

UDK 621.43:621.577

**AVTOMOBIL DVIGATELI CHIQINDI GAZLARINING ISSIQLIK
ENERGIYASINI TERMoeLEKTR GENERATOR YORDAMIDA
REKUPERATSIYA QILISH**

Asror Ziyadullayevich KIYAMOV

dotsent

Qarshi davlat texnika universiteti

Qarshi, O'zbekiston

e-mail: asror.kiyamov@mail.ru

Botirxon Farhod o'g'li MANSUROV

talaba

Qarshi davlat texnika universiteti

Qarshi, O'zbekiston

Annotatsiya

Maqolada chiqindi gazlarning issiqlik energiyasini termoelektr generator (TEG) yordamida rekupiratsiya qilish imkoniyati ko'rib chiqilgan. Turbokompressor, to'g'ridan-to'g'ri yoqilg'i purkash tizimi hamda chiqarish tizimiga o'rnatilgan termoelektr generatorni o'z ichiga olgan konseptual tizim taklif etilgan.

Tayanch so'zlar: ichki yonuv dvigateli, energiya rekupiratsiyasi, termoelektr generator, turbokompressor, chiqindi gazlar, avtomobil energiya samaradorligi

**РЕКУПЕРАЦИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ ВЫХЛОПНЫХ ГАЗОВ
АВТОМОБИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ
ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА**

Асрор Зиядуллаевич КИЯМОВ

доцент

Каршинский государственный технический университет

Карши, Узбекистан

e-mail: asror.kiyamov@mail.ru

Ботирхон Фарход угли МАНСУРОВ

студент

Каршинский государственный технический университет

Карши, Узбекистан

Аннотация

В статье исследуется возможность рекуперации тепловой энергии выхлопных газов с помощью термоэлектрического генератора (ТЭГ). Предложена концептуальная система, включающая турбокомпрессор, систему прямого впрыска топлива и термоэлектрический генератор, установленный в выхлопной системе.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, рекуперация энергии, термоэлектрический генератор, турбокомпрессор, выхлопные газы, энергоэффективность автомобиля.

Transport vositalarining ekologik xavfsizligi va energiya samaradorligiga qo'yilayotgan zamonaviy talablar ichki yonuv dvigatellarining samaradorligini oshirishning yangi usullarini izlashni taqozo etmoqda. Dvigatel konstruksiyalarini takomillashtirish sohasida sezilarli yutuqlarga erishilganiga qaramay, yoqilg'i energiyasining katta qismi sovitish tizimi va chiqindi gazlar orqali issiqlik sifatida yo'qotiladi.

Tadqiqotlar shuni ko'rsatadiki, yoqilg'i energiyasining 30–40% qismi chiqindi gazlar orqali yo'qotiladi, bu esa uni qayta foydalanish uchun katta imkoniyat yaratadi. Istiqbolli yechimlardan biri termoelektr generatorlarga asoslangan issiqlik energiyasini rekupiratsiya qilish tizimlari hisoblanadi.

Termoelektr generatorlar Zebek effekti asosida issiqlik energiyasini to'g'ridan-to'g'ri elektr energiyasiga aylantirish imkonini beradi. Shu sababli ular avtomobil texnikasida qo'llash uchun juda istiqbolli hisoblanadi.

Mazkur ishning maqsadi – avtomobil dvigatelining chiqindi gazlari issiqlik energiyasini termoelektr generator yordamida rekupiratsiya qilish tizimini tahlil qilish va uning dvigatel samaradorligiga ta'sirini baholashdir.

Ushbu tadqiqotning ilmiy yangiligi ichki yonuv dvigatelining chiqindi gazlari issiqlik energiyasini termoelektr generator yordamida rekupiratsiya qilish sxemasini ishlab chiqish va asoslashdan iborat.

Turbokompressor, to'g'ridan-to'g'ri yoqilg'i purkash tizimi va chiqarish tizimiga o'rnatilgan termoelektr generatorni o'z ichiga olgan integratsiyalashgan tizim taklif etildi.

Tadqiqot jarayonida chiqindi gazlarning energetik potentsiali tahlil qilindi hamda issiqlik energiyasini elektr energiyasiga samarali aylantirish sharoitlari aniqlangan. Shuningdek, rekupiratsiya tizimi samaradorligi va termoelektr generator quvvatining chiqindi gazlar haroratiga bog'liqligi aniqlangan.

Olingan natijalar chiqindi gazlarning issiqlik yo'qotishlaridan qisman foydalanish orqali dvigatelning umumiy energiya samaradorligini oshirish imkoniyatini ko'rsatadi.

Tadqiqotning amaliy ahamiyati avtomobil dvigatellarida chiqindi gazlar

issiqlik energiyasini rekupiratsiya qilish tizimini qo'llash imkoniyatini asoslashdan iborat.

Termoelektr generator chiqindi gazlar issiqlik energiyasining bir qismini elektr energiyasiga aylantiradi va bu energiya avtomobilning bort tizimlarini ta'minlash yoki qo'shimcha elektromotorni quvvatlantirish uchun ishlatilishi mumkin.

Mazkur texnologiyani joriy etish dvigatel energiya yo'qotishlarini kamaytiradi, yoqilg'i sarfini pasaytiradi hamda atmosfera ifloslanishini kamaytiradi.

Chiqindi gazlarning issiqlik energiyasini rekupiratsiya qilish tizimi samaradorligini baholash uchun avtomobil ichki yonuv dvigatelining energiya balansini nazariy va analitik tahlil qilish amalga oshirildi.

Tadqiqot quyidagi bosqichlarni o'z ichiga oldi:

Dvigatel energiya balansini tahlil qilish va chiqindi issiqlikdan termoelektr generator yordamida foydalanish

Tadqiqotning birinchi bosqichida ichki yonuv dvigatelida yoqilg'i energiyasining taqsimlanish tuzilmasi o'rganildi. Tahlillar shuni ko'rsatadiki, yoqilg'i energiyasining faqat bir qismi foydali mexanik energiyaga aylanadi, qolgan qismi esa turli issiqlik yo'qotishlari ko'rinishida tashqi muhitga chiqib ketadi. Amaliy tajribalar va nazariy tadqiqotlar natijalariga ko'ra, dvigatelda yoqilg'i energiyasining taxminan 30–40 % qismi foydali mexanik ishga aylanadi, 25–35 % qismi sovitish tizimi orqali yo'qotiladi, yana 30–40 % qismi esa chiqindi gazlar bilan issiqlik sifatida atmosferaga chiqariladi. Aynan shu chiqindi gazlar tarkibidagi issiqlik energiyasi qayta foydalanish uchun katta potensialga ega.

Keyingi bosqichda chiqindi gazlarning issiqlik potentsiali aniqlanadi. Ichki yonuv dvigatelidan chiqayotgan gazlar yuqori haroratga ega bo'lib, ularning tarkibida sezilarli miqdorda issiqlik energiyasi mavjud bo'ladi. Bu issiqlik energiyasini baholash uchun chiqindi gazlarning massa sarfi, ularning harorati hamda gazlarning solishtirma issiqlik sig'imi kabi parametrlar hisobga olinadi. Chiqindi gazlarning issiqlik oqimi odatda termodinamik formulalar asosida aniqlanadi. Ushbu hisoblashlarda gazlarning massa sarfi dvigatel ish rejimiga

bog‘liq ravishda aniqlanadi, harorat esa dvigatel yuklanishi va yonish jarayonining intensivligiga qarab o‘zgaradi. Natijada chiqindi gazlar tarkibidagi umumiy issiqlik oqimi aniqlanib, undan qayta foydalanish imkoniyatlari baholanadi.

Chiqindi gazlar tarkibidagi issiqlik energiyasidan samarali foydalanishning zamonaviy usullaridan biri termoelektr generatorlardan foydalanish hisoblanadi. Shu sababli tadqiqotning keyingi bosqichida termoelektr generatorning ishlashi modellashtirildi. Termoelektr generator (TEG) Seebeck effekti asosida ishlaydi va harorat farqi mavjud bo‘lganda issiqlik energiyasini to‘g‘ridan-to‘g‘ri elektr energiyasiga aylantirish imkonini beradi. Tizimda termoelektr modulning bir tomoni chiqindi gazlarning yuqori haroratli oqimi bilan qizdiriladi, ikkinchi tomoni esa sovitish tizimi yoki tashqi muhit yordamida sovutiladi. Shu tariqa modulning issiq va sovuq tomonlari o‘rtasida harorat gradienti hosil bo‘ladi. Ana shu harorat farqi yarim o‘tkazgich elementlar ichida zaryad tashuvchilar harakatini yuzaga keltirib, elektr kuchlanishi hosil qiladi. Generatorning ishlab chiqaradigan elektr quvvati aynan issiq va sovuq tomonlar orasidagi harorat farqi, termoelektr materiallarning xossalari hamda modul konstruksiyasiga bog‘liq bo‘ladi.

Termoelektr generator yordamida chiqindi issiqlikdan foydalanish jarayoni rekuperatsiya tizimi deb ataladi. Shu sababli keyingi bosqichda rekuperatsiya tizimining samaradorligi hisoblab chiqildi. Tizim samaradorligi ishlab chiqarilgan elektr energiyasining chiqindi gazlar tarkibidagi umumiy issiqlik energiyasiga nisbati orqali aniqlanadi. Bu ko‘rsatkich tizimning qanchalik samarali ishlayotganini baholash imkonini beradi. Hisob-kitoblar natijasida termoelektr generator yordamida chiqindi issiqlikning ma’lum bir qismini elektr energiyasiga aylantirish mumkinligi aniqlanadi. Bunday tizimlar dvigatelning umumiy energiya samaradorligini oshirishga hamda yoqilg‘i sarfini kamaytirishga xizmat qiladi.

Umuman olganda, dvigatel chiqindi gazlarining issiqlik energiyasini termoelektr generatorlar yordamida elektr energiyasiga aylantirish texnologiyasi energiyani tejash, dvigatelning umumiy samaradorligini oshirish va atrof-muhitga chiqariladigan issiqlik yo‘qotishlarini kamaytirishda muhim ahamiyatga ega hisoblanadi. Bunday tizimlardan avtomobil va traktor dvigatellarida foydalanish

energiya resurslaridan samarali foydalanish hamda ekologik ko'rsatkichlarni yaxshilashga xizmat qiladi.

Termoelektr generatorning ishlashini modellash. Issiqlik energiyasini elektr energiyasiga aylantirish uchun termoelektr generator (TEG) qo'llaniladigan tizim ko'rib chiqildi. Generator quvvati termoelektr modulning issiq va sovuq tomonlari o'rtasidagi harorat gradientini hisobga olgan holda aniqlanadi.

Rekupiratsiya tizimi samaradorligini hisoblash. Tizim samaradorligi hosil bo'lgan elektr quvvatining chiqindi gazlarning issiqlik energiyasiga nisbati sifatida baholandi.

Chiqindi gazlar haroratining ta'sirini tahlil qilish. Rekupiratsiya tizimi samaradorligining chiqindi gazlar haroratiga bog'liqligi 200–800 °C oralig'ida tahlil qilindi.

Olingan natijalar avtomobil dvigatellarida chiqindi gazlarning issiqlik energiyasini rekupiratsiya qilish tizimini qo'llashning potensial samaradorligini baholash imkonini berdi.

Tizimning konstruksiyasi va ishlash prinsipi. Taklif etilayotgan rekupiratsiya tizimi quyidagi asosiy elementlardan iborat:

turbokompressor;

interkuler;

to'g'ridan-to'g'ri yoqilg'i purkash tizimi;

termoelektr generator;

litiy-ion batareya;

qo'shimcha electromotor.

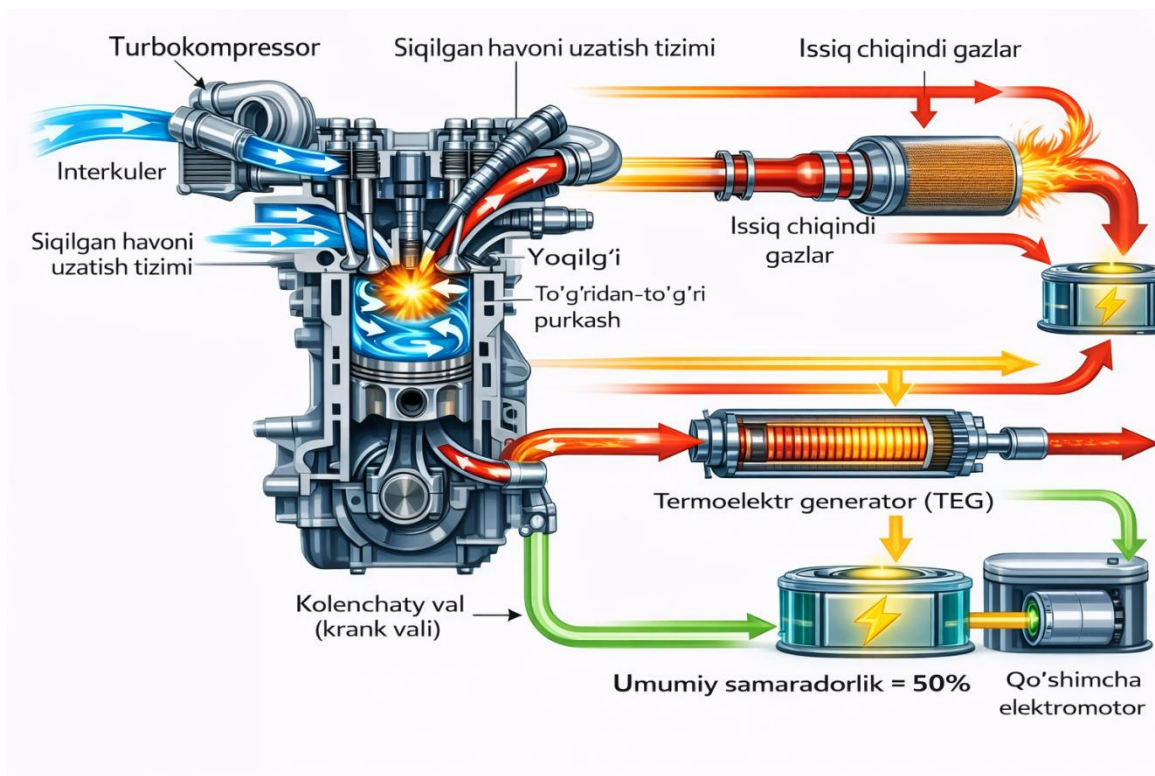
1-rasmda tizimning ishlash sxemasi ko'rsatilgan.

Ushbu tizimda havo turbokompressor va interkuler orqali dvigatelga kiradi, bu esa havo zichligini oshirib, yonish samaradorligini yaxshilaydi.

Yonilg'i to'g'ridan-to'g'ri purkash tizimi yordamida yonish kamerasiga yuboriladi. Yonish jarayonidan so'ng hosil bo'lgan yuqori haroratli chiqindi gazlar 600–800 °C gacha yetishi mumkin.

An'anaviy dvigatellarda bu energiya yo'qotiladi. Taklif etilgan tizimda esa ushbu issiqlik energiyasi elektr energiyasi ishlab chiqarish uchun foydalaniladi va dvigatelning foyidali sih koefitsienti ancha kutariladi. Natijada yoqilg'i sarfi kamayadi.

1-rasmda tizimning ishlash sxemasi ko'rsatilgan.



1-rasm. Avtomobil dvigatelining chiqindi gazlari energiyasini rekupiratsiya qilish sxemasi.

Termoelektr generatorning ishlash prinsipi. Termoelektr generator Zebek effekti asosida ishlaydi. Bu effektga ko'ra, termoelektr modulning ikki tomoni orasida harorat farqi mavjud bo'lsa, elektr kuchlanish hosil bo'ladi.

TEG quyidagi asosiy elementlardan iborat:

- issiq tomon (chiqindi gazlar bilan aloqa);
- sovuq tomon (sovitish tizimi);
- termoelektr modulyar.

Termoelektr generator (TEG) – bu issiqlik energiyasini to'g'ridan-to'g'ri elektr energiyasiga aylantirib beruvchi qurilma hisoblanadi. U termoelektr hodisalarga, ya'ni Seebeck effektiga asoslanib ishlaydi. Seebeck effektiga ko'ra,

agar ikki xil yarim o'tkazgich yoki metall materiallar o'zaro ulanib, ularning uchlari o'rtasida harorat farqi hosil qilinsa, elektr kuchlanishi paydo bo'ladi. Ana shu hosil bo'lgan elektr kuchlanishi tashqi elektr zanjir orqali tok hosil qiladi.

Termoelektr generatorlar odatda p-tip va n-tip yarim o'tkazgich elementlardan tashkil topgan bo'ladi. Bu elementlar elektr jihatdan ketma-ket, issiqlik jihatdan esa parallel ulangan holda maxsus modul shaklida joylashtiriladi. Modulning bir tomoni yuqori harorat manbaiga (masalan, dvigatel chiqindi gazlari, issiq sirt yoki yonish kamerasi) ulanadi, ikkinchi tomoni esa sovuq muhit bilan sovutiladi. Natijada modulning ikki tomoni o'rtasida harorat farqi hosil bo'ladi.

Harorat farqi paydo bo'lganda yarim o'tkazgich materiallar ichidagi erkin zaryad tashuvchilar (elektronlar yoki kovaklar) issiq tomondan sovuq tomonga harakatlana boshlaydi. Bu jarayon natijasida elektr potensial farqi yuzaga keladi. Agar generator chiqishiga elektr yuklama ulanadigan bo'lsa, ushbu potensial farq orqali elektr toki hosil bo'ladi va foydali energiya olinadi.

Termoelektr generatorlarning asosiy afzalliklaridan biri shundaki, ularning harakatlanuvchi mexanik qismlari mavjud emas. Shu sababli ular juda ishonchli, uzoq muddat xizmat qiladi va texnik xizmat ko'rsatish talabini kam talab qiladi. Bundan tashqari, ular jim ishlaydi, ekologik jihatdan xavfsiz va kichik o'lchamli bo'lishi mumkin.

Biroq termoelektr generatorlarning samaradorligi odatda nisbatan past bo'ladi va bu asosan ishlatilayotgan termoelektr materiallarning xossalriga bog'liq. Shunga qaramay, zamonaviy ilmiy tadqiqotlar yangi yarim o'tkazgich materiallarni ishlab chiqish orqali ularning samaradorligini oshirishga qaratilgan.

Hozirgi kunda termoelektr generatorlar turli sohalarda qo'llanilmoqda. Jumladan, avtomobil va traktor dvigatellarida chiqindi gazlarning issiqligidan elektr energiyasi olishda, kosmik apparatlarda energiya manbai sifatida, sanoat qurilmalarida ortiqcha issiqlikni qayta ishlatishda hamda mustaqil elektr ta'minoti tizimlarida foydalaniladi. Ayniqsa, ichki yonuv dvigatellarida chiqindi issiqlikni elektr energiyasiga aylantirish orqali yoqilg'i tejamliligini oshirish va atrof-muhitga chiqariladigan zararli moddalarni kamaytirish imkoniyati mavjud.

Shunday qilib, termoelektr generatorlar issiqlik energiyasini bevosita elektr energiyasiga aylantiruvchi samarali qurilmalar bo'lib, energiyani tejash va qayta tiklash texnologiyalarida muhim ahamiyat kasb etadi.

Haroratlar farqi elektr tok hosil bo'lishiga olib keladi.

Hosil bo'lgan elektr energiya quyidagilar uchun ishlatiladi:

litiy-ion batareyani zaryadlash;

avtomobil yordamchi tizimlarini ta'minlash;

qo'shimcha elektromotorni quvvatlantirish.

Tizimning energiya samaradorligi. Dvigatel energiya balansi quyidagicha taqsimlanadi:

Energiya yo'qotishlari	Ulushi
Mexanik ish	30–35 %
Sovitish tizimi orqali	25–30 %
Chiqindi gazlar orqali	35–40 %

Termoelektr generator yordamida chiqindi gaz energiyasining 5–10 % qismini qayta olish mumkin.

Natijada:

- dvigatelning umumiy FIK oshadi;
- yoqilg'i sarfi kamayadi;
- CO₂ chiqindilari kamayadi.

O'tkazilgan tadqiqot natijasida avtomobil ichki yonuv dvigatelining energiya samaradorligini chiqindi gazlar issiqlik energiyasini rekupiratsiya qilish tizimidan foydalanish orqali oshirish imkoniyati ko'rib chiqildi. Turbokompressor, to'g'ridan-to'g'ri yoqilg'i purkash tizimi hamda dvigatel chiqarish tizimiga o'rnatilgan termoelektr generatorni o'z ichiga olgan tizim sxemasi taklif etildi.

O'tkazilgan tahlillar shuni ko'rsatdiki, dvigatel chiqindi gazlari katta issiqlik potensialiga ega bo'lib, undan elektr energiyasi ishlab chiqarish uchun foydalanish mumkin. Termoelektr generatorni qo'llash chiqindi gazlarning issiqlik

energiyasining bir qismini elektr energiyasiga aylantirish imkonini beradi. Hosil bo'lgan elektr energiyasi litiy-ion batareyada to'planishi va avtomobilning yordamchi tizimlarini ta'minlash yoki qo'shimcha elektromotorni quvvatlantirish uchun ishlatilishi mumkin.

Aniqlandiki, rekupiratsiya tizimi samaradorligi chiqindi gazlar harorati hamda termoelektr generatorning issiq va sovuq tomonlari o'rtasidagi harorat gradientiga sezilarli darajada bog'liq. Chiqindi gazlar harorati oshishi bilan generatorning elektr quvvati va energiya aylantirish samaradorligi ham ortadi.

Olingan natijalar chiqindi gazlar issiqlik energiyasini rekupiratsiya qilish tizimidan foydalanish dvigatelning umumiy foydali ish koeffitsiyentini oshirish, yoqilg'i sarfini kamaytirish hamda issiqlik yo'qotishlarini kamaytirish imkonini berishini ko'rsatadi. Kelajakda bunday texnologiyalardan foydalanish yanada energiya tejamkor va ekologik xavfsiz transport vositalarini yaratishga xizmat qilishi mumkin.

Keyingi tadqiqotlarni termoelektr modullar konstruksiyasini takomillashtirish, ularning samaradorligini oshirish hamda avtomobil dvigatellarida issiqlik energiyasini rekupiratsiya qilish tizimi parametrlarini optimallashtirishga yo'naltirish maqsadga muvofiq hisoblanadi.

Termoelektr generatorni qo'llash chiqindi gazlar issiqlik energiyasining bir qismini elektr energiyasiga aylantirish imkonini beradi.

Natijalar shuni ko'rsatadiki, ushbu texnologiyani qo'llash:

- dvigatel FIKini oshiradi;
- yoqilg'i sarfini kamaytiradi;
- issiqlik yo'qotishlarini kamaytiradi.

Kelajakdagi tadqiqotlar termoelektr modullar konstruksiyasini takomillashtirish va rekupiratsiya tizimi parametrlarini optimallashtirishga qaratilishi lozim.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR:

1. Albatati F., Attar A. Analytical and Experimental Study of Thermoelectric

Generator (TEG) System for Automotive Exhaust Waste Heat Recovery // Energies. – 2021. – Vol. 14. – №1. – P. 204. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14010204> (MDPI)

2. Liu X., Deng Y., Li Z., Su C. Performance analysis of thermoelectric generators in automobile exhaust systems // Energy Conversion and Management. – 2020. – Vol. 205. – P. 112429. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112429>

3. Wang Y., Li H., Zhang X. Performance study on a thermoelectric generator with direct contact configuration for vehicle exhaust heat recovery // Energy Reports. – 2022. – Vol. 8. – P. 1343–1352. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.01.075> (ScienceDirect)

4. Gürbüz H. Experimental investigation of a novel thermoelectric generator design for internal combustion engine exhaust heat recovery // Applied Thermal Engineering. – 2022. – Vol. 203. – P. 117892. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117892> (ScienceDirect)

5. Pandey A., Kumar A. Heat exchangers for automotive exhaust thermoelectric generators: A review // AIP Conference Proceedings. – 2021. – Vol. 2341. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0048950> (AIP Publishing)

6. Massaguer A., Montoro L., Pujol T. Analysis of an automotive thermoelectric generator coupled to diesel engine exhaust system // Renewable Energy and Power Quality Journal. – 2021. – Vol. 19. – P. 407–412. DOI: <https://doi.org/10.24084/repqj19.362> (Repqi)

7. Wang Y., Chen Z. Review of automotive thermoelectric generator structure and performance optimization // Processes. – 2025. – Vol. 13. – №6. – P. 1931. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr13061931> (MDPI)

8. Nohra C., Leduc P. Hybrid thermoelectric generator system for enhanced waste heat recovery // Energy Conversion and Management: X. – 2025. – Vol. 27. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.100501> (ScienceDirect)

9. Ge M., Zhang H., Li W. Experimental study on enhancing thermoelectric generator efficiency using multi-orifice plate // Journal of Cleaner Production. –

2025. – Vol. 436. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141302> ([ScienceDirect](#))

10. Luo D., Chen Y. CFD and thermal-electric coupled analysis of a stacked automotive thermoelectric generator integrated with heat pipes // International Journal of Green Energy. – 2025. DOI: <https://doi.org/10.1080/15435075.2025.2569648> ([Taylor & Francis Online](#))

11. Duy D.T., Nguyen T.H. A comprehensive review of advances in thermoelectric materials for energy conversion // Energy Materials. – 2024. – Vol. 19. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enmat.2024.100435> ([ScienceDirect](#))

12. He H., Zhao Y. Optimized electrical topology of automobile exhaust thermoelectric generator using coupled simulation // Energy. – 2024. – Vol. 285. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130441> ([ScienceDirect](#))

13. Wiranata R. Experimental testing of thermoelectric power generation from vehicle exhaust heat // Jurnal Ilmiah Teknik Mesin dan Industri. – 2023. – Vol. 5. – №2. – P. 88–95. ([Jurnal Mahasiswa](#))

14. Zhang X., Li Q. Thermal optimization of automotive thermoelectric generators using advanced heat exchangers // Applied Energy. – 2023. – Vol. 332. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120498>