

УДК 621.43

**Ю. Ф. ГУТАРЕВИЧ**, д-р. техн. наук., проф., зав. каф. «Двигуни і теплотехніка» НТУ, Київ;

**С. В. КАРЕВ**, канд. техн. наук., асист. каф. «Двигуни і теплотехніка» НТУ, Київ

### **ВПЛИВ РЕЦИРКУЛЯЦІЇ ВІДПРАЦЬОВАНИХ ГАЗІВ НА ПОКАЗНИКИ СУЧАСНОГО БЕНЗИНОВОГО ДВИГУНА З ВІДКЛЮЧЕННЯМ ГРУПИ ЦИЛІНДРІВ**

В даній статті наведені результати експериментальних досліджень по впливу рециркуляції відпрацьованих газів, з відбором після нейтралізатора, на показники сучасного бензинового двигуна з відключенням групи циліндрів. Представлено методику визначення коефіцієнта рециркуляції відпрацьованих газів, виходячи з балансу теплоти. Визначений оптимальний коефіцієнт рециркуляції відпрацьованих газів для двигуна 6Ч 9,5/6,98 для режиму, який широко використовується в умовах експлуатації.

**Ключові слова:** комбінований метод регулювання потужності, рециркуляція відпрацьованих газів, бензиновий двигун, оксиди азоту, оптимальний коефіцієнт рециркуляції відпрацьованих газів.

**Вступ.** На кафедрі «Двигуни і теплотехніка» Національного транспортного університету продовжуються роботи по дослідженню комбінованого методу регулювання потужності (КМРП) та рециркуляції відпрацьованих газів (РВГ) на сучасному бензиновому двигуні, обладнаному нейтралізатором відпрацьованих газів (ВГ) [1;2].

Суть КМРП полягає у відключенні подачі палива в частину циліндрів двигуна в режимах малих навантажень та холостого ходу, при цьому необхідну потужність розвиває працююча група циліндрів.

За результатами експериментальних досліджень на двигуні 6Ч 9,5/6,98 отримано, що при застосуванні КМРП покращується паливна економічність в вище названих режимах [3].

Недоліком даного методу є погіршення окремих екологічних показників, зокрема зростають концентрації оксидів азоту  $\text{NO}_x$ , і, як наслідок, збільшуються сумарні масові викиди шкідливих речовин, приведені до СО. Зростання концентрацій оксидів азоту  $\text{NO}_x$  є наслідком підвищення температурного режиму працюючої групи циліндрів двигуна, що є однією з причин утворення оксидів азоту  $\text{NO}_x$ .

Одним з найбільш ефективних методів зниження концентрацій оксидів азоту  $\text{NO}_x$  є РВГ, суть якої полягає в поверненні частини ВГ з випуску знову на впуск [4].

За результатами експериментальних досліджень на двигуні 6Ч9,5/6,98 при КМРП отримано, що при застосуванні РВГ знижуються концентрації оксидів азоту  $\text{NO}_x$ , і відповідно знижуються сумарні масові викиди шкідливих речовин, приведені до СО [5; 6].

При цьому відбір ВГ здійснювався до нейтралізатора ВГ, що дозволяло збільшити коефіцієнт рециркуляції ВГ при менших значеннях діаметра каналу рециркуляції ВГ. Це досягалося внаслідок надлишкового тиску перед нейтралізатором ВГ, що забезпечувало більший перепад тисків між випускним колектором та впускним. Але при цьому на впуск поверталася частка ВГ, концентрації шкідливих речовин (ШР) в якій були вищі в порівнянні з концентраціями ШР після рециркуляції ВГ та нейтралізатора ВГ.

**Мета дослідження.** Дослідження впливу РВГ при відборі ВГ після нейтралізатора ВГ на показники паливної економічності та токсичності сучасного бензинового двигуна 6С 9,5/6,98, обладнаного нейтралізатором.

**Рішення задачі.** Експериментальні дослідження по впливу РВГ при відборі ВГ після нейтралізатора ВГ на показники паливної економічності та токсичності сучасного бензинового двигуна 6С 9,5/6,98, обладнаного нейтралізатором, проводились для навантажувального і швидкісного режиму, який широко використовується в умовах експлуатації (частота обертання колінчастого вала  $n=2000 \text{ хв}^{-1}$  та відкриття дросельної заслінки  $\varphi_{др}=15^\circ$  ( $\Delta P_k=30 \text{ кПа}$ )).

Для визначення коефіцієнта рециркуляції ВГ, який згідно [7] є відношенням маси рециркульованих ВГ до маси всіх ВГ, на кафедрі «Двигуни і теплотехніка» Національного транспортного університету запропонована методика визначення маси рециркульованих відпрацьованих газів розрахунковим шляхом [8]. Відповідно до цієї методики, кількість рециркульованих ВГ визначається з балансу теплоти до і після змішування рециркульованих ВГ газів і повітря.

Змішування рециркульованих ВГ газів і повітря відбувається за сталого тиску. Тоді теплота компонентів до змішування і їх суміші однакова.

$$Cp_{нов} G_{нов} T_{нов} + Cp_{рвг} G_{рвг} T_{рвг} = Cp_{сум} G_{сум} T_{сум} \quad (1)$$

де  $Cp_{нов}, Cp_{рвг}, Cp_{сум}$  - масові теплоємності повітря, ВГ, суміші повітря і рециркульованих ВГ при температурах  $T_{нов}, T_{рвг}, T_{сум}$  відповідно;

$G_{нов}, G_{рвг}, G_{сум}$  - годинні витрати повітря, ВГ та суміші повітря і рециркульованих ВГ;

Для розрахунків ізобарні теплоємності повітря, ВГ, суміші повітря і рециркульованих ВГ визначаються для кожного компонента при замірній експериментально температурі.

Так як  $G_{сум} = G_{нов} + G_{рвг}$ , то можна

записати  $Cp_{нов} G_{нов} T_{нов} + Cp_{рвг} G_{рвг} T_{рвг} = (G_{нов} + G_{рвг}) Cp_{сум} T_{сум}$ , або

$Cp_{нов} G_{нов} T_{нов} + Cp_{рвг} G_{рвг} T_{рвг} = G_{нов} Cp_{сум} T_{сум} + G_{рвг} Cp_{сум} T_{сум}$  звідси:

$$G_{рвг} = \frac{G_{нов}(Cp_{сум} T_{сум} - Cp_{нов} T_{нов})}{Cp_{рвг} T_{рвг} - Cp_{сум} T_{сум}} \quad (2)$$

Теплоємність суміші ( $Cp_{сум}$ ) визначають через теплоємності повітря і ВГ ( $Cp_{нов}, Cp_{рвг}$ ) в залежності від визначених температур повітря і ВГ ( $T_{нов}, T_{рвг}$ ):

$$Cp_{сум} = \frac{G_{нов}}{G_{нов} + G_{рвг}} Cp_{нов} + \frac{G_{рвг}}{G_{нов} + G_{рвг}} Cp_{рвг} \quad (3)$$

При підстановці (3) в (2) отримуємо

$$G_{p\epsilon z} = \frac{Cp_{нов} G_{нов} (T_{сум} - T_{нов})}{Cp_{p\epsilon z} (T_{p\epsilon z} - T_{сум})} \quad (4)$$

Коефіцієнт рециркуляції розраховується за наступною залежністю, %:

$$R_{ВГ} = \frac{G_{p\epsilon z}}{G_n + G_{нов} + G_{p\epsilon z}} \cdot 100 \quad (5)$$

Вплив коефіцієнта рециркуляції ВГ на паливну економічність, енергетичні показники двигуна 6Ч 9,5/6,98 показано на Рис.1, з якого видно, що при збільшенні коефіцієнта рециркуляції  $R_{ВГ}$ , годинна витрата повітря  $G_{нов}$  зменшується за рахунок заміщення частини повітря рециркульованими ВГ. У результаті цього система управління двигуна, для підтримки коефіцієнта надміру повітря  $\alpha$  близько 1.0, зменшує циклову подачу бензину, за рахунок чого зменшується годинна витрата палива  $G_n$  і, як наслідок, зменшується ефективна потужність двигуна  $N_e$ .

У результаті перепуску ВГ, температура яких вища за температуру повітря на впуску, у впускний колектор, зростає температура суміші, за рахунок чого зростає абсолютний тиск, і відповідно зменшується розрідження у впускному колекторі  $\Delta P_k$ , завдяки чому зменшуються насосні втрати на впуску.

Зі збільшенням коефіцієнта рециркуляції  $R_{ВГ}$  питома ефективна витрата палива  $g_e$  різко зростає до значення коефіцієнта рециркуляції  $R_{ВГ} \approx 6\%$ , після чого інтенсивність зростання зменшується.

РВГ не впливає на кут випередження запалювання  $\theta$ , в наслідок чого він залишається незмінним на рівні  $32^\circ$  п.к.в.

На рис. 2 показано вплив коефіцієнта рециркуляції  $R_{ВГ}$  на концентрації шкідливих речовин з ВГ двигуна 6Ч 9,5/6,98, з якого видно, що при збільшенні коефіцієнта рециркуляції  $R_{ВГ}$  концентрації оксидів азоту  $C_{NOx}$  інтенсивно зменшуються до значення коефіцієнта рециркуляції  $R_{ВГ} \approx 6\%$ , після чого інтенсивність зменшення знижується. Зменшення концентрацій оксидів азоту  $C_{NOx}$  пояснюється тим, що ВГ, потрапивши в циліндри двигуна, діють як активні центри на початку реакції згорання [9], але разом з тим збільшують кількість баластних компонентів, сповільнюючи протікання реакції окислення і знижуючи її температуру, що, згідно з термохімічною теорією утворення оксидів азоту Зельдовича Я.Б. [10], уповільнює реакцію утворення оксидів азоту  $NO_x$ .

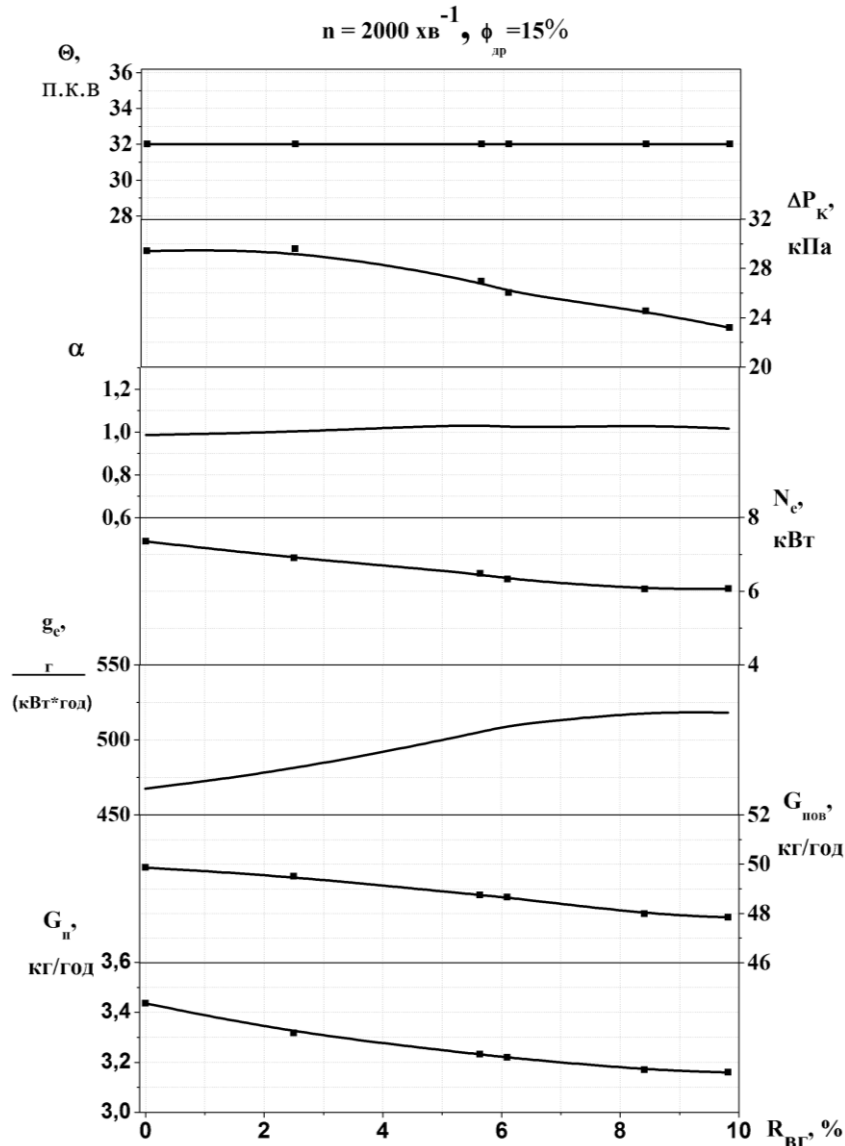


Рисунок 1 – Вплив коефіцієнта рециркуляції ВГ на показники паливної економічності та енергетичні показники двигуна 6Ч 9,5/6,98

При збільшенні коефіцієнта рециркуляції  $R_{BG}$  концентрації монооксиду вуглецю  $C''_{CO}$  та двооксиду вуглецю  $C''_{CO_2}$  залишаються майже незмінними за рахунок підтримки системою управління двигуна складу паливоповітряної суміші близького до стехіометричного ( $\alpha=1$ ).

Концентрації вуглеводнів  $C'_{C_mH_n}$  дещо зростають, що можна пояснити зменшенням температури циклу.

Оптимальний коефіцієнт рециркуляції  $R_{BG}$  визначається в залежності від інтенсивності протікання питомої ефективної витрати палива  $g_e$  та концентрації оксидів азоту  $NO_x$ , для цього визначена похідна першого порядку (Рис.3) цих величин відносно коефіцієнта рециркуляції  $R_{BG}$ .

Відповідно до похідної концентрації оксидів азоту  $dC'_{NO_x}$ , інтенсивне зменшення концентрацій оксидів азоту відбувається до значення коефіцієнта рециркуляції  $R_{BG} \approx 6\%$ , після чого інтенсивність зменшується.

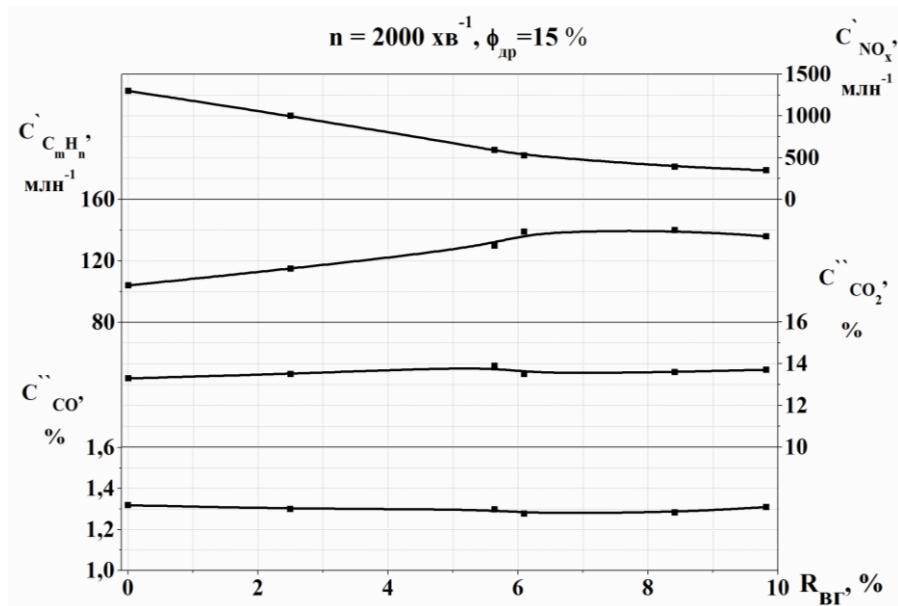


Рисунок 2 – Вплив коефіцієнта рециркуляції ВГ на показники токсичності двигуна 6C9,5/6,98

Питома ефективна витрата палива  $g_e$  зростає практично пропорційно величині  $R_{BG}$  до значення  $R_{BG} \approx 6,2\%$ , після чого інтенсивність зростання знижується.

Тому для даного швидкісного і навантажувального режиму з точки зору зміни паливної економічності  $g_e$  та зміни концентрацій оксидів азоту  $C_{NOx}$  доцільно підтримувати коефіцієнт рециркуляції в межах 6...6,5%.

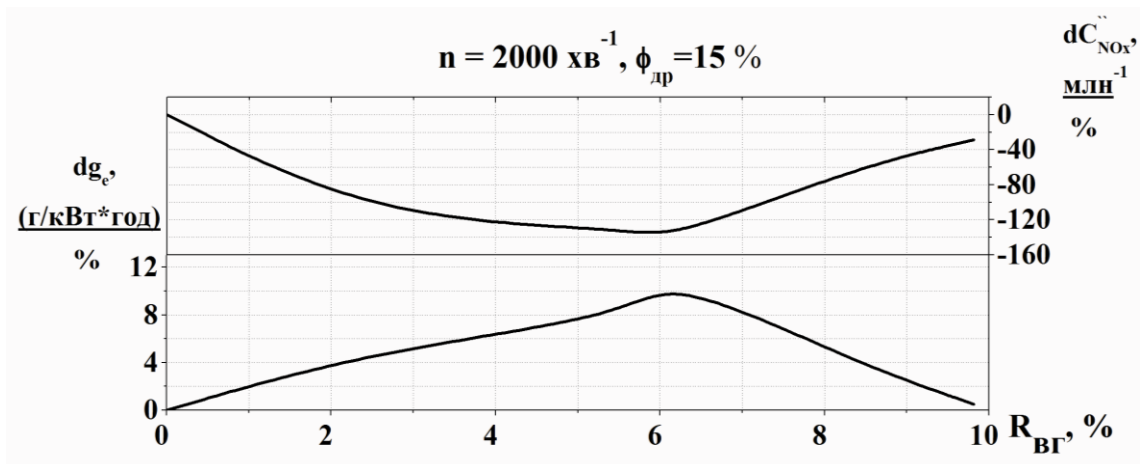


Рисунок 3 – Похідні першого порядку питомої ефективної витрати палива  $g_e$  та концентрації оксидів азоту  $NO_x$  відносно коефіцієнта рециркуляції  $R_{BG}$

**Висновки.** Дослідження впливу РВГ при відборі ВГ після нейтралізатора ВГ на показники паливної економічності та токсичності сучасного бензинового двигуна БЧ 9,5/6,98, обладнаного нейтралізатором, при застосуванні КМРП показали:

- система управління двигуна забезпечує роботу двигуна зміною циклової подачі палива на стехіометричній паливоповітряній суміші в незалежності від зміни коефіцієнта рециркуляції ВГ  $R_{BG}$ ;
- РВГ з відбором ВГ після нейтралізатора дозволяє суттєво зменшити концентрацію оксидів азоту  $C_{NOx}$ , концентрації монооксиду вуглецю  $C_{CO}$  та двооксиду вуглецю  $C_{CO2}$  залишились майже незмінними, а концентрації вуглеводнів  $C_{CmHn}$  незначно зростають;
- РВГ призвела до зменшення годинної витрати палива  $G_p$  і, як наслідок, зменшення ефективної потужності двигуна  $N_e$ ;
- при збільшенні коефіцієнта РВГ питома ефективна витрата палива  $g_e$  різко зростає до значення коефіцієнта рециркуляції  $R_{BG} \approx 6\%$ , після чого інтенсивність зростання зменшується;
- відповідно до отриманих похідних залежності питомої ефективної витрати палива  $g_e$  та концентрацій оксидів азоту  $C_{NOx}$ , оптимальний коефіцієнт рециркуляції  $R_{BG}$  знаходиться в межах 6...6,5%.

**Список літератури:** 1. *Сирота О.В.* Розробка системи відключення і включення групи циліндрів для керування двигуном з впорскуванням бензину. / *О.В. Сирота* // *Матеріали XIX конференції міжнародowej "Metody obliczeniowe i badawcze w rozwoju pojazdów samochodowych i maszyn roboczych samojezdnych. Zarządzanie i marketing w motoryzacji"* SAKON'08. – Rzeszów: Politehnika Rzeszowska. – 2008. – С. 145–150. 2. *Карев С.В.* Разработка комбинированного метода регулирования мощности современного бензинового двигателя / *Карев С.В., Сирота А.В.* // *Энергоэффективные технологии в транспортных системах будущего. Международная молодежная конференция. Сборник тезисов и статей международной молодежной конференции МГТУ «МАМИ»* – М., МГТУ «МАМИ», 2011. – 156 с. – С.75–79. 3. *Сирота О.В.* Експериментальні дослідження двигуна з впорскуванням бензину і зворотнім зв'язком при застосуванні комбінованого методу регулювання потужності / *О.В. Сирота* // *Вісник НТУ*. – К.: НТУ, 2008.– № 17, С. 95 – 101. 4. *Ковбасенко С.В.* Покращення екологічних показників двигуна з відключенням групи циліндрів шляхом застосування рециркуляції відпрацьованих газів // *Системні методи керування, технологія та організація виробництва, ремонту і експлуатації автомобілів: Зб. наук. пр.* – Київ, УТУ, ТАУ. – Вип. 6. – 1999. – С. 33–37 5. *Гутаревич Ю.Ф.* Удосконалення комбінованого методу регулювання потужності сучасного бензинового двигуна / *Гутаревич Ю.Ф., Карев С.В.* // *Вісник Національного транспортного університету*. – К: НТУ, 2011.– Випуск 23. – 230 с. –С.114-117. 6. *Карев С.В.* Аналіз впливу рециркуляції відпрацьованих газів на зменшення викидів шкідливих речовин двигунами з іскровим запалюванням / *LXV науково-практична конференція науково-педагогічних працівників, аспірантів, студентів та структурних підрозділів університету*. – К: НТУ, 2009. – 440 с. – С.28. 7. *Двигуни внутрішнього згорання: Серія підручників у 6 томах. Т.5. Екологізація ДВЗ / за ред. проф. А.П.Марченка та засл. діяча науки України проф. А.Ф.Шеховцова*. – Харків: Прапор, 2004. – 360с. 8. *Гутаревич Юрій* Вплив рециркуляції відпрацьованих газів на паливну економічність та екологічні показники сучасного бензинового двигуна/ *Гутаревич Юрій, Карев Станіслав/ System sandmeans of motor transport (selected problems)*, Rzeszow 2011 – С.141-147. 9. *Звонов В.А.* Образование загрязнений в процессах сгорания. – Луганск: Издательство восточно- украинского государственного университета, 1998. – 126 с. 10. *Зельдович Я.Б.* Окисление азота при

горении / Зельдович Я.Б., Садовников П.Я., Франк-Каменецкий Д.А.// – М.: Изд-во АН СССР, 1946. – 145 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Syrota O.V. Rozrobka systemy vidklyuchennya i vkluchennya hrupy tsylindriv dlya keruvannya dvyhunom z vporskuvannyam benzynu. / O.V. Syrota . Materiały XIX konferencji międzynarodowej "Metody obliczeniowe i badawcze w rozwoju pojazdów samochodowych i maszyn roboczych samojezdnych. Zarządzanie i marketing w motoryzacji" SAKON'08. – Rzeszów: Politehnika Rzeszowska. – 2008. – P. 145–150. 2. Karev S.V. Razrabotka kombynyrovannoho metoda rehulyrovanyya moshchnosti sovremennoho benzynovoho dvyhatelya / Karev S.V., Syrota A.V. Enerhoeffektyvne tekhnolohyy v transportnykh systemakh budushcheho. Mezhdunarodnaya molodezhnaya konferentsyya. Sbornyk tezysov i stattey mezhdunarodnoy molodezhnoy konferentsyy MHTU «MAMY» – Moscow, MHTU «MAMY», 2011. – 156 p. – P.75-79. 3. Syrota O.V. Eksperymental'ni doslidzhennya dvyhuna z vporskuvannyam benzynu i zvorotnim zv'yazkom pry zastosuvanni kombinovanoho metodu rehulyuvannya potuzhnosti/ O.V. Syrota . Visnyk NTU. – Kiev: NTU, 2008.– # 17, P. 95 – 101. 4. Kovbasenko S.V. Pokrashchennya ekolohichnykh pokaznykiv dvyhuna z vidklyuchennyam hrupy tsylindriv shlyakhom zastosuvannya retsyrkulyatsiyi vidprats'ovanykh haziv . Systemni metodi keruvannya, tekhnolohiya ta orhanizatsiya vyrobnytstva, remontu i ekspluatatsiyi avtomobiliv: Zb. nauk. pr. – Kiev, UTU, TAU. – Vyp. 6. – 1999. – P. 33–37 5. Hutarevych Yu.F. Udoskonalennya kombinovanoho metodu rehulyuvannya potuzhnosti suchasnoho benzynovoho dvyhuna / Hutarevych Yu. F., Karev S.V. Visnyk Natsional'noho transportnoho universytetu. – Kiev: NTU, 2011. – Vypusk 23. – 230 p. –P.114–117. 6. Karev S.V. Analiz vplyvu retsyrkulyatsiyi vidprats'ovanykh haziv na zmeshennya vykydiv shkidlyvykh rehovyn dvyhunamy z iskrovym zapalyuvannyam / LXV nauково-praktychna konferentsiya nauково-pedahohichnykh pratsivnykiv, aspirantiv, studentiv ta strukturnykh pidrozdiliv universytetu. – Kiev: NTU, 2009. – 440 p. – P.28. 7. Dvyhuny vnutrishn'oho zhoryannya: Seriya pidruchnykiv u 6 tomakh. T.5. Ekolohizatsiya DVZ / zared.. prof. A.P. Marchenkatazasl. diyacha nauky Ukrayiny prof. A.F. Shekhovtsova. – Kharkiv: Prapor, 2004. – 360p. 8. Hutarevych Yuriy Vplyv retsyrkulyatsiyi vidprats'ovanykh haziv na palyvnu ekonomichnist' ta ekolohichni pokaznyky suchasnoho benzynovoho dvyhuna/ Hutarevych Yuriy, Karev Stanislav/ System sandmeans of motortransport (selected problems), Rzeszow 2011 – P. 141 – 147. 9. Zvonov V.A. Obrazovanye zahryaznenyy v protsessakh shoranyya. – Luhansk: Yzdatel'stvo vostochno-ukraynskoho hosudarstvennoho unyversyteta, 1998. – 126 p. 10. Zel'dovych Ya.B. Okysleneya zotapryhorenyy / Zel'dovych Ya.B., Sadovnykov P.Ya., Frank-Kamenetsky D.A. – Moscow: Yzd-vo AN SSSR, 1946. – 145 p.

Надійшла (received) 27.02.2015