

УДК 621.363:621.313

РЕКУПЕРАЦІЯ ЕНЕРГІЇ ДВИГУНА ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ**Літвінова М.Б.***Національний університет кораблебудування імені адмірала С.Й. Макарова, м. Миколаїв
Сєліверстова С.Р.**Херсонська державна морська академія***Штанько О.Д.***Національний університет кораблебудування імені адмірала С.Й. Макарова, м. Миколаїв*

У роботі наведено принципове технічне рішення та відповідна конструкція термоелектричного перетворювача теплової енергії вихлопних газів двигуна внутрішнього згорання. Розроблено відповідний термоелектричний пристрій для двигуна об'ємом циліндрів більш 1,5 л потужністю до 300 Вт. Здійснено відповідний тепловий та електричний розрахунок. Метою є заміна електромеханічного генератора за допомогою установки допоміжного електричного двигуна до двигуна внутрішнього згорання для ефективної переробки енергії газів, що викидається у повітря. Допоміжний двигун встановлюється на вихлопну трубу автомобіля, спрощує його обслуговування, зменшує витрату палива та може використовуватися для різних типів автомобілів із відповідним типом двигуна.

Ключові слова: *двигун внутрішнього згорання, рекуперація енергії, електричний генератор.*

Постановка проблеми. Сучасна енергетична безпека держави – це розвиток нетрадиційних, зокрема, відновлюваних джерел енергії. Тому вирішення проблеми енергетичної безпеки через підвищення значення альтернативної енергії є ключовим питанням як науки, так і економіки [1].

Термоелектрика є перспективним науково-технічним напрямком, який заснований на використанні прямого, безмашинного перетворення теплової енергії в електричну [2]. Найбільш перспективним застосуванням термоелектрики із наслідками для «зелених технологій», безсумнівно, є рекуперація теплових втрат, зокрема автомобільного транспорту й інших відходів для повторного їх застосування (перетворення в електричну енергію) з метою економії палива та зменшення викидів парникових газів [3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відповідно до рекламаних даних на сучасні машини з електромеханічними перетворювачами використання паливної енергії відбувається із ККД 36–40 % [4]. З урахуванням різних втрат у двигуні лише 25 % енергії палива, що залишилося, витрачається на механічну роботу автомобіля. Якщо обчислити також втрати при механічній роботі автомобіля, то на здійснення руху витрачається не більше 14 % від енергії, що міститься у паливі [4]. З таким ККД можна вважати автомобіль пересувним обігрівачем навколишнього середовища.

Втрати спожитої енергії розподіляються таким чином: 25 % іде на охолодження двигуна; 35 % є втратами енергії розігрітого газу випускної системи. Для перетворення енергії розігрітого газу з метою економії палива на цей час використовуються термоелектричні генератори (ТЕГ). Вони встановлюються за каталітичним нейтралізатором по ходу системи випуску. Таке розміщення обмежує верхню границю температури нагріву поверхні ТЕГ до 500–600 °С. Для цих температур ККД термоелектричного генератора принципово не перевищує 5 % [5]. Із урахуванням вказаної температури ТЕГ для двигуна з об'ємом циліндрів до 1,5 л може виробляти не більш 100 Вт потужності, що замало для виключення електромеханічного генератора із електричної схеми автомобіля [6].

Метою роботи є розробка термоелектричного генератора, який повністю замінює електромеханічний і здійснює ефективну переробку надлишкової енергії, яка викидається у повітря.

Завдяки розвитку напівпровідникових технологій ККД сучасних термоелектричних генераторів досягла в середньому до 5 % [7]. Мало того, уже існує технологія, що дозволяє підвищити ККД до 6,5 % при різниці температур до 500 °С. На додаток, фірмою Altek випускаються двокаскадні термоелектричні модулі з робочою температурою до

900 °С с ККД, що перевищує 10 % (термогенеруючі модулі ALTEK - 1023 і ALTEK – 1024). Це дозволяє застосувати нові конструкції термоелектричних генераторів і використовувати їх у більш високотемпературному режимі [8]. На їх основі у роботі запропоновано конструкцію секційного термоелектрогенератора, який можна використовувати для будь-яких конструкцій автомобільних двигунів, і який зможе повністю замінити електромеханічні генератори автомобілів.

Принцип розрахунку швидкості руху та температури випускних газів на виході випускного колектора. Випускна система автомобіля складається з п'яти основних складових: випускного колектора, трубопроводу, глушника, каталітичного нейтралізатора, проміжного резонатора.

У сучасних автомобілях поширені дві схеми трубчастих випускних колекторів, тобто короткий колектор, якщо чотири труби з'єднані в одну трубу або довгий колектор, якщо чотири труби з'єднані попарно та далі з'єднані в одну трубу. У деяких двигунах влучення випускного газу в циліндр обумовлено технологічно, а саме – регулюється октанове число газової суміші. Тому при заміні колектора необхідно врахувати особливості роботи двигуна.

Перетворювач треба встановити замість колектора, де температура відпрацьованого газу може становити до 900 °С, так щоб не порушувати роботу двигуна. Пропонується установка секції термоелектричного генератора на кожному із чотирьох трубопроводів колектора. Для розрахунку тепловіддачі важливим є процес проходження газу по цих трубопроводах. По-перше їхній об'єм вибирається рівним подвійному робочому об'єму циліндра. Це є умовою забезпечення малості впливу роботи одного циліндра на іншій. По-друге, протягом 1/4 робочого циклу двигуна порція відпрацьованого газу з циліндра витискує попередню і протягом часу, що залишився (3/4 циклу), ця порція газу практично залишається без руху.

Перша умова визначає об'єм порції газу та перемішування його з попередньою порцією. Тобто, протягом 3/8 газ остигає в трубопроводі до температури T_2 . Потім порція газу температурою T_1 перемішується з попередньою протягом 1/4 часу циклу з витіканням порції газу температурою T_2 до трубопроводу вихлопної труби. Ця температура повинна бути не менш робочої температури каталітичного нейтралізатора. Звідси вимога до швидкості остигання газу [5]:

$$\frac{T_1 + T_2}{2} - \nu_T \cdot t_u = T_2, \quad (1)$$

де ν_T – швидкість зниження температури; t_u – час циклу.

$$\nu_T = \frac{(T_1 - T_2)}{2 \cdot t_u}. \quad (2)$$

Підставивши значення температур $T_1 = 900^\circ\text{C}$ и $T_2 = 500^\circ\text{C}$ маємо значення максимальної швидкості зниження температури вихлопного газу:

$$\nu_T = \frac{200}{t_u}. \quad (3)$$

Слід зазначити наступне: по-перше, такий результат стосується відразу до двох порцій газу. А це означає, що середня температура буде дорівнює 700°C з коливанням температури від 900°C до 500°C . У такому екстремальному режимі може працювати виключно термоелектричний генератор. До цього треба додати, що газ у колекторі перебуває під надлишковим тиском, що змінюється. Це збільшує як теплоємність, так і теплопередачу від вихлопного газу до стінки колектора.

По-друге, для забезпечення цієї умови необхідно термічно ізолювати другу половину трубопроводу колектора.

Швидкість випуску вихлопного газу v_{BG} прямопропорційна частоті обертання вала двигуна n_i , кількості робочих циліндрів (тобто двом), робочому об'єму циліндра $V_{ц}$ і оберненопропорційна тактності двигуна τ . Тому :

$$v_{BG} = \frac{V_{ц} \cdot 2 \cdot \eta_{ц} \cdot n_i}{60 \cdot \tau} = \frac{V_{ц} \cdot n_i}{30 \cdot \tau}. \quad (4)$$

Розрахунок термоелектричного генератора. Прототипом секційного термоелектрогенератора можуть служити термоелектричні генератори, що вже існують. Прикладом є ТЕГ на основі енергії відпрацьованих газів корпорації Ni-Z [6]. Його недолік – великий об'єм проходження робочого газу. А при джерелі з малим вихідним перерізом це приводить до автоматичного зниження температури робочого газу і як результат, до невисокого ККД генератора додаються втрати на розширення газу. У малих розмірах єдиним технологічним рішенням для такого генератора є заповнення робочого об'єму чим-то корисним, наприклад, рядами теплових трубок, які встановлюються поперечно. При низькій швидкості плинущу газу це поліпшує теплопередачу ТЕМ. Однак установка такого генератора на колектор неможлива через необхідність дотримання динамічних вимог до колектора.

Тому необхідно враховувати наступне: по-перше, малі габарити трубопроводів і близькість їхнього розташування друг до друга обмежують площу теплопередачі; по-друге, при розробці ТЕГ неможна погіршити динамічний рух вихлопного газу; по-третє, при зупинці двигуна вихлопна система нагрівається до високої температури.

Радіатор розраховується окремо на максимальну потужність термоелектричного модуля (ТЕМ). Він повинен при цьому забезпечити температуру не вище $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рекомендується для модуля за паспортними даними) охолоджуваної поверхні ТЕМ.

Для розрахунку основних параметрів секції ТЕГ запропонована спрощена фізична модель, наведена на рис. 1. Вона складається із джерела тепла – відпрацьованого газу, термоелектричного модуля, гарячого та холодного радіаторів для відводу тепла шляхом примусової продувки повітрям.

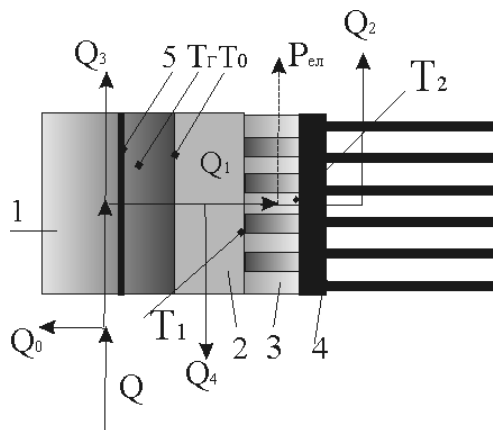


Рисунок 1 – Фізична модель термогенератора:

1 – джерело тепла; 2 – гарячий теплообмінник (радіатор); 3 – термоелектрична модуль;
4 – холодний теплообмінник (радіатор); 5 - полий тонкий циліндр

Рівняння теплового балансу для даної моделі:

$$\begin{aligned} Q &= Q_0 + Q_1 + Q_3; \\ Q_1 - Q_4 &= P + Q_2, \end{aligned} \quad (5)$$

де Q_0 – втрати теплової потужності на елементах джерела тепла; Q_1 – теплова потужність, що надходить від гарячих газів до гарячого радіатора ТЕГ конвективним шляхом і випромінюванням від тонкого циліндра площею у два рази меншою за внутрішню площу труби; Q_2 – теплова потужність, що відводиться від холодної сторони ТЕМ у навколишнє середовище шляхом примусового обдування; Q_3 – теплова потужність, що відводиться

в навколишнє середовище із продуктами реакції горіння; Q_4 – втрати теплової потужності на елементах конструкції гарячого радіатора; P – електрична потужність ТЕМ.

Секція термоелектричного генератора встановлюється на одному із трубопроводів колектора. Рух вихлопних газів відбувається при виштовхуванні їх із циліндра. При цьому заповнюється трубопровід на об'єм циліндра з урахуванням зменшення тиску. Вихлопний газ що залишився, перебуває у трубопроводі до чергового упорскування газів. Із деяким наближенням можна уважати процес майже стаціонарним. При цьому енергія остигання газу практично, за мінусом втрат на витрати енергії через ізоляцію, іде через стінки теплообмінника. ККД такого процесу буде дорівнювати:

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}, \quad (6)$$

де T_1 – температура газу, що вийшов із циліндра; T_2 – температура газу, що вийшов із секції термоелектричного генератора.

Температуру T_2 можна визначити виходячи із втрат енергії теплопередачі через стінку теплообмінника. Знаючи розподіл потужності залежно від частоти обертання двигуна і витрат на пересування, можна визначити потужність, що проходить через теплообмінник. Але це достатньо грубе наближення. Розрахунок параметрів ТЕГ, проведено з урахуванням величин теплових потоків, які необхідно підвести до термоелектричних модулів і які забезпечують оптимальний режим роботи генератора [9]. Для проведення комп'ютерного розрахунку використана прикладна програма Mathematica_8.0.1_WIN.iso [10].

Вихідними даними для розрахунку є: діаметр труби $D = 12$ см, вхідна температура газу 800 °С, товщина стінки труби d . Математична модель за цими параметрами складається відповідно до рис. 2. Представимо якийсь елементарний об'єм газу товщиною dx , що рухається уздовж труби. По мірі проходження він віддає частину енергії й остигає. На початку труби температура дорівнює T_n . Наприкінці – T_k .

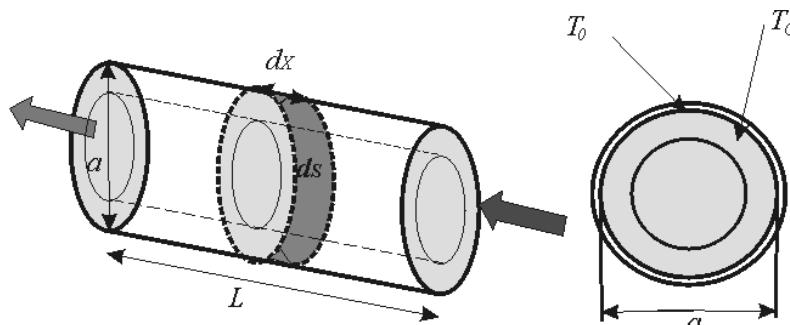


Рисунок 2 – Графічна модель процесу обміну

Теплова потужність, що надходить на площадку відповідно до рис. 2:

$$\delta Q = \left[\frac{1}{2} \varepsilon \sigma (T^4 - T_0^4) + \alpha (T - T_0) \right] \delta S, \quad (7)$$

де ε – коефіцієнт сірості матеріалу стінки (сталь покрита шаром сажі), дорівнює 0.80; σ – коефіцієнт Стефана-Больцмана, дорівнює $5,671 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴); α – коефіцієнт теплопередачі дим – сталь, дорівнює 5,8 Вт/(м²·К).

Теплова потужність, що пройшла через ділянку δl площею δS стінки внутрішнього корпусу, визначається її теплопровідністю λ_m , градієнтом температури стінки генератора (він дорівнює різниці зовнішньої T_p і внутрішньої T_0 температур поділеної на товщину L), і площею стінки δS :

$$\delta Q = \lambda \frac{T_0 - T_p}{L} \delta S. \quad (8)$$

Дорівнявши δQ з виразів (7) і (8), маємо рівняння щодо температури стінки генератора, що нагрівається і обумовлює електричну потужність ТЕМ:

$$P(T) = \lambda \frac{T_0 - T_p}{L} = \frac{1}{2} \varepsilon \sigma (T^4 - T_0^4) + \alpha (T - T_0). \quad (9)$$

Запишемо вираз для елементарного об'єму газу:

$$\frac{dU}{dT} = Q \text{ або } C_p V \frac{dT}{dt} = P(T) dS, \quad (10)$$

де V – елементарний об'єм, рівний:

$$V = a^2 dx, \quad (11)$$

a – довжина сторони квадратного перерізу внутрішньої поверхні генератора (рис. 2); U – внутрішня енергія газу зазначеного об'єму; C_p – теплоємність при сталому тиску; dS – поверхня по периметру вказаного об'єму, яка складає:

$$dS = 4a \cdot dx. \quad (12)$$

Із (10), (11) і (12) маємо:

$$C_p a^2 dx \frac{dT}{dt} = P(T) \cdot 4a dx. \quad (13)$$

Якщо позначимо $v = dx/dt$ як швидкість руху випускного газу, то з (13) знаходимо:

$$dx = C_p a v \frac{dT}{P(T)}. \quad (14)$$

На основі (12) і (14) одержимо:

$$S = 4ax = C_p a^2 v \int_{T_n}^{T_k} \frac{dT}{P(T)}. \quad (15)$$

Разом із цим, різниця енергій газу, що ввійшов у генератор і вийшов з нього за одиницю часу – це інтегральна потужність, яка залишена газом генератору. Звідси:

$$P(T_k) = \frac{C_p dV(T_n - T_k)}{dt} = C_p \frac{a^2 dx}{dt} (T_n - T_k) = C_p a^2 v (T_n - T_k). \quad (16)$$

Розв'язав рівняння, одержуємо з виразу (15) значення $S(T_k)$, а з виразу (16) – значення $P(T_k)$. Це надає можливість побудувати графік залежності $P(S)$ (рис. 3).

Така методика ураховує форму вихлопної труби. Тому переріз можна обрати квадратним. Єдина вимога – не збільшувати об'єм труби, оскільки у ізобаричному процесі розширення можна одержати зниження температури газу.

Площа поперечного перерізу протока газів не повинна бути менш, ніж такий самий переріз колектора (як зазначено раніше, діаметр $D=13$ см). Обраний переріз має квадратну форму. За розрахунком сторона квадрата складає:

$$a = \sqrt{\pi} \cdot \frac{D}{2} = 1,77 \frac{13}{2} = 11,5 \text{ см}.$$

Периметр буде дорівнювати: $\Pi = 0,46$ м.

Відповідно до графіка (рис. 3), найбільш інтенсивна віддача енергії відбувається при площі контакту з газом до $0,1 \text{ м}^2$. А це буде забезпечено при довжині: $L = S/\Pi \approx 20$ см. Потужність відводу теплової енергії від газу в кожному із чотирьох трубопроводів, складе $Q_4 \approx 700$ Вт, а вихідна температура газу – $T_k \approx 650^\circ\text{C}$. Тоді сумарна енергія може скласти:

$$Q_4 \approx 700 \text{ Вт} \cdot 4 = 2.8 \text{ кВт.}$$

Звідси випливає, що необхідно ділити генератор на секції по 20 см. Трубу між секціями необхідно розділити і секції теплоізолювати друг від друга.

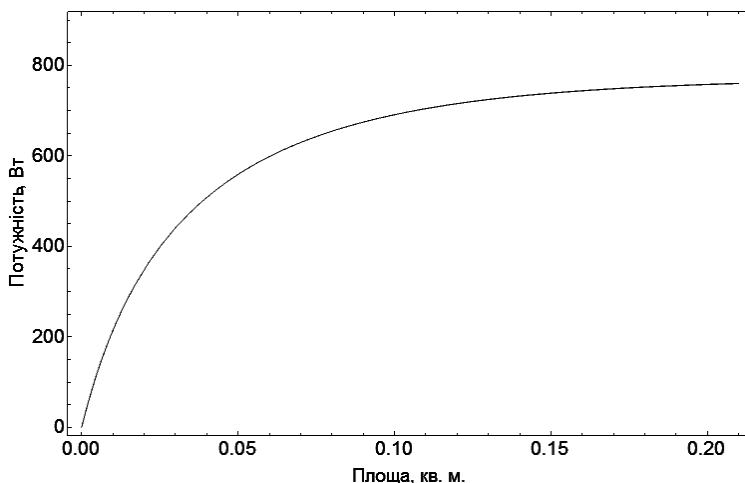


Рисунок 3 – Залежність потужності відбору теплової енергії від площі внутрішньої поверхні генератора

Варто звернути увагу на те, що каталізатор має робочу температуру, рівну 500 °С. Друга секція буде мати вхідну температуру газу рівну вихідній від першої секції. Тому установку другої секції потрібно проводити після каталізатора. З урахуванням ефективності обраних термоелектричних модулів АЛТЕК 1024 при температурі гарячої стінки 650 °С (рис. 4), $\eta_{\text{ТЕМ}} = 10\%$ потужність енергії, яка буде вироблятися перетворювачем може скласти $P = \eta_{\text{ТЕМ}} \cdot Q_4 = 10\% \cdot 2,8 \text{ кВт} = 280 \text{ Вт}$.

Це потребує встановлення вказаних модулів у кількості 8 шт. Відповідна напруга при послідовному з'єднанні модулів і робочому струмі $I = 15 \text{ А}$ складе:

$$U_{\text{вих}} = U_{\text{мод}} \cdot 8 = 2,2 \text{ В} \cdot 8 = 17,6 \text{ В}.$$

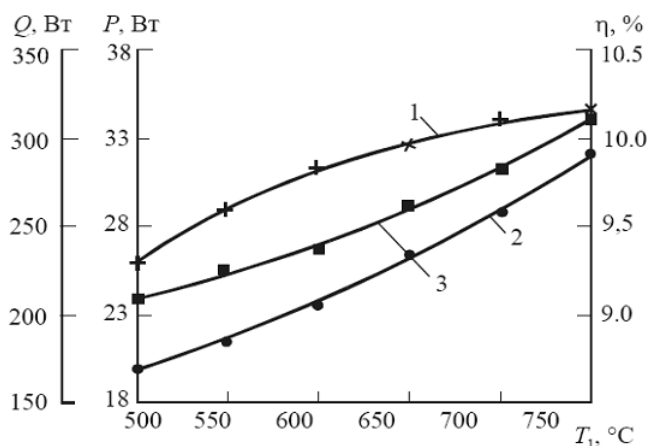


Рисунок 4 – Вихідні характеристики Алтек 1024 ($T = 50 ^\circ\text{C}$):

1 – для ККД, 2 – для електричної потужності; 3 – для теплового потоку

Висновки. Таким чином, розроблено термоелектричний пристрій для перетворення теплової енергії вихлопних газів двигуна внутрішнього згорання об'ємом циліндрів більш 1.5 л потужністю до 300 Вт із метою заміни електромеханічного генератора. Здійснено відповідний тепловий та електричний розрахунки. Рекуперація цієї енергії до механічного руху автомобіля можлива, якщо установити допоміжний електричний двигун замість електромеханічного генератора. Практичною значимістю отриманих результатів є створення термоелектричного генератора, що встановлюється на

вихлопну трубу автомобіля, спрощує його обслуговування і зменшує витрату палива і може використовуватися для любих типів автомобілів з відповідним типом двигуна.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Продан Ю. В. Енергетична безпека України: оцінка та напрямки забезпечення / ред. Ю. В. Продан, Б. С. Стогній; НАН України, Нац. техн. ун-т України «Київ. політехн. ін.-т». – К., 2008. – 400 с.
2. Городов Р. В. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии / Р. В. Городов, В. Е. Губин, В. Е. Матвеев – Томск : Из-во Томского политехнического университета, 2009. – 294 с.
3. Курис Ю. В. Альтернативные источники энергии / Ю. В. Курис. – К. : КНУ, 2008. – 310 с.
4. Чабанний В. Я. Ремонт автомобілів : навчальний посібник / В. Я. Чабанний, С. О. Магопєць, О. Й. Мажейка., В. М. Кропівний та ін. – Кіровоград : Центрально-Українське видавництво. – 2007. – 391 с.
5. Анатичук Л. І. Вплив повітряного охолодження на ефективність термоелектричного генератора дизельного автомобіля / Л. І. Анатичук, Р. В. Кузь // Термоелектрика. – 2014. – № 2.– С.60-67.
6. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров : справочник: пер.с англ. / Х. Уонг – М. : Атомиздат, 2009. – 227 с.
7. Шостаковский П. Термоэлектрические источники альтернативного электропитания / П. Шостаковский // Новые технологии. – 2010. – Вып. 12. – С. 131-138.
8. Universal thermoelectric unit / [M. I. Fedorov, A. E. Engalychev, V. K. Zaitsev, A. E. Kaliazin, F. Yu Solomkin] // Proc. of the XIII International Conference on Thermoelectric Energy Conversion. USA, Kansas. City. – 1994. – P. 324-327.
9. Анатичук Л. И Теория и компьютерное моделирование автомобильных термоэлектрических генераторов / Л. И. Анатичук, Р. В. Кузь // XIII Межгосударственный Семинар «Термоэлектрики и их применения», (13-14 ноября 2012 г., ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Санкт- Петербург). – С. 65-68.
10. Шостаковский П. Разработка термоэлектрических систем охлаждения и термостатирования с помощью компьютерной программы Kryotherm / П. Шостаковский // Компоненты и технологии. – 2010. – № 9. – С.113-120.

REFERENCES

1. Prodan U.V. (2008) Power safety of Ukraine : estimation and directions of providing. Prodan U.V., B.S. Stogniy; NAN of Ukraine, National technical university Ukraine «Kyiv. polytechnic institute», 400.
2. Cities of P.B. (2009). Unconventional and renewable energy sources. P.B. Cities, V.E. Gubin, V.E. Matveev is Tomsk: Publ. of the Tomsk polytechnic university, 294.
3. Kuris Yu.V. (2008). Alternative energy sources Kuris Yu.V. it is Kyiv: KNU, 310.
4. 4. Chabanniy V.Ya. (2007). Repair of cars. Train aid of V.Ya.Chabanniy, Magopets, O.Y Mazheyka., V.M. Kropivniy and other is Kirovohrad: the Centrally-Ukrainian publ., 391.
5. Anaticchuk L.I. (№2, 2014) Influence of the air cooling is on efficiency of thermoelectric generator of diesel car. Anaticchuk L.I. Kuz R.V. Thermo-electricity, 60-67.
6. Wong H. Y. (2009). Handbook of Essential Formulae and Data on heat transfer for engineers : handbook: trudedged.with an eng is M: Atomazdat, 227.
7. Shostakovskiy P. (№12, 2010). The Thermo-electric sources of alternative power supply. the New technologists, 131-138.
8. . Fedorov M.I., A.E. Engalychev, V.K. Zaitsev, A.E. Kaliazin, F.Yu Solomkin. (1994). Proc. of the XIII International Conference on Thermoelectric Energy Conversion. USA, Kansas.City, 324-327.

9. Anaticchuk L.I. Theory and computer design of motor-car thermo-electric generators. (13-14 on November 2012), Anaticchuk L.I., Kuz R.V. XIII Intergovernmental Seminar «Thermoelectricians and their applications», FTU the name of A.F. Ioffe, Sankt- Petersburg, 65-68.

10. Shostakovskiy P. (№ 9, 2010). Development of the thermo-electric systems of cooling and thermostating by means of the computer program KRYOTHERM, Components and technologists, 113-120.

Литвинова М.Б., Селиверстова С.Р., Штанько А.Д. РЕКУПЕРАЦИЯ ЭНЕРГИИ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

В работе представлено принципиальное техническое решение и соответствующая конструкция термоэлектрического преобразователя тепловой энергии выхлопных газов двигателя внутреннего сгорания. Разработано соответствующее тепловое устройство для двигателя с объёмом цилиндров более 1,5 л. мощностью до 300 Вт. Осуществлён соответствующий тепловой и электрический расчёт. Целью является замена электромеханического генератора с помощью установки вспомогательного электрического двигателя к двигателю внутреннего сгорания для эффективной энергии переработки газов, которая выбрасывается в воздух. Дополнительный двигатель устанавливается на выхлопную трубу автомобиля, упрощает его обслуживание, уменьшает расход топлива и может использоваться для любых типов автомобилей с соответствующим типом двигателя.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, рекуперация энергии, электрический генератор.

Litvinova M.B., Seliverstova S.R., Shtan'ko A.D. RECUPERATION OF ENERGY OF THE INTERNAL COMBUSTION ENGINE

The paper presents the basic technical solutions and the corresponding construction of the thermoelectric converter of thermal energy of the exhaust gases of internal combustion engine. Develop appropriate device for thermal engine with a volume of 1.5 l power up to 300 watts. Implemented appropriate thermal and electrical calculations. The aim is to replace the electromechanical generator by installing an auxiliary electric motor to the internal combustion engine for the efficient processing of energy gases that are released into the air. Additional motor mounted on the exhaust pipe of a vehicle, simplifies maintenance, reduces fuel consumption and can be used for all types of vehicles with the appropriate type of engine.

Keywords: internal combustion engine, energy recuperation, electrical generator.

© Литвинова М. Б., Селиверстова С. Р., Штанько О. Д.

Статтю прийнято
до редакції 25.09.15