

УДК 629.113

М. В. ПІДГОРНИЙ, канд. техн. наук, доц. АТЕ ЧДТУ, Черкаси;
С. О. КУЗЬМЕНКО, магістр АТЕ ЧДТУ;
Є. О. РОЗДОБУДЬКО, магістр АТЕ ЧДТУ.

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИСПЕРСНОСТІ РОЗПИЛЮВАННЯ КРАПЕЛЬ ПАЛИВА ФАКЕЛУ БЕНЗИНОВОЇ ФОРСУНКИ

Тенденції до збільшення потужності двигуна, зниження витрат палива, поліпшенню екологічних показників привели до необхідності більш точного дозування палива та оптимізації приготування паливно-повітряної суміші. Саме тому в роботі розроблено методику експериментальних досліджень, виготовлено стенд для досліджень форсунок сучасних автомобілів та проведено необхідну кількість дослідів відповідно до досліджень факела розпилювання паливної суміші. Розв'язано наступні задачі: отримано математичну модель досліджуваного об'єкту у вигляді рівняння множинної регресії; проведено експеримент; подано опис результатів експериментальних досліджень; визначено умови роботи форсунки на яких факел є максимальний.

Ключові слова: форсунка, схема управління форсунками, методика експерименту, параметри роботи двигуна, факел форсунки.

Вступ. З кожним роком стають жорсткіші вимоги, що запроваджуються до автомобільного транспорту. Тенденції до збільшення потужності двигуна, зниженню витрати палива, поліпшенню екологічних показників привели до необхідності більш точного дозування палива та оптимізації приготування паливно-повітряної суміші. Світовий досвід автомобілебудування показує, що рішення зазначених завдань можливе за рахунок застосування систем впорскування палива з електронним управлінням.

Аналіз основних досягнень і літератури. Оснащення автомобільних двигунів засобами автоматичного регулювання подачі палива і займання паливної суміші забезпечує ефективну і економічну їх роботу [1-4]. Більшість сучасних автомобілів з бензиновими двигунами обладнують системами впорскування палива з електронним управлінням та λ – зондом [7-9]. Оснащення їх засобами автоматичного регулювання подачі палива і займання паливної суміші забезпечує ефективну і економічну роботу автомобілів. Жорсткі сучасні та перспективні екологічні норми «Євро - 3» і «Євро - 4» можуть бути забезпечені шляхом реалізації розподіленого впорскування палива. Одночасно з цим зберігаються високі динамічні якості автомобіля, а також знижується витрата палива і викид шкідливих речовин. Найбільшого поширення на автомобілях закордонного виробництва (ФРН, Швеції, Японії, Франції, Італії) отримала паливна апаратура фірми «Bosch», яка є лідером у розробці та виробництві електронних систем.

Мета дослідження, постановка задачі. Метою дослідження є визначення оптимального факела бензинових форсунок, як результату багатоступеневого дисперсування крапель палива, для покращення економічності ДВЗ.

Для досягнення поставленої мети роботи будуть вирішуватись наступні задачі: розроблення методики експериментальних досліджень; проведення експерименту; опис результатів експериментальних досліджень; оцінка економічної ефективності досліджень.

Матеріали досліджень. Основна мета розробки математичної моделі – є отримання, завдяки експериментальним дослідженням, рівняння регресії, що характеризує оптимальність факелу розпилу форсунок [1,2]. Оскільки чинників, що впливають на факел розпилу форсунки, економічність, для планування та проведення експерименту багато, необхідно менш значущі з них відсіяти, і залишити основні, котрі суттєво впливають на ці процеси. До основних параметрів форсунки можна віднести [2-3]: постійний робочий тиск в порожнині форсунки (ПРТ), що дорівнює робочому тиску системи, виражене в бар; продуктивність форсунки (пропускна здатність у відкритому стані – см³/хв або в м / с при заданому робочому тиску); відкриваючий імпульс (мінімальний керований час тривалості відкритого стану форсунки – в мс); опір обмотки форсунки, від якого залежить скважність імпульсів; частота утримання форсунки (Гц); Вид палива.

Беручи до уваги мету дослідження, конструкцію дослідної установки рисунок 1, також вимогу щодо мінімальної кількості дослідів, визначаємо фактори, які будуть використовуватись при проведенні експерименту: частота утримання (Гц); скважність імпульсів (%); фактор оптимізації – кут факелу форсунки.

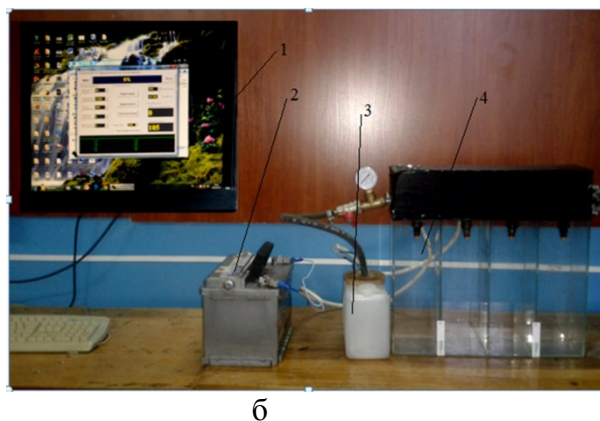
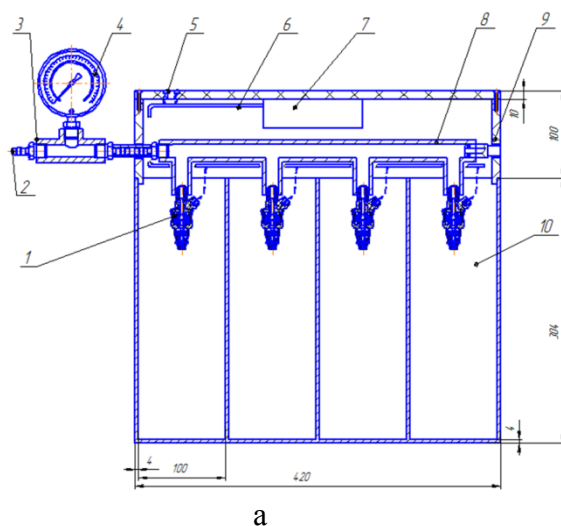


Рисунок 1 –Стенд AQUA Multi-Jet:

а – Схема стенду: 1 – форсунка, 2 – штуцер, 3 – трійник, 4 – манометр, 5 – блок кнопок, 6 – провідники, 7 – блок керування, 8 – паливна рампа, 9 – кришка, 10 – скляна ємність;
б – Дослідницька установка: 1 – персональний комп'ютер; 2 – акумуляторна батарея; 3 – паливний бачок; 4 – стенд AQUA Multi-Jet.

Утворення геометрії факела залежать від тиску впорскування, діаметра соплового отвору, скважності імпульсів, щільності і рухливості повітря. Чим більше тиск впорскування і діаметр соплового отвору, тим сильніше проникає факел у глиб камери згоряння, а чим більша скважність тим кращий, ширший кут розпилу. А збільшуючи частоту утримання можливо зімітувати багатоступеневе впорскування, так як форсунка на стандартному режимі працює з частотою утримання 400 Гц на середній обертах. Період відкритого стану форсунки $1/400 = 2,5$ мс [4,5].

Скважність імпульсів форсунок вибирається залежно від опору обмотки форсунки. Для форсунок високоомних з опором 10-16 Ом скважність становить близько 10-30%, для низькоомних форсунок з опором 2-10 Ом – 50-70%. А так як у нас

досліджувана форсунка високоомна і буде досліджуватися на статичному тесті тому що, такий метод утримання форсунок в повністю відкритому стані є оптимальним, як для форсунок з низьким опором обмотки (2-10 Ом), так і з високим (10-16 Ом). Спираючись на вимоги цього тесту скважність можна регулювати від 10-70% .

Проведення, виміри і фіксування даних експерименту. Для досягнення поставленої мети дослідницької роботи виконана одна з головних задач – виготовлення стенду AQUA Multi-Jet (рисунки 1 та 2) для проведення експерименту. Стенд має інформаційний зв'язок з персональним комп'ютером, тобто безпосередньо з програмним забезпеченням *CarTest-injector*. Підключення стенду відбувається через блок електронного управління, який встановлений в кришці. Електронний блок керує роботою бензонасосу та виступає регулятором імпульсів, які подаються на форсунку. Елементом живлення для стенду є акумуляторна батарея на 12 В.

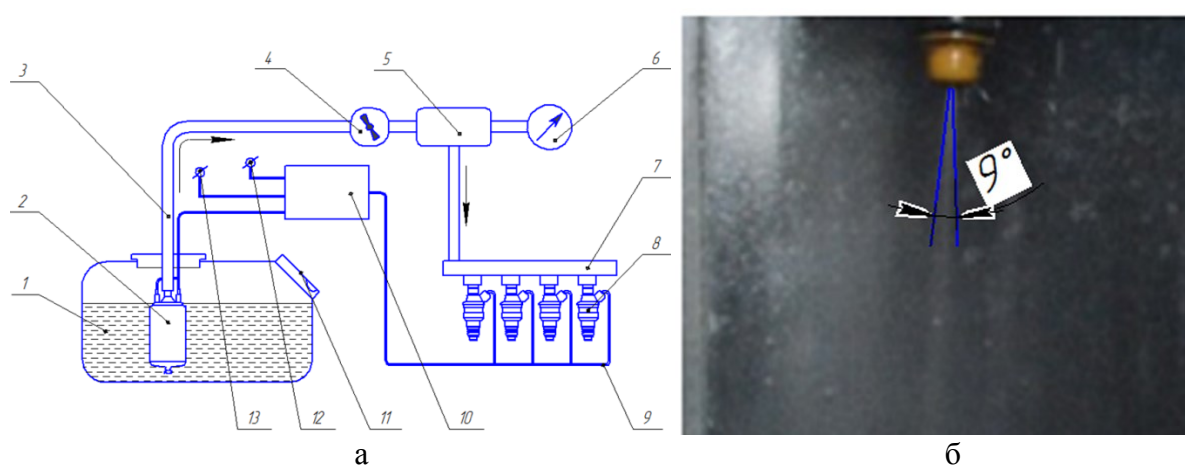


Рисунок 2 – Схема роботи стенда: 1 – паливний бачок; 2 – електробензонасос; 3 – паливопровід (стрілкою позначено напрям руху палива); 4 – кран; 5 – розгалуджувач; 6 – манометр; 7 – паливна рампа; 8 – форсунка; 9 – електродрошти; 10 – блок управління; 11 – заливна пробка; 12 – СОМ-порт; 13 – дроти живлення. а – схема роботи стенда; б – вимірювання кута в графічній програмі КОМПАС.

Таким чином провівши експеримент відповідно до матриці планування отримали наступні результати. Для кращого сприйняття результатів зроблено фрагментацію матриці по частоті утримання: 400 Гц (таблиця 1), 600 Гц (таблиця 2), 800 Гц (таблиця 3), під кожною з таблиць відповідно представлені фотографії кутів факелів розпилу. Відповідно з роботою програми *CarTest-injector*, за допомогою якої проводились всі експерименти, отримуємо зображення осцилограми скважності, з яких видно як змінюється робота форсунки в результаті зміни скважності імпульсів.

Таблиця 1 –Значення факторів експерименту

| Фактори | Значення | | |
|-------------------------|----------|-----|-----|
| | а | б | в |
| Частота утримання (Гц) | 400 | 400 | 400 |
| Скважність імпульсів(%) | 10 | 20 | 30 |
| Вимірний кут факелу | 7° | 9° | 11° |

Відповідно до матриці планування проведено експерименти з значеннями факторів: частотою утримання 400 Гц, скважністю 10%; ч.у. 400 Гц, ск. 20%; ч.у. 400 Гц, ск. 30%. Ці умови дозволяють зімітувати нормальну, стандартну роботу форсунки

на середніх і високих обертах, тобто форсунка видає 1 впорскування. Найкращий кут факелу спостерігається при факторах із значеннями частоти утримання 400 Гц та сквапністю 30% – 11° (рисунок 3). Осцилограма скважності (рисунок 3) показує період відкритого стану форсунки $1/400 = 2,5$ мс.

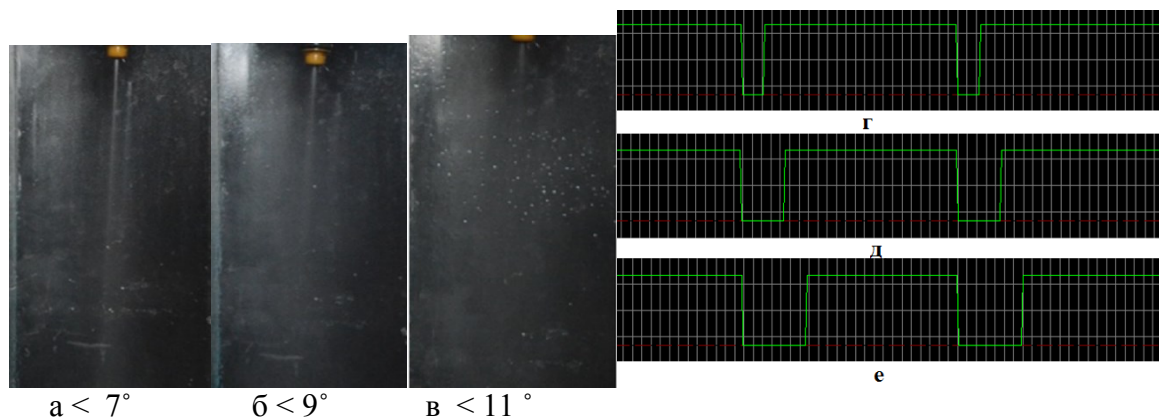


Рисунок 3 – Факели розпили відповідно до значень факторів в таблиці 1 (а, б, в); осцилограми скважності відповідно до значень факторів в таблиці 1 (г,д,е)

Таблиця 2 –Значення факторів експерименту

| Фактори | Значення | |
|-------------------------|----------|--------|
| | а | б |
| Частота утримання (Гц) | 600 | 600 |
| Скважність імпульсів(%) | 10 | 20 |
| Вимірний кут факелу | 9°3' | 13°35' |

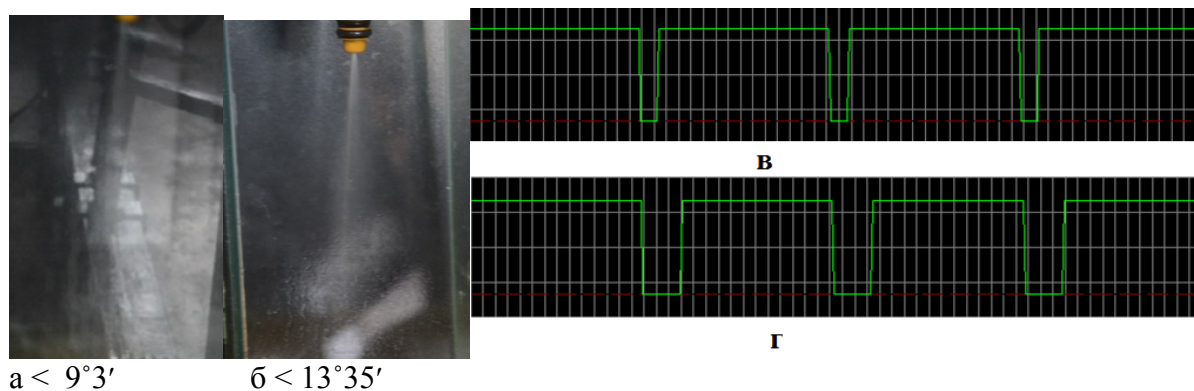


Рисунок 4 – Факели розпили відповідно до значень факторів в таблиці 2 (а, б); осцилограми скважності відповідно до значень факторів в таблиці 2 (в, г)

Відповідно до матриці планування проведено експерименти з значеннями факторів: частотою утримання 600 Гц, скважністю 10%; ч.у. 600 Гц, ск. 20%. При скважності 30% факел не спостерігається, оскільки електронні системи форсунки здатні передати високочастотні сигнали, але механічні системи управління форсунки не в змозі відтворити подібні сигнали. Такі параметри дозволяють зімітувати 2-й ступень впорскування. Оскільки форсунка відкривається частіше, з часом імпульсу 1,6 мс, так

як це показує осцилограма скважності (рисунок 4), форсунка дозволяє виробляти замість одного впорскування кілька міні - впорскувань. Найкращий кут факелу спостерігається при скважності 20% – 13°35' (рисунок 4).

Таблиця 3 – Значення факторів експерименту

| Фактори | Значення | |
|-------------------------|----------|--------|
| | а) | б) |
| Частота утримання (Гц) | 800 | 800 |
| Скважність імпульсів(%) | 10 | 20 |
| Вимірний кут факелу | 9°2' | 12°28' |

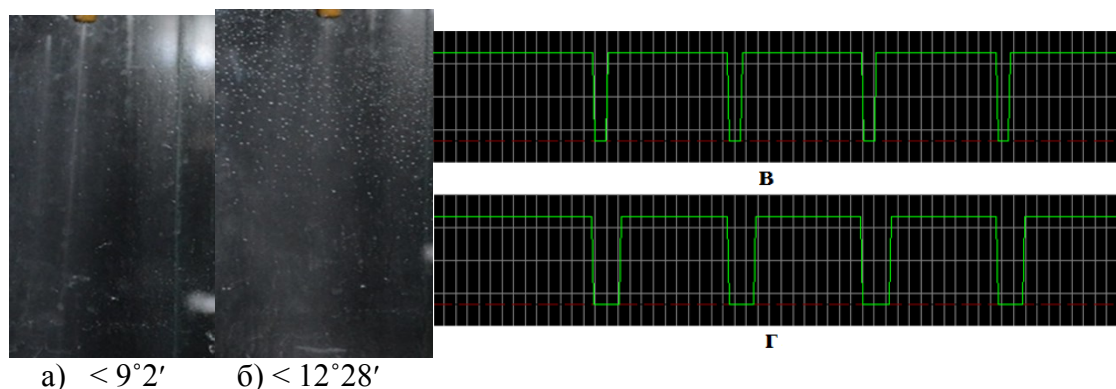


Рисунок 5 – Факели розпилу відповідно до значень факторів в таблиці 3 (а, б); осцилограми скважності відповідно до значень факторів в таблиці 3 (в, г)

Відповідно до матриці планування проведено експерименти з значеннями факторів: частотою утримання 800 Гц, скважністю 10%; ч.у. 800 Гц, ск. 20%;. При скважності 30% факел не спостерігається, оскільки електронні системи форсунки здатні передати високочастотні сигнали, але механічні системи управління форсунки не в змозі відтворити подібні сигнали. Форсунка працювала з великою швидкістю, такими параметрами зімітували 3-й ступень впорскування. Найкращий кут факелу спостерігається при скважності 20% – 12°28' (рисунок 5). Осцилограма скважності (рисунок 5) показує період відкритого стану форсунки $1/800 = 1,25$ мс.

Крім визначення оптимального кута факелу форсунки виміряли витрату палива на кращих кутах факелу розпилу форсунки, щоб дізнатися при яких же умовах роботи форсунки є найкраща економія палива. Витрату палива досліджували об'єктивним методом, при 1000 об/хв. [6-8].

Таблиця 4 – Витрата палива

| Значення факторів: частоти утримання та скважності | Витрата палива, мл. |
|--|---------------------|
| 800 Гц, 20% | 2,2 |
| 600 Гц, 20% | 2,85 |
| 400 Гц, 30% | 4,2 |

Отже, після проведених досліджень бачимо, що найкраща економія палива є при параметрах роботи форсунки 600 Гц, 20% – витрата палива 2,85 мл. Так, як при

параметрах роботи форсунки і 800 Гц, 20% витрата палива здається меншою, але клапан форсунки не повністю відкривається і закривається, тому витрата палива має похибку. Розрахувавши у відповідності [9,10] матрицю планування експерименту отримуємо наступні результати. За вхідні фактори приймалися частота утримання Гц (X_1), скважність імпульсів % (X_2), а за параметр оптимізації (Y) – кут факела. При двофакторному експерименті ($n=2$) регресійна модель має наступний вигляд:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2, \quad (1)$$

де b_0 – вільний член рівняння регресії; b_i, b_{ji} – коефіцієнти рівняння множинної регресії, n – число факторів, x_j і x_i – фактори експерименту.

Таблиця 5 – Інтервали варіювання факторів в експерименті

| Фактори | Рівні | | | Інтервали варіювання |
|-------------------------------|-------|-----|-----|----------------------|
| | -1 | 0 | +1 | |
| X_1 (частота утримання Гц) | 400 | 600 | 800 | 200 |
| X_2 (скважність імпульсів%) | 10 | 20 | 30 | 10 |

Таблиця 6 – Матриця планування повнофакторного експерименту типу 3^2 з ефектом взаємодії першого порядку і результати дослідів.

| Порядковий номер | Порядок варіювання факторів | | | | Значення параметрів | | |
|------------------|-----------------------------|-------|-------|----------|---------------------|--------------------|-------------|
| | X_0 | X_1 | X_2 | X_1X_2 | Y_i | $\bar{y}_{i\cdot}$ | $S^2_{y_i}$ |
| 1 | + | +1 | +1 | + | 0 | 0 | 0 |
| 2 | + | +1 | 0 | + | 12,47 | 7,8 | 2,73 |
| 3 | + | +1 | -1 | - | 9,03 | 7,8 | 0,19 |
| 4 | + | 0 | +1 | + | 0 | 0 | 0 |
| 5 | + | 0 | 0 | 0 | 13,58 | 7,8 | 4,18 |
| 6 | + | 0 | -1 | - | 8,07 | 7,8 | 0,009 |
| 7 | + | -1 | -1 | + | 7 | 7,8 | 0,08 |
| 8 | + | -1 | 0 | - | 9 | 7,8 | 0,18 |
| 9 | + | -1 | +1 | - | 11 | 7,8 | 1,28 |

Розрахунок коефіцієнтів рівняння регресії виконується за методом найменших квадратів, при цьому мінімізується сума квадратів відхилень міжекспериментальними значеннями досліджуваного параметру за значеннями, що розраховані для тих же точок факторного простору за рівнянням регресії:

$$b_1 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_1 \cdot y_j = \frac{12,47 + 9,03 - 7 - 9 - 11}{9} = -0,611 \quad (2)$$

$$b_2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_2 \cdot y_j = \frac{-9,03 - 8,07 - 7 + 11}{9} = -1,456$$

$$(3) \quad b_{12} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{12} \cdot y_j = \frac{12,47 - 9,03 - 8,07 + 7 - 9 - 11}{9} = -1,959 \quad (4)$$

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_0 \cdot \bar{y}_j = \frac{7,8 + 7,8 + 7,8 + 7,8 + 7,8 + 7,8 + 7,8}{9} = 6,06 \quad (5)$$

Підставивши в (1) коефіцієнти отримаємо наступне рівняння :

$$y = 6,06 - 0,611x_1 - 1,456x_2 - 1,959x_1x_2 \quad (6)$$

Гіпотезу про статистичну значущість (відмінність від нуля) коефіцієнтів регресії перевірено за критерієм Стьюдента. Адекватність моделі перевірена за критерієм Фішера.

Висновки. На виготовленому стенді проведено необхідну кількість дослідів, яка відповідає матриці планування, результати представлено у роботі у вигляді фотографій та графіків, визначено оптимальний кут факелу розпилу бензинової форсунки – 13°35', що відповідає значенням факторів частоти утримання 600 Гц, скважності 20%, при цьому витрата палива – 2,85 мл/хв. Ці умови можна рекомендувати, як оптимальні для подальшої експлуатації, що будуть встановлені на ДВЗ. Крім цього пораховано матрицю планування експерименту та отримано математичну модель досліджуваного об'єкту у вигляді рівняння множинної регресії: $y = 6,365 - 2,18x_1 - 1,53x_2 - 2,24x_1x_2$ з якого впливає що математична модель є адекватною, при $X_1=600$ Гц, $X_2=20\%$.

Список літератури: 1. *Ананьев С.И.* Испытание двигателей внутреннего сгорания/ *Ананьев С.И., Дьяченко Г.Н.*//учеб. пособие. Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ. – 1999.– 368 с. 2. ГОСТ 14846–81. Двигатели автомобильные. Методы стендовых испытаний. – М.: Госстандарт.–1981.– 42 с. 3. *Николаенко А.В.* Теория, конструкция и расчет автотракторных двигателей. / *Николаенко А.В.* – М.: Колос, – 1992. – 334 с. 4. *Борщенко Я.А.* Электронные и микропроцессорные системы автомобилей/ *Борщенко Я.А., Васильев В.И.*// учеб.пособ. Курганск: Издательство КГУ, – 2007. – 207 с. 5. *Рогов В. А.* Методика и практика технических экспериментов / *Рогов В. А.*// учеб.пособ. для вузов. – М.: – Академия, 2005. – 283 с. 6. *Карачинов В.А.* Форсунки впрыска топлива бензиновых двигателей / *Карачинов В.А., Ильин С.В.*// Вестн. новгородского гос. ун-та. – 2004. – №26. С. 155 - 160. 7. *Абрамчук Ф.И.* Автомобильні двигуни: Підручник/ *Абрамчук Ф.И., Гутаревич Ю.Ф., Долганов К.С. Димченко І.І.*// – К.: Арістей, – 2006. – 476 с. 8. *Гутаревич Е.Ф.* Екологія та автомобільний транспорт/ *Гутаревич Е.Ф., Зеркалов Д.Ф., Говорун А.Г., Корнач А.О., Мерзюєвська Л.П.*// Навчальний посібник. – К.: Арістей, – 2006. – 292 с. 9. *Ю.П. Адлер.* Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий/ *Ю.П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю.В. Грановский.*//Изд. второе перераб. и доп. – М.: Наука, –1976. – 279 с. 10. *Г. И. Красовский* Планирование эксперимента/ *Г. И. Красовский, Г. Ф. Филаретов*// – Мн: Изд - во БГУ, – 1982. – 476 с.

Bibliography (transliterated): 1. *Ananov S.I.* Test internal combustion engines / *Ananov S.I., G.N.Dyachenko*. Proc. allowance. Rostov-on-Don: Publishing Center DSTU. – 1999. – 368 p. 2. Standard 14846-81. Engines. Methods of benchtests. - М.: State Standard. – 1981. – 42p. 3. *Nikolaenko A.V.* Theory, design and calculation of automotive engines. / *Nikolaenko A.V.* – Moscow: Kolos – 1992. – 334 p. 4. *Borshchenko Y.A.* Electronic and microprocessor systems Car / *Borshchenko Y.A., V.I.Vasilyev*. Proc. benefits. Kurgan: Publishing KSU – 2007. – 207 p. 5. *Rogov V.A.* Methodology and practice of technical experiments / *Rogov V.A.* Proc. benefits. for high schools. – Moscow: – The Academy, 2005. – 283 p. 6. *Karachinov V.A.* Injector fuel injection gasoline engines / *Karachinov V.A., Ilyin S.V.* Vestn. Novgorod State. Univ. – 2004. – No26. P.155–160. 7. *Abramchuk F.I.* Engines: Tutorial / *Abramchuk F.I., Gutarevych Y.F., K.E.Dolganov, Dimchenko I.I.* – Kiev: Aristey – 2006. – 476 p. 8. *Gutarevych E.F.* Ecology and road transport / *Gutarevych E.F., D.F.Zerkalov, Govorun A.G., Korpach A.A., Merzhyyevska L.P.* Manual. – Kiev: Aristey – 2006. – 292 p. 9. *Y.P.Adler.* Planning an experiment in these arch for optimal conditions / *Y.P.Adler, E.V.Markova, Y.V. Granovsky.* Ed. second revised. and add. – Moscow: Nauka – 1976. – 279 p. 10. *G.I.Krasovskii* Experimental Design / *G.I.Krasovskii, G.F.Filaretov* – Mn: Publishing – BGU – 1982. – 476 p.

Надійшла (received) 02.02.2012