

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ДВИГАТЕЛИ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

УДК 621.43:62-631.4

ПОКАЗНИКИ РОБОТИ АВТОМОБІЛЬНОГО ДВИГУНА НА БЕНЗОЕТАНОЛІ РІЗНОГО СКЛАДУ

**В.П. Мараховський, наук. співр., А.М. Авраменко, наук. співр., к.т.н.,
ІПМаш імені А.М. Підгорного НАН України, м. Харків**

Анотація. Наведено результати порівняльних стендових випробувань автомобільного двигуна з електронним блоком керування на бензині та бензоетанолі різних марок.

Ключові слова: двигун внутрішнього згорання, бензин, бензоетанол, біоетанол, економічні та екологічні показники, адаптація.

ПОКАЗАТЕЛИ РАБОТЫ АВТОМОБИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ НА БЕНЗОЭТАНОЛЕ РАЗЛИЧНОГО СОСТАВА

**В.П. Мараховский, научн. сотр., А.Н. Авраменко, научн. сотр., к.т.н.,
ИПМаш имени А.Н. Подгорного НАН Украины, г. Харьков**

Аннотация. Приведены результаты сравнительных стендовых испытаний автомобильного двигателя с электронным блоком управления на бензине и бензоэтаноле разных марок.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, бензин, бензоэтанол, биоэтанол, экономические и экологические показатели, адаптация.

PERFORMANCE INDICATORS OF THE AUTOMOBILE ENGINE USING DIFFERENT COMPOSITION OF BIOETHANOL

**V. Marakhovsky, researcher, A. Avramenko, researcher, Candidate of Technical
Science, IPMash after A. Podgorny of NAS of Ukraine, Kharkiv**

Abstract. The results of comparative bench testing of the electronically controlled automobile engine which uses gasoline and bioethanol of different brands are given.

Key words: internal combustion engine, bioethanol, economic and environmental performance, adaptation.

Вступ

Починаючи з 2014 року, бензин в Україні має вміщувати 5 % біоетанолу, а з 2016 року – не менш ніж 7 % [1]. Національним стандартом [2] вже встановлено в бензині максимальну об'ємну частку біоетанолу 5 %.

До 2020 р. в бензин, який буде продаватись в Євросоюзі, буде додаватись не менш ніж 10 % біоетанолу [3]. Вже сьогодні на ринках країн Європи та Америки наявні палива, які

містять від 10 до 95 % біоетанолу, та випускаються адаптовані до біоетанолу автомобілі [4]. В Україні у 2011 р. та 2012 р. у роздрібній торгівлі з'явилися такі види палива (у своєму складі містять біоетанол): INNOVATIV-95, А-92-е40, А-92-е40 turbo, А-95-е40, А95А, А6-92е40EXTRA, А6-95е85 EXTRA. На жаль, їх маркування не відповідає загальноприйнятому, а визначити вміст біоетанолу з марки палива не завжди можливо. Основними виробниками зазначеного палива є такі компанії як ТОВ «Техінсервіс»,

ТОВ «БІОХІМГРУП», ПП «МФ Інтеркрайт», ЗАТ «Еко-Енергія» та ін. [5].

Основні переваги застосування бензину з біоетанолом відомі [4]. Для України це, в першу чергу, зменшення імпорту світлих нафтопродуктів, зменшення викидів шкідливих речовин з відпрацьованими газами двигунів автомобілів, підйом сільгоспвиробництва, нові робочі місця та ін. Більша частина автомобілів раніше виготовлялась тільки для роботи на бензині, тому визначення показників роботи автомобільного двигуна на бензоетанолі та обрання для кожного типу двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ) найбільш ефективного складу бензоетанолу є актуальним завданням.

Аналіз публікацій

Відмінність роботи двигуна на бензоетанолі полягає у тому, що через зменшення теплотворної здатності бензоетанолу ($Q_{н.п.}$) та за рахунок зменшення теоретично необхідної кількості повітря (L_0) двигун працює на бідній суміші. Отже зменшується його номінальна потужність та максимальний крутний момент. Таким чином, для роботи двигуна на бензоетанолі електронний блок керування (ЕБК) повинен скоригувати циклову подачу палива у бік збільшення, відповідно до витрати повітря на кожному режимі роботи двигуна. А для отримання максимально ефективних показників двигуна необхідно забезпечити найбільш вигідний кут випередження запалювання паливо-повітряної суміші.

У порівняльних експериментальних дослідженнях, проведених Центром автомобільних досліджень (MnCAR) у штаті Міннесота, США, проаналізовано паливну економічність та токсичність відпрацьованих газів чотирьох легкових автомобілів, які працювали на бензоетанолі різного складу [6]. Випробування показали, що систему електронного керування кожного конкретного типу двигуна необхідно адаптувати до бензоетанолу визначеного складу тими чи іншими методами. Тільки в цьому випадку можна очікувати значного поліпшення показників двигуна.

При переведенні автомобільного двигуна на бензоетанол застосовують як апаратні, так і програмні методи адаптації, залежно від удосконаленості ЕБК двигуна. Для більш ранніх

моделей ЕБК необхідна додаткова програма керування двигуном, що працює на бензоетанолі, або коригування базової. Для більш пізніх моделей ЕБК двигуна, які комплектуються датчиком детонації з програмою вибору найбільш вигідного кута випередження на кожному режимі, можливо застосувати адаптери для роботи двигуна на бензоетанолі або додаткову програму керування паливоподачею [7].

На сьогодні майже всі відомі виробники автомобілів вже при виготовленні адаптують двигуни своїх автомобілів до бензоетанолу з низьким вмістом біоетанолу (5–15 %) (Low Blend Fuel) та виробляють автомобілі Flex Fuel, BioFlex, Tri-Flex, двигуни яких працюють і на бензоетанолі з високим вмістом біоетанолу (20–95 %) (High Blend Fuel) [7]. Програмно адаптований до бензоетанолу ЕБК двигуна сучасного автомобіля Flex Fuel за сигналом датчика, який вимірює вміст етанолу в бензоетанолі, автоматично налаштовує та коригує роботу двигуна з максимальною ефективністю.

Автомобілі з двигунами, програмно не пристосованими виробником до бензоетанолу, адаптують пристроями, які забезпечують досить ефективно його використання [8]. Основна перевага таких пристроїв полягає в тому, що вони не змінюють програми ЕБК, легко і швидко монтуються на автомобіль і також демонтуються без будь-яких наслідків. Для переведення двигуна на бензоетанол адаптер підключається послідовно між ЕБК і паливними форсунками та обирається режим його роботи відповідно до складу бензоетанолу.

Недоліки адаптерів полягають в тому, що тільки сучасні ЕБК, обладнані датчиком детонації з програмою оптимізації кута випередження запалювання суміші, можуть з ними ефективно працювати. Для всіх інших ЕБК потрібно програмно адаптувати кут випередження запалювання суміші для кожного обраного складу бензоетанолу, або обладнати ЕБК варіатором зміни кута випередження запалювання суміші [9]. Інші апаратні методи адаптування ДВЗ до роботи на бензоетанолі є індивідуальними і застосовуються вибірково. До них можна віднести заміну інжекторів з більш високою витратною характеристикою залежно від складу бензоетанолу.

Мета і постановка задачі

Метою роботи є визначення показників автомобільного ДВЗ, що працює на бензоетанолі, для вибору найбільш вигідного складу бензоетанолу та ефективного методу адаптації двигуна.

Експериментальні дослідження параметрів ДВЗ на бензоетанолі

Порівняльні випробування вітчизняного двигуна MeM3-307.1 з ЕБК, який має версію програмного забезпечення МІКАС-7.6, на бензині А-95 та бензоетанолі проводились у стендових умовах. Основні параметри технічної характеристики двигуна наведено в [10]. Загальний вигляд моторного стенда і його систем з досліджуванним двигуном показано на рис. 1.



Рис. 1. Загальний вигляд моторного стенда

Дослідні зразки бензоетанолу E20, E40, E60 та E85 було виготовлено Інститутом біоорганічної хімії та нафтохімії НАН України. Склад бензоетанолу при його приготуванні та об'ємні частки компонентів наведено в табл. 1.

Таблиця 1 Складові бензоетанолу

Марка бензоетанолу	Об'ємна частка спирту E, %	Об'ємна частка бензину, %	Октанове число за дослідницьким методом (ОЧД)*	Октанове число за моторним методом (ОЧМ)*
E20	20	80	97,5	87,5
E40	40	60	99	89
E60	60	40	100	89,9
E85	85	15	101	90,62

* Розрахункове визначення октанового числа зразків бензоетанолу проведено за розробленою методикою [11].

Для приготування бензоетанолу використовувались бензин газований стабільний А-92 та бензин А-95 у рівних об'ємних частках та компонент палива альтернативний (етанол зневоднений 99,98 %). Після виготовлення зразків бензоетанолу було проведено їх хроматографічний аналіз (табл. 2).

Таблиця 2 Результати хроматографічного аналізу бензоетанолу

Компонент	Вміст компонента у пробах, % мас.			
	E20	E40	E60	E85
Метанол	0,4	0,9	1,7	3,1
Етанол	17,4	35,2	54,2	85,0
Бензол	4,5	2,9	1,6	1,2
Толуол	6,0	4,4	2,1	1,7
Етилбензол	1,2	0,9	0,4	0,4
м-, п-ксилоли	14,4	11,0	4,0	4,4
о-ксилол	3,0	2,3	0,8	0,9
Стирол	3,2	2,5	0,8	0,9
Алкілбензоли	1,0	0,5	0,3	0,3
Сумарний вміст ароматичних вуглеводнів	33,3	24,5	10,0	9,8

Як видно із хроматографічного аналізу, вміст етанолу в бензоетанолі вкладається у значення зазначених показників E20–E85.

Враховуючи обмежену кількість кожного зразка бензоетанолу, моторні випробування було проведено на двох режимах: економічному режимі, який відповідає руху автомобіля з двигуном MeM3-307.1 зі швидкістю 90 км/год, та на режимі максимального крутного моменту. Розрахована частота обертання колінчастого вала двигуна на економічному режимі дорівнює 2800 хв⁻¹ [12]. Розраховане значення крутного моменту, що при цьому вимірюється, становить 43 Н·м [13].

При проведенні порівняльних моторних досліджень за допомогою серії ітерацій обирався оптимальний кут випередження запалювання для кожної марки бензоетанолу та режиму роботи ДВЗ, який би забезпечував ефективну роботу ДВЗ без детонації. Ні програмно, ні апаратно двигун до бензоетанолу не адаптувався. Обробка результатів випробувань двигуна проводилася відповідно до ГОСТ 14846-81 [13].

Результати досліджень та їх аналіз

На економічному режимі роботи, як видно з рис. 2, двигун на бензоетанолі E20 має показник годинної витрати палива ($G_{\text{п}}$), на 2,7 % менший порівняно з бензином А-95. А вже на бензоетанолі E40, E60 та E85 годинні витрати палива, порівняно з бензином А-95, зростають відповідно на 7; 21; 41 %. Питомі ефективні витрати палива (g) аналогічно відповідно збільшуються на 4; 19,5; 40 %, але темп їх зростання за рахунок підвищення ефективного ККД (η_e) двигуна на бензоетанолі, відносно годинних витрат, дещо загальмовується. Про кращу ефективність роботи двигуна на бензоетанолі, відносно бензину, свідчить крива питомого ефективного використання теплоти (q_e). На бензоетанолі від E20 до E85 включно зростає η_e за рахунок найбільш вигідного кута випередження запалювання (θ), повноти згоряння суміші, зменшення тепловідводу та ін. ЕБК двигуна при роботі на бензоетанолі на економічному режимі включно до E60 за сигналом датчика кисню автоматично забезпечує збільшення витрати палива, що ілюструє крива коефіці-

єнта надлишку повітря (α) (рис. 2). А вже при роботі двигуна на бензоетанолі E85 суміш збіднюється до $\alpha = 1,43$, незважаючи на збільшення годинної витрати бензоетанолу на 41 % у порівнянні з бензином А-95. Це говорить про те, що ЕБК вже не може пристосовуватись до бензоетанолу E85 з надто високим вмістом етанолу. Щоб забезпечити більшу циклову дозу палива E85 для збереження крутного моменту, необхідно збільшити кут відкриття дросельної заслінки, що збільшує ще й витрату повітря. Разом зі зменшенням теоретично необхідної кількості повітря для E85 це призводить до різкого зростання коефіцієнта надлишку повітря. Як видно з рис. 2, у всьому діапазоні використання бензоетанолу від E20 до E85 необхідно збільшувати кут випередження запалювання суміші до його оптимального значення. На жаль, ЕБК не має програми встановлення найбільш вигідного кута випередження. Датчик детонації, задіяний у ЕБК, тільки фіксує порушення роботи двигуна за наявності детонації. На рис. 3 наведено показники токсичності відпрацьованих газів двигуна МемЗ-307.1 без нейтралізатора.

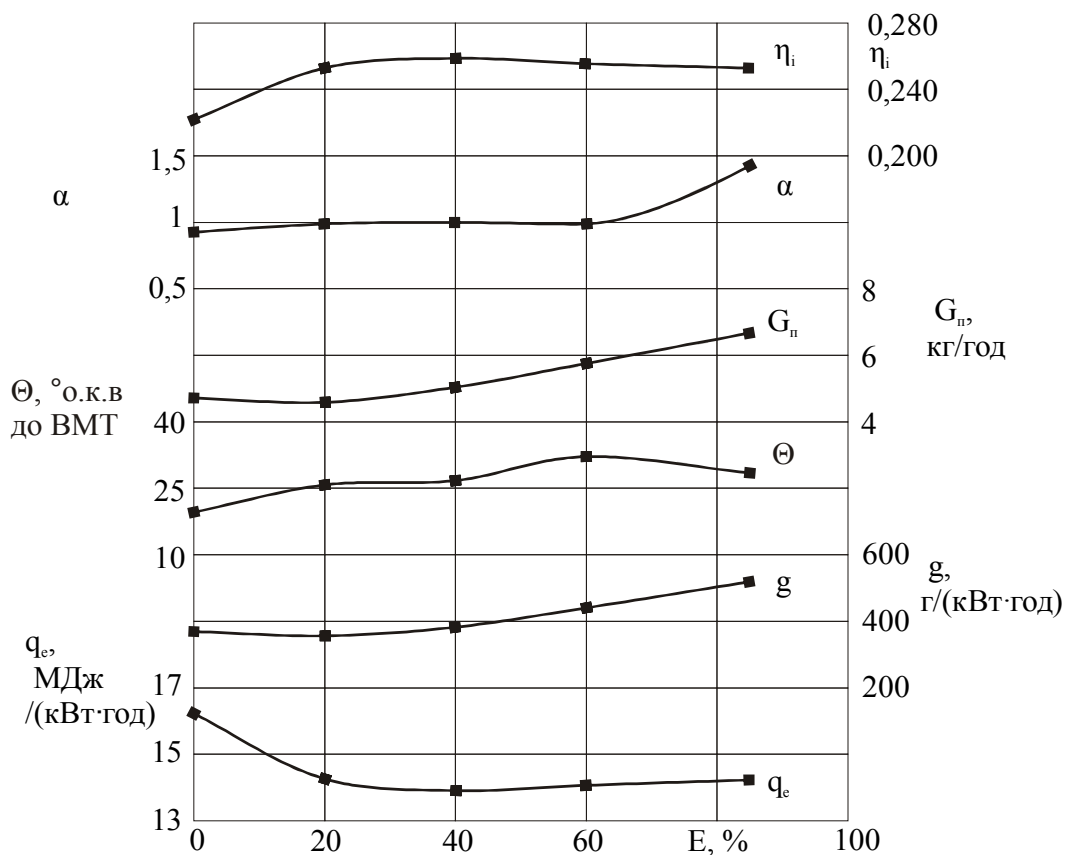


Рис. 2. Вплив складу бензоетанолу на показники (економічний режим)

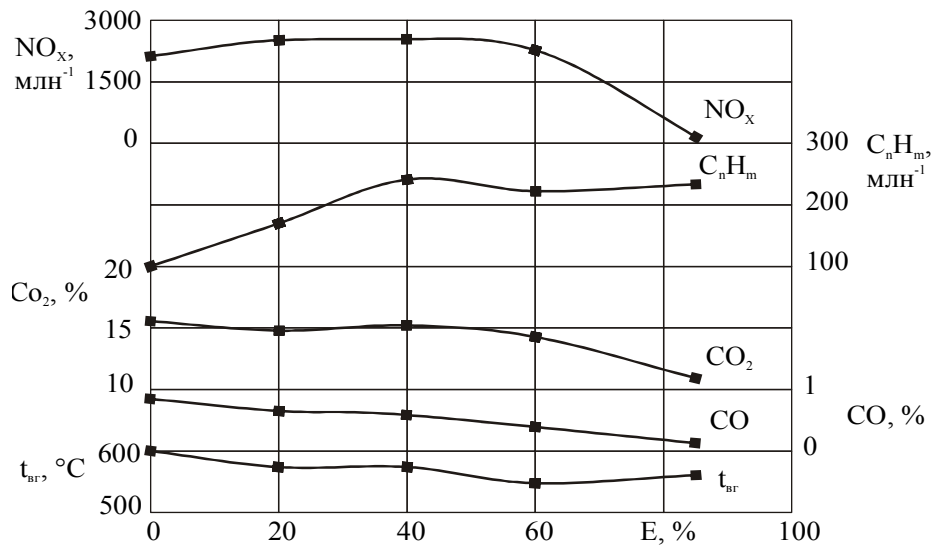


Рис. 3. Вплив складу бензоетанолу на токсичність відпрацьованих газів (економічний режим)

Концентрація монооксиду (CO) та діоксиду вуглецю (CO₂) у відпрацьованих газах при роботі двигуна на бензоетанолі зменшується, вміст вуглеводнів (C_nH_m), що не згоріли, зростає, а вміст оксидів азоту (NO_x) спочатку незначною мірою зростає, а на паливі E85 значно зменшується.

На режимі максимального крутного моменту (рис. 4) найкращі потужнісно-економічні показники двигуна MeM3-307.1 проявляються при роботі на бензоетанолі E20 та E40 у порівнянні з бензином А-95. Слід зазначити, що на паливі E20 двигун працював на штатно запрограмованому куті випередження

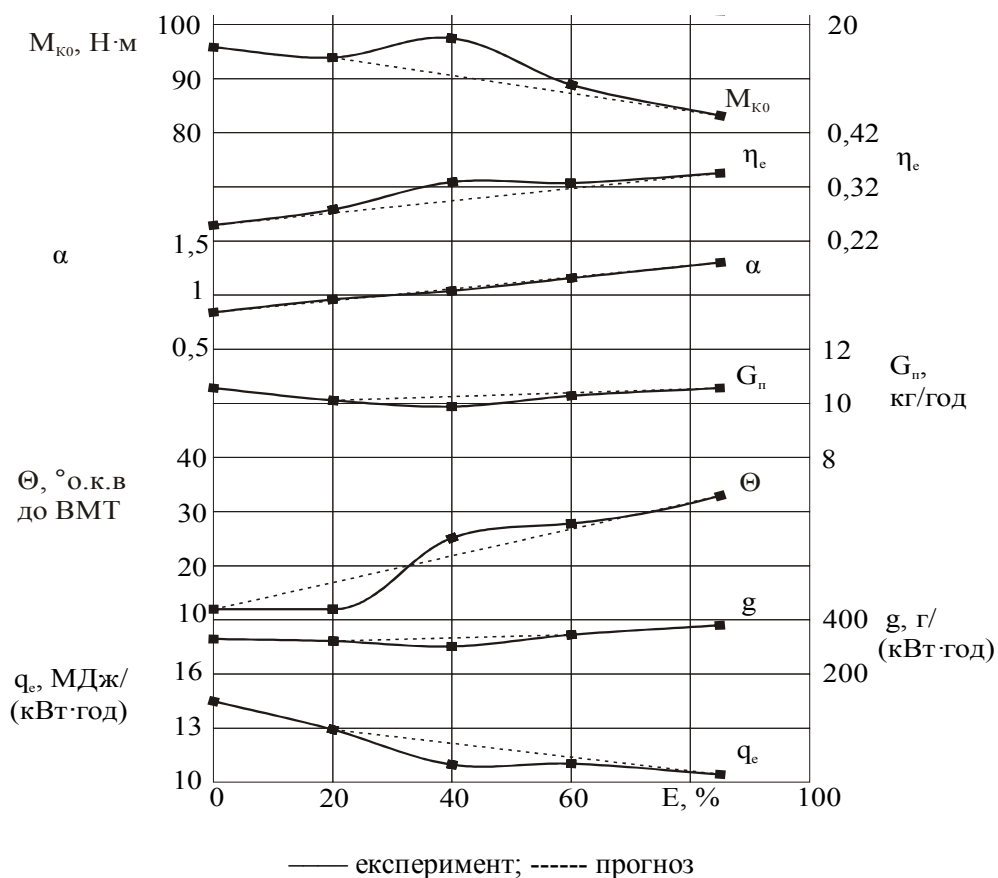


Рис. 4. Вплив складу бензоетанолу на показники (режим максимального крутного моменту $n = 3200 \text{ хв}^{-1}$)

запалювання, з коефіцієнтом надлишку повітря $\alpha = 0,96$. Незначне покращання економічності на E20 досягається тільки за рахунок підвищення η_e . Максимальний крутний момент на цих паливах знаходиться на рівні моменту на А-95, а питома ефективна витрата палива зменшується відповідно на ~ 2 та ~ 8 %.

Це пояснюється зростанням η_e за рахунок підвищення α та встановленням найвигіднішого кута випередження запалювання суміші

на E40, оскільки на E20 кут випередження залишався без змін. Як видно з рис. 4, годинні витрати палива практично не змінюються, тому що корекції циклових подач палива ЕБК за коефіцієнтом надлишку повітря за сигналом датчика кисню на цьому режимі програмно не відбувається (криві G_n та α).

Максимум на кривій (M_k) при живленні ДВЗ E40 пояснюється встановленням у ході випробувань досить вигідного, але дуже раннього кута випередження запалювання.

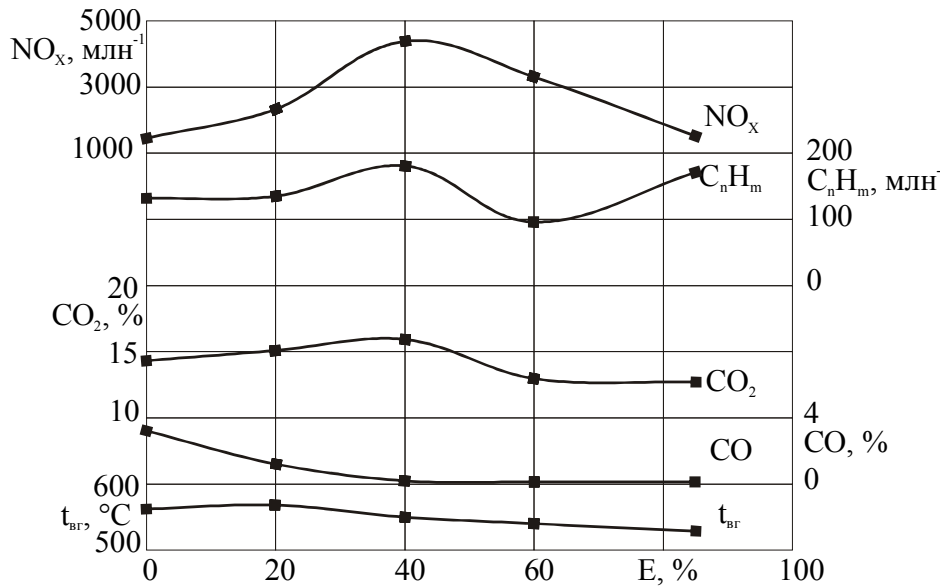


Рис. 5. Вплив складу бензоетанолу на токсичність відпрацьованих газів (режим максимального крутного моменту $n = 3200 \text{ хв}^{-1}$)

Крива (θ), оскільки ОЧД E40 становить майже 100 одиниць (табл.1) і ознак детонації на цьому паливі не спостерігається. Таким чином, прогнозований вигляд кривих за всіма показниками двигуна повинен бути близьким до показаного пунктиром на рис. 4. На бензоетанолі E60 та E85 коефіцієнт надлишку повітря (α) відповідно зростає до значень 1,15 та 1,3, а за рахунок значного зменшення теплотворної здатності бензоетанолу (крива $Q_{н.п.}$) максимальний крутний момент знижується (крива $M_{к0}$) у порівнянні з роботою на бензині А-95 (рис. 4). Як видно з рис. 5, токсичність відпрацьованих газів на режимі максимального крутного моменту при роботі двигуна на бензоетанолі підпорядковується класичній залежності. Найвищою є емісія NO_x на паливі E40, коли коефіцієнт надлишку повітря досягає рівня $\alpha = 1,05$. Рівень CO при роботі на бензоетанолі, відносно бензину, значно знижується. Поряд зі співвідношенням повітря–паливо та α на рівень токсичності

значно впливає і кут випередження запалювання суміші.

Емісія CO_2 визначається витратою палива. При більш ранньому куті запалювання підвищується емісія C_nH_m та NO_x . Рівень CO практично не залежить від кута випередження. З іншого боку, ранній кут запалювання – це підвищений крутний момент та менша витрата палива.

Висновки

Проведені дослідження показників автомобільного двигуна MeM3-307.1 на бензині А-95 та бензоетанолі без його адаптації показали, що ЕБК, маючи певні межі керування, забезпечує збільшення циклової подачі палива на економічному режимі роботи двигуна на бензоетанолі E20, E40 та E60. Ефективна робота двигуна MeM3-307.1 на економічному режимі при використанні бензоетанолу E20, E40,

E60 потребує зміни у програмі ЕБК кута випередження запалювання, а на бензоетанолі E85 – ще й у програмі паливоподачі.

Двигуни, не адаптовані до бензоетанолу, але із сучасним поколінням ЕБК зі зворотним зв'язком корекції кута випередження запалювання, можуть ефективно працювати на економічному режимі при використанні бензоетанолу до E60 включно.

На режимі максимального крутного моменту при використанні бензоетанолу необхідна адаптація двигуна за характеристикою тривалості впорскування палива і регулювання кута випередження запалювання.

В цілому робота двигуна на бензоетанолі характеризується більш високим ефективним ККД, нижчим рівнем температури та токсичності відпрацьованих газів.

Для найбільш вигідного компромісу між потужністю, економічністю двигуна та токсичністю відпрацьованих газів при використанні бензоетанолу необхідно більш складне регулювання кута випередження запалювання залежно від коефіцієнта надлишку повітря.

Література

1. Про внесення змін до деяких законів України щодо виробництва та використання моторних палив з вмістом біокомпонентів: Закон України № 4970-VI від 19 червня 2012 р. // *Голос України*. – К., 2012. – 20 липня. – № 131.
2. Бензини автомобільні підвищеної якості. Технічні умови: ДСТУ 4839:2007. – Уведено вперше; діє з 01.01.2008. – К.: Держспоживстандарт України, 2007. – 14 с.
3. Перспективы [Электронный ресурс] / Российская Биотопливная Ассоциация. – 2012 – Режим доступа: <http://www.bioethanol.ru/Legislation/Germany/prospects/>.
4. Александров А.А. Альтернативные топлива для двигателей внутреннего сгорания: монография / А.А. Александров, И.А. Архаров, В.В. Багров и др. – М.: ООО НИЦ «Инженер», 2012. – 790 с.
5. Сорокопуд В. Украина намерена производить биотопливо, а готова ли? [Электронный ресурс] / В. Сорокопуд // АПК-Информ. – 2012. – Режим доступа: <http://www.apkinform.com/ru/exclusive/topics/1006235>.
6. Optimal Ethanol Blend-Level Investigation [Электронный ресурс] // Richard E. Shockey, Ted R. Aulich, Bruce Jones, Gary Mead, Paul Steevens – 2007. – Режим доступа: http://www.ethanol.org/pdf/content_mgmt/ACE_Optimal_Ethanol_Blend_Level_Study_final_12507.pdf.
7. Fuel Economy of 2013 Flex-Fuel (E85) Vehicles [Электронный ресурс] / U.S. Department of Energy. – 2012. – Режим доступа: <http://www.fueleconomy.gov/feg/byfuel/FFV2013.html>.
8. ADAPTER E85 [Электронный ресурс] / GREEN-BUTTON ECOTECHNICS. – 2011. – Режим доступа: <http://greenbutton.org/ru/adapter-85.html>
9. Процесор кута випередження запалювання STAG-TAP-01-02 [Электронный ресурс] / АС Spotka Аксуйна. – 2011. – Режим доступа: <http://www.ac.com.pl/ru/produkt/317/tap-01>.
10. Погребной С.Н. Таврия, Таврия Нова, Славута: руководство по эксплуатации, техническому обслуживанию и ремонту / С.Н. Погребной, А.А. Владимиров, С.Ю. Петров. – М.: Издательский Дом «Третий Рим», 2008. – 256 с.
11. Мараховський В.П. Розрахунковий метод визначення октанового числа бензоетанолу / В.П. Мараховський // *Автомобильный транспорт*: сб. науч. тр. – 2011. – Вып. 28. – С. 54–57.
12. Бортницкий П.И. Тягово-скоростные качества автомобилей: справочник / П.И. Бортницкий. – К.: Вища школа, 1978. – 176 с.
13. Двигатели автомобильные. Методы стендовых испытаний: ГОСТ 14846-81. – Взамен ГОСТ 14846-69; действует с 01.01.1982. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. – 40 с.

Рецензент: Ф.І. Абрамчук, професор, д.т.н., ХНАДУ.

Стаття надійшла до редакції 27 травня 2013 р.