков А.В. Теория теплопроводности / Лыков А.В. // — М.: Высшая школа, 1967. – 599 с.
10. Крохта Г.М. Особенности работы стартерных аккумуляторных батарей при самопрогреве двигателя в зимний период / Г.М. Крохта, Н.А. Усатых, Ю.А. Гуськов, Д.М. Воронин // Достижения науки и техники АПК. 2016. т.30. №12. С. 94-97.
11. Панкратов Н.И. Эксплуатация аккумуляторных батарей при низких температурах / Н.И.

- Панкратов // Автомобильный транспорт. 1985. №2. С. 16–19.
12. Тиминский В.И. Справочник по электрооборудованию автомобилей, тракторов, комбайнов / В.И. Тиминский // М.: Урожай, 1985. – 256 с.
  13. Тышкевич Л.Н. Исследование тепловых процессов аккумуляторной батареи при эксплуатации автомобиля в условиях низких отрицательных температур / Л.Н. Тышкевич, Б.В. Журавский // Омск.: Вестник СибАДИ, выпуск 6 (58), 2017. С. 71-77.
  14. Маркин А.Г. Энергообеспечение пуска двигателя внутреннего сгорания автомобиля / А.Г. Маркин, Б.В. Журавский, А.П. Жигadlo // Омск.: Вестник СибАДИ, выпуск 5 (45), 2015. С.26-30.
  15. Трифонов Д.М. Поліпшення паливної економічності і екологічних показників автомобіля використанням теплових акумуляторів фазового переходу для прогріву двигуна: дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.22.20 — «Експлуатація та ремонт засобів транспорту» / Д.М. Трифонов – Київ, 2018. 236 с.

Надійшла до редакції 06.08.2018

**Дмитриченко М.Ф.** доктор техн. наук

**Гутаревич Ю.Ф.** доктор техн. наук

**Трифонов Д.М.** канд. техн. наук

**Сирота О.В.** канд. техн. наук

**Шуба Е.В.** канд. техн. наук

Национальный транспортный университет  
ул. Г. Емельяновича-Павленко, 1, г. Киев, 01010, Украина,  
*e-mail: kafedradvzntu@gmail.com*

## **О ПЕРСПЕКТИВАХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ В СИСТЕМЕ ПУСКА ХОЛОДНОГО ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ С ТЕПЛОМ АККУМУЛЯТОРОМ**

*По результатам анализа энергетических возможностей системы пуска двигателя внутреннего сгорания в условиях низких температур окружающего воздуха установлено, что значительное влияние на этот процесс оказывает температура электролита аккумуляторной батареи. Предложено использование термоэлектрической системы, которая позволяет утилизировать тепловую энергию отработанных газов, аккумулируемую в тепловом аккумуляторе, при помощи термоэлектрического генератора и для обеспечения питания инфракрасного нагревательного элемента для поддержания теплового состояния аккумуляторной батареи во время содержания автомобиля в условиях низких температур. Приведены описание предложенной системы, принцип ее функционирования и результаты исследований. Библи. 15, рис. 4.*

**Ключевые слова:** термоэлектрический генератор, тепловой аккумулятор фазового перехода.

**M.F. Dmytrychenko**, *Dr. of Technical Sciences*

**Yu.F. Gutarevych**, *Dr. of Technical Sciences*

**D.M. Trifonov**, *Cand. of Technical Sciences*

**O.V. Syrota**, *Cand. of Technical Sciences*

**E.V. Shuba**, *Cand. of Technical Sciences*

National Transport University

1, M.Omelianovycha-Pavlenka Str., Kyiv, 01010, Ukraine,

*e-mail: kafedradvzntu@gmail.com*

## **ON THE PROSPECTS OF USING THERMOELECTRIC GENERATORS WITH THE COLD START SYSTEM OF AN INTERNAL COMBUSTION ENGINE WITH A THERMAL BATTERY**

*According to the results of the analysis of the power capabilities of the internal combustion engine start system under low ambient temperatures, it has been found that this process is considerably affected by the temperature of the battery electrolyte. It is proposed to use a thermoelectric system that allows a thermoelectric generator to recover the exhaust gas thermal energy which is stored in a thermal battery to provide power to the infrared heating element in order to maintain the thermal state of the battery while the vehicle is kept at low temperatures. The description of the proposed system, its operating principle and the results of research are given. Bibl. 15, Fig. 4.*

**Key words:** thermoelectric generator, recovery

### **References**

1. Vazaquez J., Zanz-Bobi M.A., Palacios R., Arenas A. (2002). State of the art of thermoelectric generators based on heat recovered from the exhaust gases of automobiles. *Proceedings of 7th European Workshop on Thermoelectrics*.
2. Gritsuk, I., Gutarevych, Y., Mateichyk, V., and Volkov, V. (2016). Improving the processes of preheating and heating after the vehicular engine start by using heating system with phase-transitional thermal accumulator. *SAE Technical Paper 2016-01-0204*, 2016, <https://doi.org/10.4271/2016-01-0204>.
3. Trifonov D.M. (2018). Analiz napriamiv rekuperatsii teplovoi enerhii vidpratsiovanykh haziv dvyhuna vnutrishnioho zhorannia [Analysis of the directions of recovery of thermal energy of exhaust gases of internal combustion engine]. Suchasni energetychni ustavovky na transporti i tekhnologii ta obladnannia dlia ikh obsluhovuvannia [Modern energy installations on transport and technology and equipment for their maintenance]. *9-th International Scientific and Practical Conference*. Kherson: Kherson State Maritime Academy.
4. Sprouse C. Iii and Depcik C. (2013). Review of organic Rankine cycles for internal combustion engine exhaust waste heat recovery. *Applied Thermal Engineering*, 51, 711-722.
5. Jadhao J.S., Thombare D.G. (2013). Review on exhaust gas heat recovery for I.C. Engine. *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*, 2 (12).
6. Aladayleh Wail, Alahmer Ali. (1915). Recovery of exhaust waste heat for ICE using the beta type stirling engine. *Journal of Energy*, Article ID 495418, 8 pages, <http://dx.doi.org/10.1155/2015/495418>.
7. Duraisamy Sivaprahasam, Subramaniam Harish, Raghavan Gopalan and Govindhan Sundararajan



- (2018). *Automotive waste heat recovery by thermoelectric generator technology, bringing thermoelectricity into reality*, Patricia Aranguren, IntechOpen, DOI: 10.5772/intechopen.75443.
8. Kuznetsov E.S., Boldin A.P., Vlasov V.M., et al. (2001). *Tekhnicheskaiia ekspluatatsia avtomobiley: uchebnik dlia vuzov* [Technical maintenance of cars: textbook for higher schools]. 4-th ed., revised and supplemented. Moscow: Nauka [in Russian].
  9. Lykov A.V. (1967). *Teoriia teploprovodnosti* [Theory of thermal conductivity]. Moscow: Vysshaia shkola [in Russian].
  10. Krokhta G.M., Usatykh N.A., Guskov Yu.A., Voronin D.M. (2016). Operating peculiarities of starter storage batteries during self-heating of the engine in winter. *Dostizheniia nauki i tekhniki APK – Achievements of Science and Technology of Agro-Industrial Complex*, 30 (12), 94-97.
  11. Pankratov N.I. (1985). *Ekspluatatsiia akkumulatornykh batarei pri nizkikh temperaturakh* [Operation of storage batteries at low temperatures]. *Avtomobilnyi Transport*, 2, 16–19 [in Russian].
  12. Timinskii V.I. (1985). *Spravochnik po elektrooborudovaniiu avtomobiley, traktorov, kombainov* [Handbook of the electrical equipment of cars, tractors, combines]. Moscow: Urozhai [in Russian].
  13. Tyshkevich L.N., Zhuravskii B.V. (2017). *Issledovaniie teplovykh protsessov akkumulatornoi batarei pri ekspluatatsii avtomobilia v usloviakh nizkikh otritsatelnykh temperatur* [Study of thermal processes of storage battery when operating a car under low negative temperatures]. Omsk: Bulletin of Siberian Automobile and Highway Academy, 6 (58) [in Russian].
  14. Markin A.G., Zhuravskii B.V., Zhigadlo A.P. (2015). *Energoobespecheniie puska dvigatel'ia vnutrennego sgoraniia avtomobilia* [Power supply of the start of a car internal combustion engine]. Omsk: Bulletin of Siberian Automobile and Highway Academy, 5 (45) [in Russian].
  15. Trifonov D.M. (2018). *Polipshennia palyvnoi ekonomichnosti i ekolohichnykh pokaznykov avtomobilia vykorystanniam teplovykh akumul'iatoriv fazovoho perekhodu dlia prohrivu dvyhuna* [Improvement of fuel economy and environmental performance of the car using phase change thermal batteries for engine warm-up]. *Candidate's thesis* (Operation and repair of means of transport). Kyiv (in Ukrainian).

Submitted 06.08.2018