

Гудз Г.С., Глобчак М.В., Коцюмбас О.Й.
Національний університет "Львівська політехніка"**ПАРАМЕТРИЧНА ІДЕНТИФІКАЦІЯ ГРАНИЧНИХ УМОВ ТЕПЛОВОЇ МОДЕЛІ
СЕРЕДОВИЩА "ГІЛЬЗА - ОХОЛОДНИК" ДВЗ**

Визначено умови тепловіддачі (граничні умови третього роду) теплової моделі середовища "гільза-охолодник" двигуна внутрішнього згорання (ДВЗ) на підставі розв'язку зворотної задачі теплопровідності комп'ютерним моделюванням за результатами стендових випробувань.

Ключові слова: автомобільний двигун, гільза циліндра, охолодник, граничні умови, тепла модель, зворотна задача теплопровідності.

Постановка проблеми. До найбільш поширеного методу підвищення ресурсу автомобільних двигунів належить метод відновлення їх гільз способом розточування (хонінгування) до ремонтних розмірів. Він передбачає збільшення діаметру гільз циліндрів, що призводить до зменшення товщини стінок, й тим самим до зміни температурного режиму двигуна в цілому, який визначає стабільність робочих показників ДВЗ. Тому дослідження таких змін становить актуальне завдання. Дослідженням теплового стану автомобільних двигунів присвячена низка робіт [1, 2, 3, 4], але в них не розглянуті кількісні показники впливу ремонтних дій стосовно гільз циліндрів на температурний режим середовища "гільза - охолодник". Тому оцінювання впливу ремонтних змін циліндрів на температурний стан середовища "гільза - охолодник" вимагає подальших досліджень із застосуванням методу математичного моделювання.

Мета статті. Метою статті є визначення умов тепловіддачі середовища "гільза - охолодник" ДВЗ на підставі математичного моделювання та експериментальних досліджень.

Матеріали та результати дослідження. При дослідженні динаміки температурних полів контактного середовища «гільза циліндрів – охолодник» ДВЗ потрібно розв'язати систему рівнянь у часткових похідних, які описують процеси тепломасопереносу у складних об'єктах з розподіленими параметрами за відповідних крайових умов:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_1(x, y, z, t) \frac{\partial t}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda_1(x, y, z, t) \frac{\partial t}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda_1(x, y, z, t) \frac{\partial t}{\partial z} \right] + q(x, y, z) = c_1 \rho_1 \frac{\partial t}{\partial \tau}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_2(x, y, z, t) \frac{\partial t}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda_2(x, y, z, t) \frac{\partial t}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda_2(x, y, z, t) \frac{\partial t}{\partial z} \right] = c_2 \rho_2 \frac{\partial t}{\partial \tau}; \quad (2)$$

де індекси $i = 1, 2$ відносяться до матеріалу циліндра (1) та охолоджувального середовища (2); $\lambda_i(x, y, z, t)$, ($i = 1, 2$) – коефіцієнти теплопровідності; $q(x, y, z)$ – густина теплового потоку; $c_i(x, y, z, t) \cdot \rho_i(x, y, z, t)$, ($i = 1, 2$) – об'ємна теплоємність; t – температура, τ – час; x, y, z — поточні координати.

Для дослідження впливу товщини стінки гільзи циліндрів на поверхневі та об'ємні температури слід мати достатньо точну уяву про роль тепловіддачі в охолоджувальне середовище (граничні умови 3-го роду). Взагалі, коефіцієнт тепловіддачі α залежить від форми та розмірів поверхонь охолодження, швидкості, температури та теплофізичних властивостей охолоджуючого середовища, температури тіла та інших чинників. Наявні методи аналітичного визначення коефіцієнта тепловіддачі [2, 3, 4] не завжди відбивають реальні умови процесів, що відбуваються у контактному середовищі «гільза- охолодник» ДВЗ.

З огляду на складність процесу тепловіддачі, попередню, вельми наближену оцінку інтенсивності теплообміну між зовнішньою поверхнею гільзи і охолоджувальним середовищем (ГУ-3) доцільно звести до двох характерних випадків:

1) за відсутності поверхневого кипіння — використання методики Г. Б. Розенбліта [5]

$$\alpha = C w_{\text{п}}^{0,41} w_{\text{в}}^{0,23} / (\rho^{0,32} d_e^{0,36}), \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град}); \quad (3)$$

де $C = 33,8$ — коефіцієнт, що враховує умови закріплення досліджуваної гільзи;

w_{Π} — швидкість потоку охолодника;

w_b — амплітудна швидкість вібрації, емпірична залежність для якої наведена в [4, 5, 6];

ρ — густина охолодника;

d_e — еквівалентний діаметр, що складає подвоєну товщину шару охолодника;

- 2) за його наявності — використання критеріальних залежностей визначення коефіцієнтів тепловіддачі α , запропонованих низкою авторів [4, 6, 7].

За вислідами проведених досліджень можна констатувати, що серед проаналізованих критеріальних залежностей найбільш повною та простою для практичного застосування, можна вважати ту, що наведена в роботі А. К. Костіна [4]

$$\alpha = Nu \cdot \lambda_2 / (d_{\min}), \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град}), \quad (4)$$

де Nu — критерій Нусельта для гільзи циліндра,

$$Nu = 0,012 K_{\phi}^{0,4} (Pe'')^{0,7} \left(\frac{d_e}{d_1} \right)^{0,35} \left(\frac{p}{p_0} \right)^{0,5} Pr^{0,3}; \quad (5)$$

d_{\min} — визначальний розмір (мінімальний діаметр парової бульбашки),

$$d_{\min} = 4\sigma T_s / (r\rho''\Delta T_s);$$

$\sigma \approx 0,0589$ Н/м — поверхневий натяг [8];

T_s — температура стінки,

$$\Delta T_s = T_s - T_{ox},$$

T_{ox} — середня температура охолодника (визначальна температура);

$r \approx 2,26 \cdot 10^6$ Дж/кг — прихована питома теплота пароутворення [8];

$\rho'' \approx 0,6$ кг/м³ — густина пари охолодника;

K_{ϕ} — критерій фазового перетворення,

$$K_{\phi} = r / [(T_s - T_{ox})c_p];$$

$c_p = 4200$ Дж/(кг · К) — теплоємність охолодника;

Pe'' — критерій Пекле для процесу кипіння,

$$Pe'' = qd_{\min} / (r\rho''a);$$

$a = 1,66 \cdot 10^{-7}$ м²/с — коефіцієнт температуропровідності охолодника;

d_1 — внутрішній діаметр сорочки охолодження;

d_e — еквівалентний діаметр, що складає подвоєну товщину шару охолодника;

p, p_0 — відповідно тиск в системі охолодження і барометричний тиск;

$Pr \approx 1,75$ — критерій Прандтля.

З аналізу значень α , отриманих переліченими авторами, можна стверджувати, що їх абсолютні величини для тих самих вузлів моделі середовища «гільза-охолодник» відрізняються майже у 3 рази. Отже, актуальним постає завдання отримання істинних значень коефіцієнтів тепловіддачі.

Відомо [7], що зараз значна увага приділяється розв'язуванню зворотних задач теплопровідності (ЗЗТ), в яких за наявними експериментальними (досить обмеженими) даними про значення температури всередині тіла можна реконструювати його температурне поле, визначати теплофізичні властивості та геометричні характеристики, ідентифікувати початкові та граничні умови, а також уточнити саму математичну модель явища [7, 9]. Для цього використаний вимірювальний комплекс, описаний в роботі [10].

Саме за допомогою розв'язування ЗЗТ на підставі випробувань двигуна ЗМЗ-511.10 на стенді І DS 1036 kV (Чехія) [10] проведена параметрична ідентифікація граничних умов 3-го роду. У цьому випадку проводилось випробування у два етапи: перший – за мінімальних густин теплового потоку q , коефіцієнтів тепловіддачі α та відповідного часового кроку $\Delta\tau$ [11] впродовж $\tau = 30\text{с}$; другий – за максимальних величин q та α і кроку $\Delta\tau = 0,0375\text{с}$, що відповідає циклу (двом обертам) колінчастого валу на режимі номінальної потужності ($n = 3200\text{ хв}^{-1}$) [12]. За результатами випробувань здійснювалось наближене моделювання температурних режимів гільз, і за співпадінням температурних кривих визначались граничні умови 3-го роду, тобто числові значення коефіцієнта тепловіддачі.

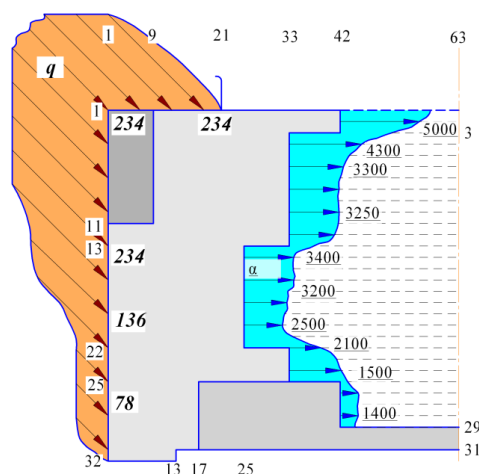


Рис. 1. Граничні умови для розв'язку задачі з позначеннями: **234** — густина теплового потоку, $\text{кВт}/\text{м}^2$, 3200 — коефіцієнт тепловіддачі, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$; цифрами по периферії моделі позначено координати вузлів

У табл. 1 наведені значення коефіцієнта тепловіддачі α у вертикальних вузлах моделі (рис. 1), отримані розв'язуванням ЗЗТ. Позначення α_{\min} відповідає режиму холостого ходу, а α_{\max} — номінальної потужності. Середні значення коефіцієнта тепловіддачі на вибраних режимах α_{\min} та α_{\max} прийняті як початкові дані для подальшого складання матриці планування експерименту.

Таблиця 1

Значення коефіцієнта тепловіддачі α у вузлах моделі

Вузол	α_{\min}	α_{\max}	Вузол	α_{\min}	α_{\max}	Вузол	α_{\min}	α_{\max}
	$\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$			$\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$			$\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$	
1	2800	6000	7-16	1100	3300	22	700	2100
2	2500	5000	17	1000	3200	23	600	1700
3	2200	4500	18	950	3000	24	550	1500
4	1600	4300	19	900	2800	25	500	1400
5	1400	3500	20	850	2500	26-28	400	1400
6	1200	3300	21	800	2200			
Середнє значення							1100	3000

На рис. 2 показані результати експериментальних температурних режимів гільз, з якими порівняні результати комп'ютерного моделювання.

Отримані значення максимальної густини теплових потоків та коефіцієнта тепловіддачі за номінальної потужності показано на схемі теплообміну на поверхнях гільзи циліндрів (рис. 1).

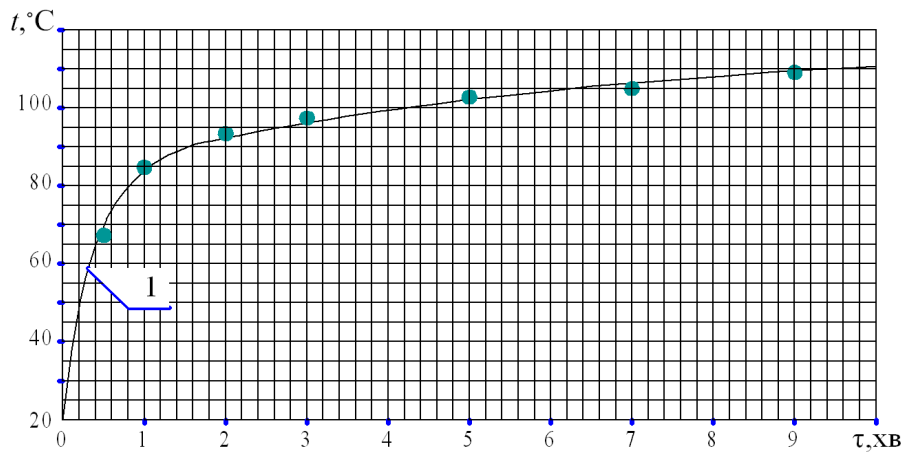


Рис. 2. Зміна температури поверхні гільзи номінального розміру від часу за мінімальних навантажень: 1 — розрахункова крива ; ● — експериментальні дані

У результаті моделювання процесу отримано нестационарне температурне поле гільзи та охолодника, фрагмент зміни якого для характерних вузлів створеної моделі наведений на рис. 3, з якого видно, що на режимі максимальної потужності різниці як між температурами зовнішньої поверхні гільзи номінального та ремонтного розмірів (максимум 3 – 4°), так і за тривалістю її прогрівання, несуттєві. Спостерігається значне відставання у тривалості прогрівання охолодника від гільзи внаслідок їх різних теплофізичних параметрів.

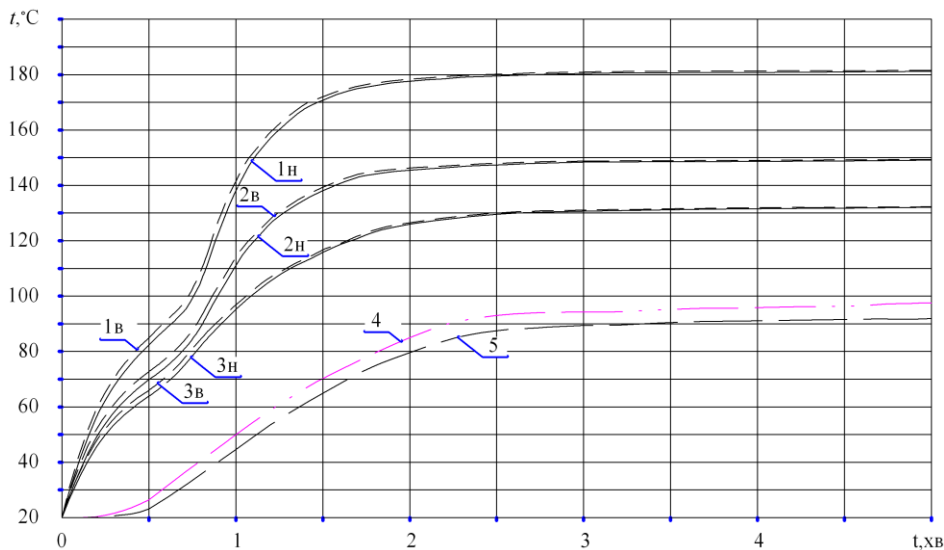


Рис. 3. Зміна температури зовнішньої поверхні гільзи у верхньому (1), середньому (2), нижньому (3) поясах та охолодника у верхньому (4) і нижньому (5) поясах від часу за максимальних навантажень для гільзи відповідно номінального (н) та ремонтного (в) розмірів.

Висновки. 1. Отримані початкові дані для подальшого системологічного дослідження температурного режиму середовища “гільза-охолодник” ДВЗ в результаті ремонтних дій з гільзами.

2. Володіючи реальними значеннями коефіцієнтів тепловіддачі середовища “гільза-охолодник” ДВЗ, можна надалі скласти матрицю планування експерименту для визначення зміни тривалості досягнення квазіусталеного температурного режиму двигуна в результаті ремонтних дій з гільзами циліндрів.

1. Немый С. В. Влияние ремонтных изменений размеров цилиндров двигателей на их температурное состояние / С. В. Немый, О. Й. Коцюмбас // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – М., 2014. - Вып 1 (36). - С. 27-32.
2. Теплообмен в двигателях и теплонапряженность их деталей: монография / [Н. Х. Дьяченко, С. Н. Дашков, А. К. Костин, М. М. Бурин]; под ред. С. Н. Дашкова. – Ленинград: Машиностроение, 1969. – 248 с.
3. Сиволапов В. А. Исследование процессов теплопередачи в цилиндрах двигателей внутреннего сгорания / А. В. Сиволапов, А. Г. Тарапон // Моделювання та інформаційні технології: – 36. наук. праць ІПМЕ НАН України, вип. 3, К., 2000. – С. 10 – 15.
4. Костин А. К. Теплонапряженность двигателей внутреннего сгорания: справочное пособие / [А. К. Костин, В. В. Ларионов, Л. И. Михайлов]; под ред. А. К. Костина. – Ленинград: Машиностроение, 1979. – 222 с.
5. Розенблит Г. Б. Теплопередача в дизелях: монография / Г. Б. Розенблит. – М.: Машиностроение, 1977. – 216 с.
6. Двигатели внутреннего сгорания: Теория поршневых и комбинированных двигателей / [Д. Н. Вырубов, Н. А. Ивашенко, В. И. Ивин и др.]; под ред. А. С. Орлина, М. Г. Круглова. – [4-е изд.] М.: Машиностроение, 1983. – 372 с.
7. Мацевитый Ю. М. Обратные задачи теплопроводности: монография: в 2 т. / Ю. М. Мацевитый. – К.: Проект «Наукова книга», 2002. – Т 2: Приложения. – 2003. – 392 с.
8. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент: справочник / [Е. В. Аметистов, В. А. Григорьев, Б. Т. Емцев и др.]; под общ. ред. В. А. Григорьева и В. М. Зорина. – М.: Энергоиздат, 1982. – 512 с. – (Справочная серия «Теплоэнергетика и теплотехника»).
9. Коздоба Л. А. Методы решения обратных задач теплопереноса / Л. А. Коздоба, П. Г. Круковский. – К.: Наук. думка, 1982. – 360 с.
10. Вимірjuвальний комплекс для системного дослідження теплового стану середовища “гільза-охолодник” ДВЗ / Г. С. Гудз, М. В. Глобчак, О. Й. Коцюмбас, О. Р. Клипка // Наукові нотатки. – Вісн. Луцького НТУ. - Луцьк, 2014. - Вип 45. - С. 153-158.
11. Гудз Г. С. Визначення температурних полів та часу досягнення стабілізації теплового стану гільзи циліндрів і охолодника / Г. С. Гудз, М. В. Глобчак, О. Й. Коцюмбас // Вісн. Східноукраїнського нац. ун-ту ім. В. Даля. - Луганськ, 2010. – № 6(148). – С. 110–113.
12. Гудз Г. С. Визначення динаміки теплового стану гільзи циліндрів і охолодника за номінальної потужності автомобільного двигуна / Г. С. Гудз, М. В. Глобчак, О. Й. Коцюмбас // Вестн. Харьковского нац. автом.-дор. ун-та. – Харьков, 2010. – Вып. 51. – С. 180 – 183.

REFERENCES

1. Nemyj, S. & Kotsjumbas, O. (2014). Influence of the temperature state of motor-car engines is on their operating indexes. [Vliyanie remontnykh izmenenij razmerov tsilindrov dvigatelej na ikh temperaturnoe sostoyanie]. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta (MADI)*. Number 1(36), March 2014. Moscow, pp. 27-32.
2. Djachenko, N., Dashkov, S., Kostin, A. & Burin, M. (1969). *Thermal exchange in engines and thermal tension of their features*. [Теплообмен в двигателях и теплонапряженность их деталей]. Leningrad, Mashinostroenie Publ. 248 p.
3. Sivolapov, V. & Tarapon, A. (2000). Research of processes of heat-transfer in the cylinders of internal combusting engines. [Issledovanie protsessov teploperedachi v tsilindrakh dvigatelej vnytrennego sgoraniya]. *Modelling and Information Technology. Collection of scientific work Pukhov Institute for Modelling in Energy Engineering of National Academy of Sciences of Ukraine*. Vol. 3. Kyiv, pp. 10-15.
4. Kostin, A. , Larionov, V. & Mikhajlov, L. (1979). *Thermal tension of internal combusting engines*. [Теплонапряженность двигателей вnytrennego sgoraniya]. Leningrad, Mashinostroenie Publ. 222 p.
5. Rozenblit, G. (1977). *The heat-transfer in diesels*. [Теплопередача в дизелях]. Moscow, Mashinostroenie Publ. 216 p.
6. Orlin, A., Kruglov, M., Vyrubov, D., Ivashchenko, N., Ivin, V. & others (1983). *Internal combusting engines: Theory of piston and combined engines*. [Dvigateli vnytrennego sgoraniya: Teoriya porshnevnykh i kombinirovannykh dvigatelej]. Moscow, Mashinostroenie Publ. 372 p.
7. Matsevityj, Yu. (2003). *Returning problem of thermal conductivity. T. 2: Applications*. [Obratnye zadachi teploprovodnosti. T. 2: Prilozheniya]. Kyiv, Project Naykova knyga. 392 p.
8. Grigorjev, V., Zorin, V., Ametistov, E., Emtsev, B. & others (1982). *Thermal- and mass-transfer. Heating engineering experiment*. [Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент]. Moscow, Energoizdat Publ. 512 p.
9. Kozdoba, L. & Krukovskij, P. (1982). *Methods of decision of returning problem of thermal transfer*. [Metody resheniya obratnykh zadach teploperenos]. Kyiv, Naukova dumka Publ. 360 p.
10. Gudz, G., Globchak, M., Kotsjumbas, O. & Clypko, O. (2014). Measuring complex for system investigation of thermal condition of environment “shell-cooler” of internal combustion engine. [Vymiryval'nyj kompleks dlya systemnogo doslidzhennya teplovogo stanu seredovyshcha “gil'za-oholodnyk” DVZ]. *Naukovi notatky. Journal of Lutsk Nayional Technical University*. Vol. 45. Lutsk, LNTU Publ. pp. 153-158.
11. Gudz, G., Globchak, M. & Kotsjumbas, O. (2010). Determination of the temperature fields and duration of achievement of stabilizing of the thermal conditions of shell of cylinders and cooler. [Vyznachennya temperaturnykh poliv ta chasu dosyagnennya stabilizatsiji teplovogo stanu gil'zu tsylindriv i oholodnyka]. *Journal of East Ukrainian National University named after Volodymyr Dahl*. Vol. 6(148). Lugansk, pp. 110-113.
12. Gudz, G., Globchak, M. & Kotsjumbas, O. (2010). Determination of dynamic of thermal condition shell of cylinders and cooler at nominal power of motor-car engine. [Vyznachennya dynamiky teplovogo stanu gil'zu

tsylindriv i oholodnyka za nominalnoji potuzhnosti avtomobilnogo dvyguna]. *Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University*. Vol. 51. Kharkov, KNADU Publ. pp. 180-183.

Гудз Г.С., Глобчак М.В., Коцюмбас О.И. Параметрическая идентификация граничных условий тепловой модели среды "гильза - охладитель" ДВС

Определены условия теплоотдачи (граничные условия третьего рода) тепловой модели среды "гильза-охладитель" двигателя внутреннего сгорания (ДВС) на основании решения обратной задачи теплопроводности компьютерным моделированием по результатам стендовых испытаний.

Ключевые слова: автомобильный двигатель, гильза цилиндра, охладитель, граничные условия, тепловая модель, обратная задача теплопроводности.

G. Gudz, M. Globchak, O. Kotsjumbas. Parametrical identification of boundary conditions of heat model of "liner-cooler" environment.

The existing methods of analytical determination of heating transfer coefficients are analyzed in this article and their inequality is shown, using 3-times mismatches in the solutions.

The heat transfer conditions (the boundary conditions of the third kind) of heat model of "liner-cooler" environment of internal combustion engine by the reverse heat transfer problem solution by the means of computer simulation, based upon the engine's stand trials.

It will allow to conduct the systemological researches of the influence of important factors upon the timing of achieving of quasi – stationary heating regime of internal combusting engine and traction – speeding properties of the car.

Key words: automotive engine, cylinder liner, cooler, boundary conditions, heat model, reverse problem of heat transfer.

АВТОРИ:

ГУДЗ Густав Стефанович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри «Експлуатація та ремонт автомобільної техніки», Національний університет «Львівська політехніка», e-mail: o.kotsjumbas@email.ua

ГЛОБЧАК Михайло Васильович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри «Експлуатація та ремонт автомобільної техніки», Національний університет «Львівська політехніка», e-mail: o.kotsjumbas@email.ua

КОЦЮМБАС Олег Йосифович, кандидат технічних наук, старший викладач кафедри «Експлуатація та ремонт автомобільної техніки», Національний університет «Львівська політехніка», e-mail: o.kotsjumbas@email.ua

АВТОРЫ:

ГУДЗ Густав Стефанович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Эксплуатация и ремонт автомобильной техники», Национальный университет «Львовская политехника», e-mail: o.kotsjumbas@email.ua

ГЛОБЧАК Михаил Васильевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Эксплуатация и ремонт автомобильной техники», Национальный университет «Львовская политехника», e-mail: o.kotsjumbas@email.ua

КОЦЮМБАС Олег Йосифович, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Эксплуатация и ремонт автомобильной техники», Национальный университет «Львовская политехника», e-mail: o.kotsjumbas@email.ua

AUTHORS:

Gustav GUDZ, Doctor of Science in Engineering, Professor, Professor of Department of Vehicle Repair and Maintenance, Lviv Polytechnic National University, e-mail: o.kotsjumbas@email.ua

Myhajlo GLOBCHAK, PhD. in Engineering, Assoc. Professor, Assoc. Professor of Department of Vehicle Repair and Maintenance, Lviv Polytechnic National University, e-mail: o.kotsjumbas@email.ua

Oleg KOTSJUMBAS, PhD. in Engineering, assistant of Department of Vehicle Repair and Maintenance, Lviv Polytechnic National University, e-mail: o.kotsjumbas@email.ua

Стаття надійшла в редакцію 29.08.2016р.