

УДК: 621.43:621.362:629.33

<https://doi.org/10.70769/2181-4732.ITJ.2026-m.13>

ОБОСНОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА РЕКУПЕРАЦИИ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ ВЫХЛОПНЫХ ГАЗОВ АВТОМОБИЛЯ CHEVROLET COBALT В КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН

Киямов Асрор Зиядуллаевич – доктор философии по техническим наукам (PhD), доцент,
E-mail: asror.kiyamov@mail.ru, ORCID-0009-0002-4880-9725,
Science ID:FQD-0626-0052.

Каршинский государственный технический университет, г. Карши, Узбекистан

Аннотация. Повышение энергетической эффективности автомобильного транспорта является одной из актуальных задач современного автомобилестроения. Значительная часть энергии топлива в двигателях внутреннего сгорания теряется в виде тепловой энергии, уносимой системой охлаждения и выхлопными газами. Особый интерес представляет использование термоэлектрических генераторов, позволяющих преобразовывать часть тепловой энергии выхлопных газов в электрическую энергию.

В статье выполнена расчётно-аналитическая оценка энергетического потенциала рекуперации тепловой энергии выхлопных газов автомобиля Chevrolet Cobalt, широко эксплуатируемого в Республике Узбекистан. Рассмотрено влияние температуры выхлопных газов и температуры окружающей среды на эффективность работы термоэлектрического генератора.

Проведён анализ теплового потенциала выхлопных газов автомобиля Chevrolet Cobalt для различных режимов эксплуатации и температур выхлопных газов в диапазоне 300–800 °C, характерном для различных режимов работы двигателя. Определены возможные значения электрической мощности, получаемой при использовании термоэлектрической рекуперации. Установлено, что климатические условия Республики Узбекистан оказывают существенное влияние на температурный режим работы термоэлектрического генератора и эффективность преобразования энергии.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке энергосберегающих систем автомобильного транспорта и совершенствовании гибридных силовых установок.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, Chevrolet Cobalt, рекуперация энергии, термоэлектрический генератор, выхлопные газы, энергетическая эффективность, температура выхлопных газов, климатические условия Узбекистана.

UDC: 621.43:621.362:629.33

JUSTIFICATION OF THE ENERGY POTENTIAL OF EXHAUST GAS WASTE HEAT RECOVERY FROM THE CHEVROLET COBALT PASSENGER CAR UNDER THE CLIMATIC CONDITIONS OF THE REPUBLIC OF UZBEKISTAN

Kiyamov, Asror – Doctor of Philosophy in Technical Sciences (PhD).

Karshi State Technical University, Karshi city, Uzbekistan

Abstract. Improving the energy efficiency of automotive transport is one of the key challenges of modern automotive engineering. A significant portion of the fuel energy in internal combustion engines is lost in the form of thermal energy dissipated through the cooling system and exhaust gases. Of particular interest is the use of thermoelectric generators, which make it possible to convert part of the thermal energy of exhaust gases into electrical energy.

This paper presents a computational and analytical assessment of the energy potential for recovering thermal energy from the exhaust gases of the Chevrolet Cobalt passenger car, which is widely operated in the Republic of Uzbekistan. The influence of exhaust gas temperature and ambient temperature on the performance efficiency of a thermoelectric generator is investigated.

An analysis of the thermal potential of Chevrolet Cobalt exhaust gases was carried out for various operating conditions and exhaust gas temperatures in the range of 300–800 °C, which is typical for different engine operating modes. The potential electrical power that can be generated through thermoelectric energy recovery was determined. It was established that the climatic conditions of the Republic of Uzbekistan have a significant impact on the operating temperature regime of the thermoelectric generator and on the energy conversion efficiency.

The obtained results can be used in the development of energy-saving automotive systems and in the improvement of hybrid powertrain technologies.

Keywords: internal combustion engine, Chevrolet Cobalt, energy recovery, thermoelectric generator, exhaust gases, energy efficiency, exhaust gas temperature, climatic conditions of Uzbekistan.

UO‘K: 621.43:621.362:629.33

O‘ZBEKISTON RESPUBLIKASINING IQLIM SHAROITLARIDA CHEVROLET COBALT AVTOMOBILI CHIQINDI GAZLARI ISSIQLIK ENERGIYASINI REKUPERATSIYA QILISHNING ENERGETIK SALOHİYATINI ASOSLASH

Kiyamov Asror Ziyadullayevich – texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD).

Qarshi davlat texnika universiteti, Qarshi sh., O‘zbekiston

Annotatsiya. *Avtomobil transportining energetik samaradorligini oshirish zamonaviy avtomobilsozlikning dolzarb vazifalaridan biri hisoblanadi. Ichki yonuv dvigatellarida yonilg‘i energiyasining sezilarli qismi sovitish tizimi va chiqindi gazlar orqali atrof-muhitga uzatiladigan issiqlik energiyasi ko‘rinishida yo‘qotiladi. Chiqindi gazlar issiqlik energiyasining bir qismini elektr energiyasiga aylantirish imkonini beruvchi termoelektr generatorlardan foydalanish alohida qiziqish uyg‘otadi.*

Mazkur maqolada O‘zbekiston Respublikasida keng ekspluatatsiya qilinayotgan Chevrolet Cobalt avtomobilining chiqindi gazlari issiqlik energiyasini rekupersiya qilishning energetik salohiyati hisobiy-tahliliy jihatdan baholangan. Chiqindi gazlar harorati hamda atrof-muhit haroratining termoelektr generatorning ishlash samaradorligiga ta’siri ko‘rib chiqilgan.

Chevrolet Cobalt avtomobili chiqindi gazlarining issiqlik salohiyati dvigatelning turli ish rejimlariga xos bo‘lgan 300–800 °C diapazondagi chiqindi gazlar haroratlari uchun tahlil qilindi. Termoelektrik rekupersiya tizimidan foydalanilganda olinishi mumkin bo‘lgan elektr quvvatining qiymatlari aniqlandi. O‘zbekiston Respublikasining iqlim sharoitlari termoelektr generatorning harorat rejimi va energiyani aylantirish samaradorligiga sezilarli ta’sir ko‘rsatishi belgilandi.

Olingan natijalardan avtomobil transportida energiya tejovchi tizimlarni ishlab chiqishda hamda gibrid kuch qurilmalarini takomillashtirishda foydalanish mumkin.

Kalit so‘zlar: *ichki yonuv dvigateli, Chevrolet Cobalt, energiyani rekupersiya qilish, termoelektr generator, chiqindi gazlar, energetik samaradorlik, chiqindi gazlar harorati, O‘zbekistonning iqlim sharoitlari.*

Введение

В современных условиях развития автомобильного транспорта особое значение приобретают вопросы повышения энергетической эффективности двигателей внутреннего сгорания и снижения расхода топлива. Несмотря на значительный прогресс в области совершенствования систем впрыска топлива, турбонаддува и электронного управления двигателями, значительная часть энергии топлива по-прежнему безвозвратно теряется в окружающую среду.

Согласно результатам многочисленных исследований, только 30–40% химической энергии топлива преобразуется в полезную механическую работу, тогда как остальная энергия рассеивается через систему охлаждения и выхлопные газы [1–4]. При этом доля тепловой энергии, уносимой выхлопными газами, может достигать 35–40 % от общего энергетического баланса двигателя [1–4].

Одним из перспективных направлений повышения энергетической эффективности транспортных средств является использование систем рекуперации тепловой энергии выхлопных газов. Среди существующих технологий особое место занимают термоэлектрические генераторы, работа которых основана на эффекте Зеебека [3, 4, 6, 7]. Данные устройства позволяют непосредственно преобразовывать тепловую энергию в электрическую без применения дополнительных механических преобразователей.

В работах ряда исследователей выполнены расчётные и экспериментальные исследования термоэлектрических генераторов, устанавливаемых в выпускной системе двигателей внутреннего сгорания [1, 2, 5, 8, 9].

Наиболее существенные результаты получены при исследовании конструкций теплообменников, параметров теплообмена и характеристик термоэлектрических модулей. [5–9] Однако большинство известных исследований посвящено конструктивным особенностям термоэлектрических генераторов и их экспериментальным характеристикам.

Вместе с тем вопросы оценки энергетического потенциала рекуперации тепловой энергии выхлопных газов в специфических климатических условиях Республики Узбекистан остаются недостаточно изученными. Республика Узбекистан характеризуется резко континентальным климатом, при котором температура окружающего воздуха в летний период может превышать $+45^{\circ}\text{C}$ [10]. Данные условия оказывают существенное влияние на процессы теплообмена и эффективность работы термоэлектрических систем.

В связи с этим возникает необходимость исследования возможности применения термоэлектрической рекуперации энергии на наиболее распространённых автомобилях, эксплуатируемых на территории Республики Узбекистан [1, 2].

Целью исследования является оценка энергетического потенциала рекуперации тепловой энергии выхлопных газов автомобиля Chevrolet Cobalt с использованием термоэлектрического генератора в климатических условиях Республики Узбекистан.

Научная новизна работы заключается в расчётно-аналитической оценке энергетического потенциала рекуперации тепловой энергии выхлопных газов автомобиля Chevrolet Cobalt применительно к климатическим условиям Республики Узбекистан.

Впервые выполнен анализ влияния температуры окружающей среды, характерной для климатических условий Республики Узбекистан, на потенциальную эффективность термоэлектрической рекуперации энергии выхлопных газов.

Определены диапазоны температур выхлопных газов, обеспечивающие наибольшую эффективность работы термоэлектрического генератора в условиях эксплуатации автомобиля Chevrolet Cobalt.

Практическая значимость исследования заключается в возможности использования полученных результатов при проектировании и внедрении систем рекуперации тепловой энергии на автомобилях, эксплуатируемых в условиях Республики Узбекистан.

Результаты исследования могут быть использованы при разработке энергосберегающих технологий автомобильного транспорта, а также при создании перспективных гибридных силовых установок.

Методы и материалы

Для оценки энергетического потенциала рекуперации тепловой энергии выхлопных газов был проведён расчётно-аналитический анализ работы бензинового двигателя автомобиля Chevrolet Cobalt в условиях эксплуатации Республики Узбекистан.

В качестве объекта исследования выбран автомобиль Chevrolet Cobalt с бензиновым двигателем рабочим объёмом 1,5 л мощностью 78 кВт (106 л.с.), который является одним из наиболее распространённых легковых автомобилей, эксплуатируемых на территории Республики Узбекистан.

Предметом исследования являются закономерности изменения энергетического потенциала выхлопных газов и эффективности термоэлектрического преобразования энергии в зависимости от температуры выхлопных газов и температуры окружающей среды.

Исследование проводилось в несколько этапов.

Расчёт тепловой мощности топлива

Сначала определяется массовый расход топлива

$$\dot{m}_f = \frac{G_f \cdot \rho}{3600},$$

где $\dot{m}_f$ — массовый расход топлива, кг/с; G_f — расход топлива, л/ч; ρ — плотность топлива, кг/л.

Затем определяется тепловая мощность топлива

$$N_{fuel} = \dot{m}_f \cdot H_u,$$

где: N_{fuel} — тепловая мощность топлива, кВт; H_u — низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг.

Расчёт тепловой мощности выхлопных газов

Согласно данным по бензиновым двигателям, около 35 % энергии топлива уносится выхлопными газами [1–4]. Поэтому тепловая мощность выхлопных газов определяется выражением

$$N_{exh} = k \cdot N_{fuel},$$

где N_{exh} - тепловая мощность выхлопных газов, кВт; N_{fuel} — тепловая мощность топлива, кВт;
k - доля энергии, уносимой выхлопными газами (k=0,35).

Расчёт электрической мощности термоэлектрического генератора

Электрическая мощность термоэлектрического генератора определяется по формуле

$$N_{TEG} = \eta_{TEG} \cdot N_{exh},$$

где N_{TEG} - электрическая мощность термоэлектрического генератора, Вт;

η_{TEG} - коэффициент полезного действия термоэлектрического генератора;

N_{exh} - тепловая мощность выхлопных газов, кВт.

Обработка и анализ результатов

По результатам расчётов были построены зависимости:

тепловой мощности выхлопных газов от температуры выхлопа;

электрической мощности термоэлектрического генератора от температуры выхлопных газов;

эффективности рекуперации от температуры окружающей среды;

потенциального прироста общего КПД двигателя при использовании термоэлектрического генератора.

Полученные зависимости позволили оценить эффективность применения систем термоэлектрической рекуперации энергии на легковых автомобилях в условиях Республики Узбекистан и определить наиболее рациональные режимы их эксплуатации.

Результаты и обсуждение

Оценка теплового потенциала выхлопных газов двигателя Chevrolet Cobalt

Известно, что в двигателях внутреннего сгорания около 35–40 % энергии топлива теряется через выхлопную систему [1–4]. Данная энергия представляет значительный интерес для последующей рекуперации.

Выполнен расчёт теплового потенциала выхлопных газов (таблица 1) для различных режимов работы двигателя.

Таблица 1. Расчётные параметры выхлопных газов двигателя Chevrolet Cobalt

Режим	Q _{вых} , кВт
Холостой ход	2,47
Городской режим	8,35
Трассовый режим	16,71

Полученные данные показывают, что при переходе от холостого хода к нагрузочным режимам работы двигателя существенно возрастает доступный тепловой потенциал выхлопных газов (рис 1).



Рис.1. Тепловой потенциал выхлопных газов Chevrolet Cobalt

Наибольший энергетический потенциал наблюдается при высоких нагрузках двигателя, когда температура выхлопных газов достигает 700–800 °C [1, 8, 9].

Расчёт потенциальной мощности термоэлектрического генератора

Для оценки эффективности рекуперации были рассмотрены три значения коэффициента полезного действия термоэлектрического генератора [4–7]: 3 %; 5 %; 8 %.

Результаты расчётов представлены в таблице 2.

Таблица 2. Расчётная электрическая мощность термоэлектрического генератора

Режим работы	Тепловой потенциал выхлопных газов, кВт	Мощность ТЭГ при $\eta = 3$ %, Вт	Мощность ТЭГ при $\eta = 5$ %, Вт	Мощность ТЭГ при $\eta = 8$ %, Вт
Холостой ход	2,47	74	124	198
Городской режим	8,35	251	418	668
Трассовый режим	16,71	501	835	1336

Из таблицы 2 видно, что даже при сравнительно невысоком коэффициенте полезного действия термоэлектрического генератора возможно получение дополнительной электрической мощности в диапазоне от 74 до 1336 Вт в зависимости от режима эксплуатации автомобиля и эффективности термоэлектрического генератора.

Для дополнительной оценки влияния температурного режима выхлопных газов была построена зависимость электрической мощности ТЭГ от температуры выхлопа в диапазоне 300–800 °C (рис 2).

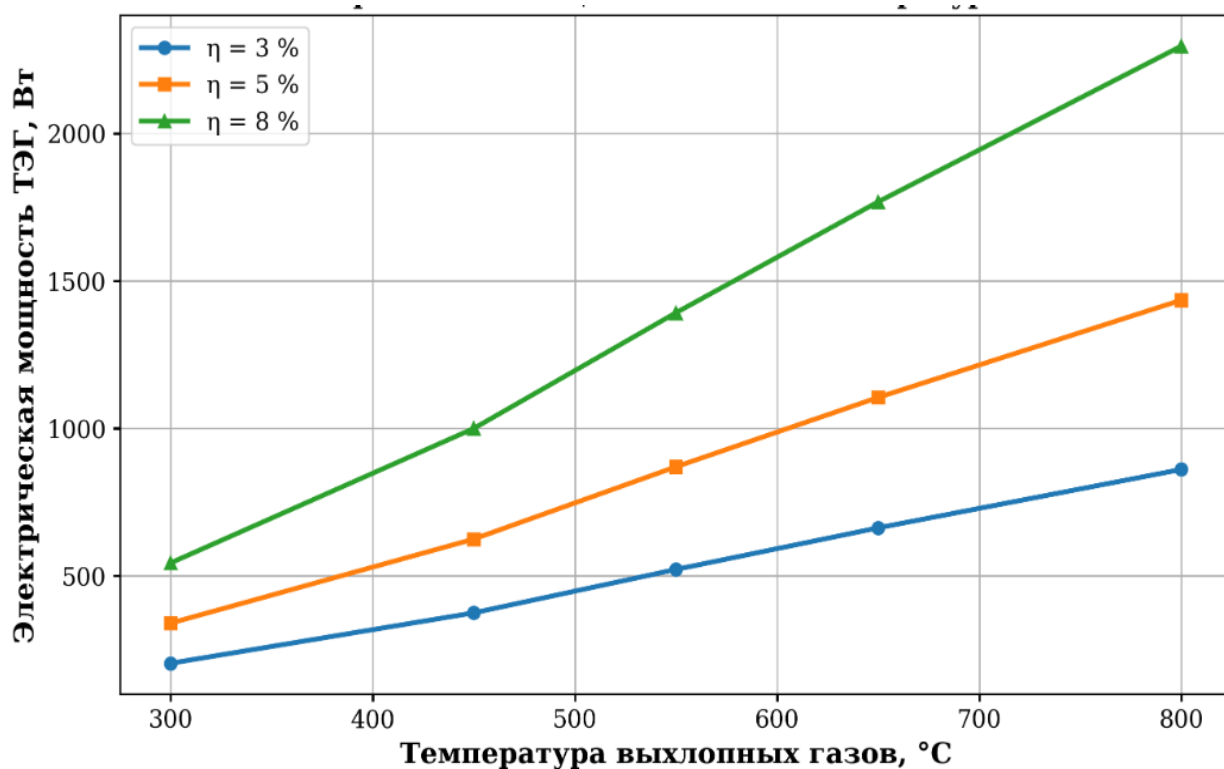


Рис. 2. – Зависимость электрической мощности термоэлектрического генератора от температуры выхлопных газов.

При использовании современных термоэлектрических модулей с КПД порядка 8% потенциальная мощность может превышать 2 кВт [4–7].

Влияние температуры окружающей среды

Особенностью эксплуатации автомобилей в Республике Узбекистан является высокая температура окружающей среды в летний период.

Для оценки влияния данного фактора были рассмотрены четыре температурных режима (таблица 3).

Установлено, что повышение температуры окружающей среды приводит к уменьшению температурного перепада между горячей и холодной сторонами термоэлектрического генератора [4, 6, 7, 10].

В результате эффективность преобразования энергии снижается на 9–12 % по сравнению со стандартными условиями эксплуатации (рис 3).

Таблица 3. Влияние температуры окружающей среды на эффективность термоэлектрической рекуперации

Температура окружающей среды, °C	Относительная эффективность ТЭГ, %
20	100
30	96
40	91
45	88

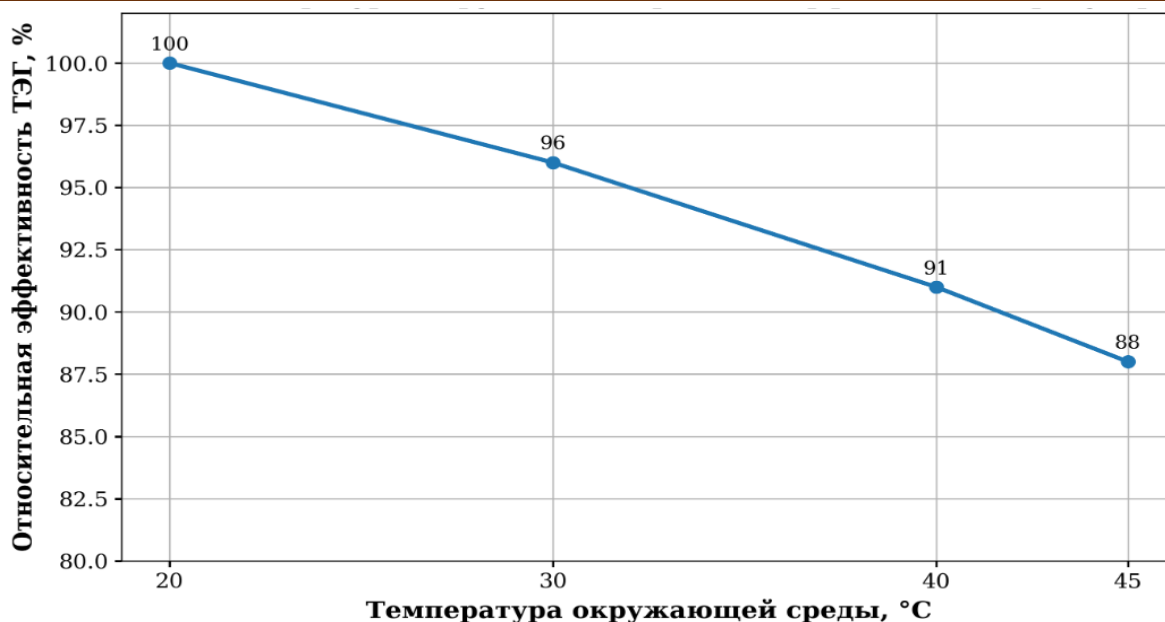


Рис. 3. – Зависимость эффективности рекуперации от температуры окружающей среды.

Полученные результаты свидетельствуют о необходимости применения более эффективных систем охлаждения термоэлектрических модулей при эксплуатации автомобилей в жарком климате Республики Узбекистан [6, 7, 10].

Проведённые расчёты показали наличие значительного энергетического потенциала выхлопных газов двигателя автомобиля Chevrolet Cobalt.

Даже при сравнительно низком коэффициенте полезного действия термоэлектрических модулей возможно получение дополнительной электрической мощности, достаточной для питания части бортовых потребителей автомобиля [5, 8, 9].

Наибольший эффект достигается при работе двигателя под высокой нагрузкой, когда температура выхлопных газов превышает 600 °C [8, 9].

Установлено, что климатические условия Республики Узбекистан оказывают заметное влияние на эффективность работы термоэлектрического генератора. При повышении температуры окружающей среды эффективность системы снижается вследствие уменьшения температурного градиента между рабочими поверхностями термоэлектрических модулей.

Полученные результаты подтверждают перспективность применения систем термоэлектрической рекуперации тепловой энергии на автомобилях, эксплуатируемых в условиях Республики Узбекистан, и позволяют определить направления дальнейшего совершенствования подобных систем.

Наибольший потенциал рекуперации наблюдается в трассовом режиме, что связано с увеличением часового расхода топлива и ростом тепловой мощности выхлопных газов. В городском режиме потенциал ниже, однако получаемая электрическая мощность достаточна для частичного питания бортовых потребителей автомобиля.

Таким образом, применение термоэлектрического генератора на автомобиле Chevrolet Cobalt в условиях эксплуатации Республики Узбекистан может рассматриваться как перспективное направление повышения энергетической эффективности, особенно при движении в установившихся режимах.

Заключение

В работе выполнена расчётно-аналитическая оценка энергетического потенциала рекуперации тепловой энергии выхлопных газов автомобиля Chevrolet Cobalt, эксплуатируемого в климатических условиях Республики Узбекистан.

Проведённый анализ показал, что выхлопные газы двигателя обладают значительным запасом тепловой энергии, который может быть использован для дополнительной выработки

электрической энергии с применением термоэлектрических генераторов. Установлено, что тепловой потенциал выхлопных газов изменяется в зависимости от режима работы двигателя и составляет от 2,47 кВт на холостом ходу до 16,71 кВт в трассовом режиме эксплуатации.

Расчёты показали, что при использовании современных термоэлектрических модулей с коэффициентом полезного действия 3–8% возможно получение дополнительной электрической мощности в диапазоне от 74 до 1336 Вт. Полученная энергия может быть использована для питания отдельных бортовых потребителей автомобиля, что способствует снижению нагрузки на генератор и повышению общей энергетической эффективности транспортного средства.

Исследование влияния климатических факторов показало, что повышение температуры окружающей среды до 45 °С приводит к снижению эффективности термоэлектрической рекуперации на 9–12% вследствие уменьшения температурного перепада между горячей и холодной сторонами термоэлектрических модулей. Это свидетельствует о необходимости совершенствования систем охлаждения термоэлектрических генераторов при эксплуатации автомобилей в условиях жаркого климата.

Наибольший потенциал рекуперации энергии наблюдается при движении автомобиля в трассовом режиме, характеризующемся повышенной температурой выхлопных газов и увеличенным расходом топлива. Полученные результаты подтверждают перспективность применения систем термоэлектрической рекуперации тепловой энергии на автомобилях Chevrolet Cobalt и могут быть использованы при разработке энергосберегающих технологий автомобильного транспорта, гибридных силовых установок и интеллектуальных систем управления энергопотреблением транспортных средств [6–10].

Литература

- [1] Нигматуллин Ш.Ф., Самиков Р.Ф., Разяпов М.М. Исследование работы термоэлектрического генератора в системе выпуска отработавших газов ДВС // Транспортное машиностроение. 2022. № 4. С. 45–52.
- [2] Юдин А.В., Самиков Р.Ф. Современное состояние и перспективы разработки термоэлектрических генераторов для преобразования тепловой энергии выхлопных газов ДВС // Молодой ученый. 2021. № 18. С. 112–117.
- [3] Rowe D. M. Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano. Boca Raton: CRC Press, 2006.
- [4] Bell L. E. Cooling, Heating, Generating Power, and Recovering Waste Heat with Thermoelectric Systems // Science. 2008. Vol. 321. No. 5895. P. 1457–1461. DOI: 10.1126/science.1158899.
- [5] Mori M. Development of Thermoelectric Generators for Automotive Waste Heat Recovery // Journal of Electronic Materials. 2011. Vol. 40. No. 5. P. 1105–1111. DOI: 10.1007/s11664-011-1560-z.
- [6] Champier D. Thermoelectric Generators: A Review of Applications // Energy Conversion and Management. 2017. Vol. 140. P. 167–181. DOI: 10.1016/j.enconman.2017.02.070
- [7] He W. Recent Development and Application of Thermoelectric Generator and Cooler // Applied Energy. 2015. Vol. 143. P. 1–25. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.01.058.
- [8] Karri M. A. Numerical Analysis of Automotive Exhaust Thermoelectric Generator // International Journal of Thermal Sciences. 2011. Vol. 50. No. 7. P. 1221–1230. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2011.02.016.
- [9] Kim T. Y. Performance Analysis of Automotive Thermoelectric Generator under Various Driving Conditions // Energy. 2016. Vol. 114. P. 1162–1171. DOI: 10.1016/j.energy.2016.08.069.
- [10] Akhmedov B. A. Energy Efficiency Improvement of Vehicle Power Systems under Hot Climate Conditions // E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 401. DOI: 10.1051/e3sconf/202340101012.