

УДК 621.436

## ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ДИЗЕЛЯ, ЩО ПРАЦЮЄ НА СУМІШЕВОМУ БІОДИЗЕЛЬНОМУ ПАЛИВІ

А.М. Левтеров, ст. наук. співр., к.т.н.,  
В.Д. Савицький, інженер, Інститут проблем машинобудування імені  
А.М. Підгорного НАН України, м. Харків

*Анотація.* Наведено результати розрахунково-експериментальних досліджень шляхів підвищення ефективної потужності біодизельного двигуна та визначення впливу цього підвищення на економічні й екологічні показники дизеля.

*Ключові слова:* дизельний двигун, біодизельне паливо, ефективна потужність, ефективний ККД, токсичність, характеристика.

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ДИЗЕЛЯ, РАБОТАЮЩЕГО НА СМЕСЕВОМ БИОДИЗЕЛЬНОМ ТОПЛИВЕ

А.М. Левтеров, ст. науч. сотр., к.т.н.,  
В.Д. Савицкий, инженер, Институт проблем машиностроения  
имени А.Н. Подгорного НАН Украины, г. Харьков

*Аннотация.* Приведены результаты расчетно-экспериментальных исследований путей повышения эффективной мощности биодизельного двигателя и определение влияния этого повышения на экономические и экологические показатели дизеля.

*Ключевые слова:* дизельный двигатель, биодизельное топливо, эффективная мощность, эффективный КПД, токсичность, характеристика.

## IMPROVMENT OF EFFECTIVE POWER OF THE DIESEL, ENGINE OPERATING ON MIXED BIODIESEL FUEL

A. Levterov, Sr. Researcher, Ph. D. (Eng.),  
V. Savitskyi, Eng., Institute of Problems of Mechanical Engineering after A. Podgorny  
of NAS of Ukraine, Kharkiv

*Abstract.* The results of calculation and experimental studies of ways to increase the effective power of the biodiesel engine and determine the effect of this increase on the economic and environmental performance of the diesel engine are presented in the given paper.

*Key words:* diesel engine, biodiesel fuel, effective power, effective efficiency, toxicity, characteristic.

### Вступ

Споживання нафтопродуктів буде неухильно зменшуватися через скорочення запасів нафти. На зміну традиційним паливам приходять альтернативні, які часто не лише розширюють асортимент ресурсів енергоспоживання, а й покращують екологічні характеристики енергоустановок.

До альтернативних палив належить і біопаливо, тобто паливо, отримане з біомаси різного походження. У світовій практиці розроблено основні технології виробництва біопалив, однією з яких є переестерифікація рослинних олій та тваринних жирів. Вона забезпечує виробництво біологічного палива для дизелів – одного з найрозповсюдженіших типів теплових двигунів. В ЄС та США ме-

тилові ефіри жирних кислот (FAME), ріпакової олії (PME) та соєвої олії (SOME) використовуються як альтернативні дизельні палива або у чистому вигляді, або як добавки до традиційного дизельного палива уже декілька років.

Україна робить свій внесок у вирішення проблеми заміни традиційних видів дизельного палива для автомобільного транспорту та сільгосптехніки альтернативними. Так, в Інституті біоорганічної хімії та нафтохімії НАН України (ІБОНХ НАН України) розроблено досконалу технологію виробництва біодизельного палива шляхом етанольної переестерифікації ріпакової олії [1]. Повномасштабні експериментальні дослідження моторних властивостей такого палива, а також естерів інших олій рослинного походження проведено в Інституті проблем машинобудування імені А.М. Підгорного НАН України (ІПМаш НАН України).

Отримано позитивні результати досліджень, але виявлено і деякі проблеми, однією з яких є зниження потужнісних показників за переходу з мінерального на сумішеве біодизельне паливо. Вирішенню цієї проблеми і присвячено статтю.

### Аналіз публікацій

Використання біодизельного палива на основі ріпакової та інших олій рослинного походження дозволяє не лише замінити мінеральні моторні палива альтернативними, а й покращити екологічні показники дизельних двигунів. Проте за використання сумішевого палива, в якому вміст біологічної складової перевищує 50 % за об'ємом, спостерігається помітне погіршення потужнісних показників дизеля [2].

Порівняльні експериментальні дослідження показників роботи дизеля Д21А з використанням мінерального дизельного палива та сумішевих (мінеральне + біологічне) палив різноманітного складу проводились в ІПМаш НАН України у рамках цільової комплексної програми наукових досліджень НАН України «Біопалива як паливна сировина». Основні результати стендових моторних досліджень викладено у роботі [3] і виглядають таким чином.

Використання паливних композицій, у порівнянні з використанням мінерального дизельного палива, сприяє зменшенню вмісту у відпрацьованих газах усіх без винятку шкідливих компонентів. Максимальне покращення екологічних показників спостерігається за роботи двигуна на суто біологічному паливі і становить щодо діоксиду та оксиду вуглецю відповідно 17 % та 58 %, оксидів азоту – 22 %, вуглеводнів, що не згоріли, – 36 % і димності відпрацьованих газів – 34 %.

За збільшення об'ємної частки біологічної складової у сумішевому паливі відбувалось поступове погіршення потужнісних та економічних показників дизеля. Ця тенденція призвела до зменшення номінальної ефективної потужності на 7 %, максимального крутного моменту – на 4 %, а максимального ефективного ККД – на 8 % за роботи двигуна на стовідсотковому біопаливі, у порівнянні з аналогічними його показниками на мінеральному дизельному паливі.

Досліджувались шість видів сумішевого палива за об'ємної частки біопалива від 0 до 100 % з інтервалом 20 %. Для сумішей з двадцяти- та сорокавідсотковим вмістом біологічної складової падіння номінальної ефективної потужності не перевищувало 3 %, що в експлуатації може залишитись непомітним. Та вже за 60 % біопалива в суміші зниження потужності складало майже 5 % і перевищувало 7 % для сумішевого палива без мінеральної складової.

### Мета і постановка задачі

Метою роботи є визначення шляхів підвищення ефективної потужності дизеля, що працює на сумішевому біодизельному паливі, до рівня потужності базового двигуна.

Задля досягнення зазначеної мети необхідно вирішити такі задачі:

- аналітично визначити оптимальний спосіб компенсування втрати потужності біодизельного двигуна;
- експериментально перевірити обраний спосіб;
- дослідити вплив підвищення потужності на екологічні та економічні показники двигуна, що працює на сумішевому біодизельному паливі.

Як впливає з аналізу публікацій, для пошуку шляхів підвищення ефективної потужності дизеля доцільно розглядати лише паливні композиції, в яких вміст біологічної складової перевищує 50 % за об'ємом, а також як еталон – суто мінеральне паливо. Отже, для досліджень було обрано чотири види сумішевого палива за об'ємної частки біопалива 0; 60; 80; 100 %.

#### Аналітичне визначення оптимального способу підвищення ефективної потужності біодизельного двигуна

Теоретично ефективна потужність ДВЗ є пропорційною величинам робочого об'єму, частоти обертання колінчастого вала та середнього ефективного тиску. У загальному випадку є можливість підвищення потужності ДВЗ за рахунок варіювання будь-якого з перелічених параметрів. У випадку, що розглядається, можливості підвищення потужності біодизельного двигуна обмежені наступним. Збільшення робочого об'єму двигуна означає суттєві зміни його конструкції (число та діаметр циліндрів, радіус кривошипа колінчастого вала), що не є прийнятним для досягнення поставленої мети. Збільшення номінальної частоти обертання колінчастого вала спричиняє зростання динамічних наванта-

жень на елементи кривошипно-шатунного механізму і, як наслідок, до скорочення ресурсу двигуна, що також неприпустимо. Третій чинник, що впливає на ефективну потужність двигуна, – це середній ефективний тиск, який, за незмінних перших двох, в основному залежить від енергетичного потенціалу палива, що, в свою чергу, визначається питомою теплотою його згоряння та об'ємом впорскутої в циліндр циклової дози.

Отже у випадку необхідності підвищення ефективної потужності біодизельного двигуна з трьох розглянутих варіантів найбільш прийнятним є третій, оскільки підвищити рівень середнього ефективного тиску в циліндрі двигуна можна за рахунок збільшення об'єму циклової дози палива, що в досить широких межах забезпечує паливний насос високого тиску.

Задля розрахунку величин коефіцієнтів підвищення об'єму максимальної циклової дози палива, які забезпечать компенсування втрат енергонаповнення циліндрів біодизельного двигуна, необхідно проаналізувати фізико-хімічні властивості мінерального дизельного палива, біопалива та їх сумішей обраних складів (табл. 1).

Таблиця 1 Основні фізико-хімічні властивості сумішевих палив

Об'ємна концентрація біопалива в суміші, %	0 (дизпаливо Євро)	60	80	100 (біопаливо*)
Цетанове число	51,5	–	–	~ 51
Кінематична в'язкість за температури 40 °С, мм <sup>2</sup> /с	2,71	–	–	4,16
Температура спалаху в закритому тиглі, °С	71	–	–	25 – 27
Густина за температури 15 °С, кг/м <sup>3</sup>	835	861	869	878
Стехіометричний коефіцієнт, кг/кг	14,35	13,38	13,08	12,77
Питома теплота згоряння, нижча (масова), МДж/кг	42,50	39,61	38,72	37,80
Питома теплота згоряння, нижча (об'ємна), МДж/м <sup>3</sup>	35488	34104	33648	33188

\*Показники біопалива надав ІБОНХ НАН України.

Цетанове число біодизельного палива практично дорівнює цьому показнику для нафтового дизельного палива підвищеної якості (Євро) (табл. 1), що дозволяє працювати дизельному двигуну без корекції налаштувань паливного насоса за використання паливних композицій будь-якого складу. За іншими фізико-хімічними властивостями біопаливо дещо відрізняється від товарного дизельного палива (табл. 1). Зокрема біодизельне паливо має порівняно високу густину та в'язкість, а також нижчі за ці показники для мінерального палива стехіометричний коефіцієнт та питому теплоту згоряння.

Як свідчить інформація, наведена в табл. 1, за збільшення частки біопалива в суміші знижується масова питома теплота згоряння палива (до 12,4 % для стовідсоткового біопалива), що призводить до зменшення енергонаповнення циліндрів двигуна. Втім, завдяки більш високій густині біопалива та об'ємному дозуванню палива, що впорскується в циліндри дизельного двигуна, втрати з енергонаповнення частково компенсуються. Тобто без зміни налаштувань паливного насоса високого тиску зниження енергонаповнення за роботи на суміші без мінеральної

складової дорівнює 6,93 %. Ця величина отримана шляхом порівняння об'ємної питомої теплоти згоряння дизельного палива та біопалива. Вона визначає необхідний ступінь підвищення об'ємної витрати або циклової дози сумішевого палива із вмістом біологічної складової 100 % заради досягнення двигуном потужності дизельного прототипу. Таке підвищення циклової дози палива є цілком реальним, завдяки резервним можливостям

регулювань паливного насоса. До того ж зробити це дозволяє і низьке значення стехіометричного коефіцієнта біопалива.

Розрахункові величини коефіцієнтів підвищення витрати паливних композицій із вмістом біологічної складової 60; 80; 100 % і ступінь зміни мінімального значення коефіцієнта надлишку повітря наведено в табл. 2.

Таблиця 2 Зміни налаштувальних параметрів біодизельного двигуна для досягнення ефективної потужності дизельного прототипу

Об'ємна концентрація біопалива в суміші, %	60	80	100
Коефіцієнт підвищення витрати палива	1,0406	1,0547	1,0693
Ступінь зміни мінімального значення коефіцієнта надлишку повітря	0,961	0,9481	0,9352

Практичне використання інформації, наведеної в табл. 2, полягає в наступному. За штатних налаштувань паливного насоса знімається зовнішня швидкісна характеристика для певної паливної композиції з вимірюванням витрати палива та коефіцієнта надлишку повітря на режимі номінальної потужності. Для отримання нових налаштувань необхідно застосувати відповідні коефіцієнт підвищення та ступінь зміни. Саме переналаштування здійснюється шляхом збільшення циклової подачі палива, а нове значення коефіцієнта надлишку повітря є контрольним.

### Результати експериментальних досліджень

Об'єктом досліджень було обрано дизельний двигун широкого призначення Д21А (2Ч 10,5/12), що працював на паливних композиціях, біологічна складова яких синтезована за оригінальною гомогенною технологією етанольної переестерифікації ріпакової олії у ІБОНХ НАН України. Мінеральна складова – дизельне паливо підвищеної якості (Євро) за ДСТУ 4840:2007.

Перед заходами з підвищення енергонаповнення циліндрів дизеля для кожного виду сумішевого палива, в тому числі за величини біодобавки, що дорівнює нулю (100 % нафтового палива), без зміни штатних налаштувань паливного насоса знімалась серія характеристик, в яку включено зовнішню швидкісну, три навантажувальні (за частот обертання колінчастого вала 1200; 1400; 1600 хв<sup>-1</sup>) та характеристику холостого ходу. Ця серія

складає певний умовний цикл випробувань дизеля широкого призначення.

Як впливає з наведених на рис. 1 зовнішніх швидкісних характеристик двигуна Д21А, за збільшення об'ємної частки біологічної складової ( $v_{б.п}$ ) у сумішевому паливі спостерігається зменшення номінальної ефективної потужності ( $N_{е_{ном}}$ ) та максимального крутного моменту ( $M_{к_{max}}$ ), яке для суто біологічного палива досягає відповідно 6 % та 4 %, в порівнянні з роботою на товарному дизельному паливі. Змінення зазначених показників відбувається з причини зниження енергонаповнення циліндрів двигуна, що працює на сумішевому паливі. Зниження ефективності процесу згоряння, тобто погіршення ефективного коефіцієнта корисної дії (ККД)  $\eta_e$ , за збільшення  $v_{б.п}$  ймовірніше за все пояснюється більш низькою швидкістю згоряння біопаливноповітряної суміші, у порівнянні зі швидкістю згоряння суміші нафтового палива з повітрям. Між тим погіршення ефективного ККД за роботи на номінальному режимі не є суттєвим (до 3 % для палива із вмістом біологічної складової 100 %).

Більш відчутне зниження ефективного ККД спостерігається під час роботи дизеля за навантажувальними характеристиками. Наприклад, на режимі  $n = 1400$  хв<sup>-1</sup>  $\eta_{е_{max}}$  для мінерального та стовідсоткового біопалива відрізняється на 7,5 % і не на користь останнього.

Підвищення номінальної ефективної потужності біодизельного двигуна до рівня дизель-

ного прототипу починалось з паливної композиції, в якій вміст біопродукту становить 60 %. Ця мета досягалась поступовим збільшенням енергонаповнення циліндрів шляхом підвищення максимальної циклової подачі палива насосом високого тиску до отримання потужності базового дизельного двигуна за частоти обертання колінчастого вала  $n = 1600 \text{ хв}^{-1}$ . Наступним кроком експериментальних досліджень було отримання зовнішньої швидкісної характеристики на новому налаштуванні паливного насоса.

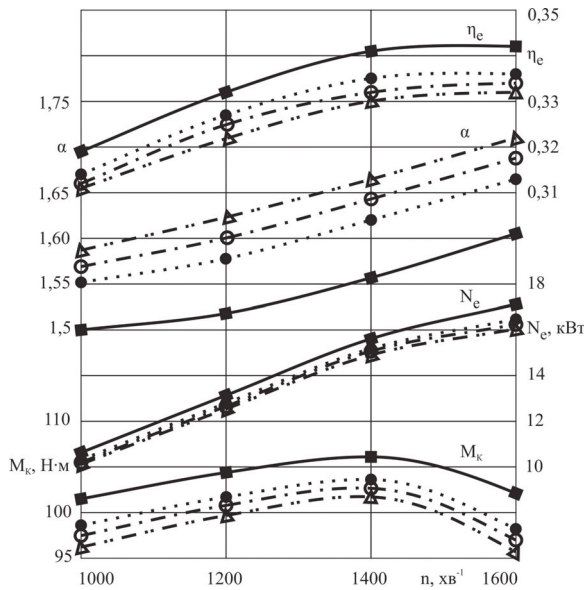


Рис. 1. Зовнішні швидкісні характеристики двигуна Д21А (штатні налаштування паливного насоса): —■— — 100 % дизпалива; .....●..... — 60 % біопалива; ---○--- — 80 % біопалива; -.-.-▲-.-.- — 100 % біопалива

Далі повторювалась аналогічна робота для сумішевих палив із вмістом біологічної складової 80 та 100 %.

Отримані зовнішні швидкісні характеристики з індивідуальним налаштуванням паливного насоса для кожного виду сумішевого палива свідчать про те, що поставленої мети було досягнуто. Для усіх досліджуваних паливних композицій, включаючи еталонну – суто мінеральне дизельне паливо, спостерігається ідентичність максимальних величин та закономірностей зміння не тільки ефективної потужності, а й крутного моменту. І лише коефіцієнт корисної дії для кожного виду сумішевого палива зберіг індивідуальні значення. Вони практично співпали з тими, що спостерігались під час отримання зовнішніх

швидкісних характеристик за штатних налаштувань паливного насоса. Таким чином, за рівності ефективної потужності відставання ефективного ККД біодизельного двигуна на номінальному режимі від  $\eta_e$  дизельного прототипу залишається тим же – близько 3 %.

Аналіз економічних показників не буде повним без надання порівняльних залежностей витрати палива від частоти обертання колінчастого вала дизеля під час максимального навантаження (зовнішні швидкісні характеристики) за штатних налаштувань паливного насоса високого тиску та підвищеної подачі сумішевого палива. Ці залежності (рис. 2) відповідають розрахункам, тобто величини зростання отриманих експериментально витрат сумішевого палива різного складу, необхідних для підвищення ефективної потужності біодизельного двигуна до рівня потужності дизельного прототипу, відрізняються від коефіцієнтів підвищення витрати палива (табл. 2) не більш як на 1 %.

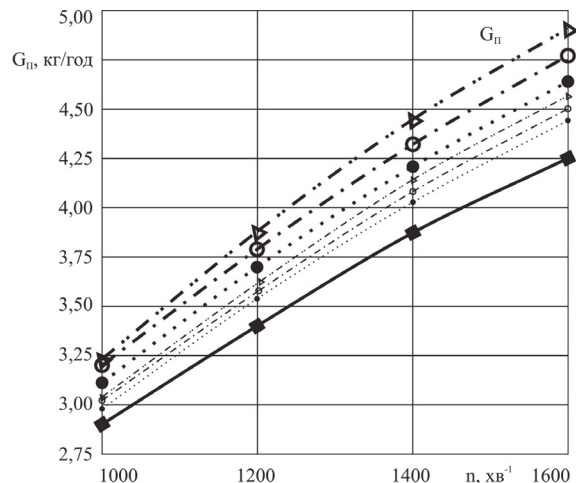


Рис. 2. Змінення витрати палива за зовнішніми швидкісними характеристиками двигуна Д21А: —■— — 100 % дизпалива; .....●..... — 60 % біопалива; ---○--- — 80 % біопалива; -.-.-▲-.-.- — 100 % біопалива; подвійна товщина ліній та розмір позначок відповідають підвищеній подачі сумішевого палива

Під час аналізу екологічних наслідків підвищення потужності дизеля, що працює на сумішевих паливах, необхідно мати на увазі, що за роботи такого двигуна без максимального навантаження забруднення довкілля шкідливими речовинами не зміниться в порівнянні з двигуном, в якому збережені штатні



налаштування паливного насоса. І тільки під час роботи за зовнішніми швидкісними характеристиками, коли до циліндрів двигуна впорскується підвищена кількість палива, очікувалось погіршення екологічних показників біодизельного двигуна, що і довели експериментальні дослідження. Так, за переходу зі штатних налаштувань паливного насоса на підвищену подачу сумішевого палива спостерігається зростання вмісту у відпрацьованих газах біодизельного двигуна оксидів азоту до 6 %, оксиду вуглецю – до 2,5 разів, вуглеводнів, що не згоріли, – до 17 %, а діоксиду вуглецю – до 7,5 % (рис. 3). Найгірше становище складається з димністю відпрацьованих газів – за роботи двигуна з підвищеною подачею палива її зростання може сягати 32 % (рис. 3). А втім, навіть під час роботи біодизельного двигуна з підвищеною подачею палива і максимальним навантаженням його екологічні показники залишаються кращими за показники дизельного прототипу (рис. 3).

Безумовно, з наведених вище причин погіршення інтегральних екологічних показників буде не таким значним, як під час роботи за зовнішніми швидкісними характеристиками. Це твердження ілюструє рис. 4, на якому наведено емісію діоксиду вуглецю, токсичних речовин та димність відпрацьованих газів, оцінені шляхом усереднення під час умовного циклу випробувань, до якого входять робота дизеля за зовнішньою швидкісною характеристикою, трьома навантажувальними та характеристиками холостого ходу для кожного виду сумішевого палива. З наведеної на рис. 4 графічної інформації видно, що за підвищення подачі палива в порівнянні з роботою на сумішевих паливах без зміни налаштувань паливного насоса відбувається зростання вмісту у відпрацьованих газах усіх без винятку шкідливих компонентів. Максимальне погіршення екологічних показників спостерігається за роботи двигуна на суто біологічному паливі і становить щодо оксидів азоту 3 %, діоксиду вуглецю – 3,5 %, димності відпрацьованих газів – 13 %, вуглеводнів, що не згоріли, – 17 % і оксиду вуглецю – 21 %. Останні два показники є дуже низкими за абсолютною величиною і не є визначальними для дизельного двигуна, а викиди вуглеводнів, що не згоріли, взагалі спостерігаються тільки за максимального навантаження. Тому цілком слушним буде висновок про те, що за зазначеного підвищення подачі

біодизельного палива погіршення екологічних показників не є критичним.

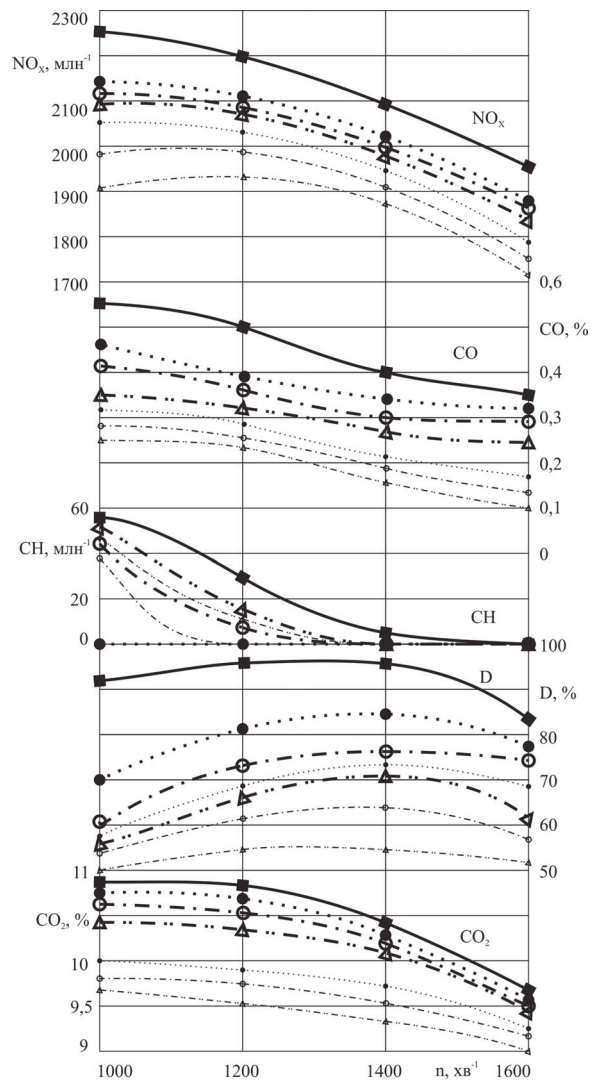


Рис. 3. Екологічні показники двигуна Д21А за зовнішніми швидкісними характеристиками: —■— — 100 % дизпалива; .....●..... — 60 % біопалива; - - - -○- - - - — 80 % біопалива; - - - -△- - - - — 100 % біопалива; подвійна товщина ліній та розмір позначок відповідають підвищеній подачі сумішевого палива

Таким чином, підвищення потужності біодизельного двигуна шляхом збільшення енергонаповнення циліндрів не призводить до суттєвого погіршення екологічних показників, які залишаються кращими за аналогічні показники дизельного прототипу щодо діоксиду та оксиду вуглецю відповідно на 12 та 45 %, оксидів азоту – на 17 %, вуглеводнів, що не згоріли, – на 24 % і димності відпрацьованих газів – на 22 %.

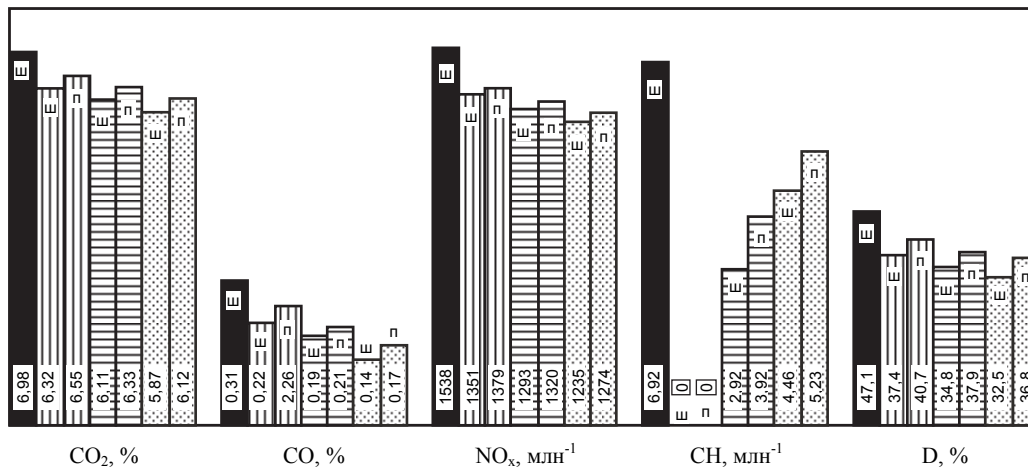


Рис. 4. Середні значення викидів діоксиду вуглецю, токсичних компонентів та димності відпрацьованих газів під час циклу випробувань двигуна Д21А для різних паливних композицій та налаштувань паливного насоса: ■ – 100 % дизпалива; ▨ – 60 % біопалива; ▩ – 80 % біопалива; ▤ – 100 % біопалива; ш – штатні налаштування паливного насоса; п – підвищена подача сумішевого палива

### Висновки

Для підвищення літрової потужності дизеля, що працює на сумішевому біодизельному паливі, обрано доступний та одночасно дуже ефективний спосіб – збільшення енергонаповнення циліндрів двигуна шляхом підвищення максимальної циклової подачі палива. Експериментальна перевірка зазначеного способу показала, що максимальні значення ефективної потужності та крутного моменту за роботи на мінеральному дизельному паливі і за використання паливних композицій різного складу з підвищеною подачею палива є ідентичними. Проте ефективний ККД біодизельного двигуна на номінальному режимі відстає від  $\eta_e$  дизельного прототипу на 3 %.

За підвищення подачі палива в порівнянні з роботою на сумішевих паливах без зміни налаштувань паливної системи відбувається погіршення усіх без винятку екологічних показників. Втім, вони залишаються кращими за аналогічні показники дизельного прототипу щодо діоксиду та оксиду вуглецю відповідно на 12 та 45 %, оксидів азоту – на 17 %, вуглеводнів, що не згоріли, – на 24 % і димності відпрацьованих газів – на 22 %.

### Література

1. Патриляк К.І. Етаноліз ріпакової олії на цеолітних каталізаторах широкого спектру кислотності / К.І. Патриляк, Ю.Г. Волошина, М.В. Охрименко, Л.К. Патриляк // Катализ и нефтехимия. – 2009. – № 17. – С. 8–11.
2. Девянин С.Н. Растительные масла и топлива на их основе для дизельных двигателей: монография / С.Н. Девянин, В.А. Марков, В.Г. Семенов. – М.: Издательский центр ФГОУ ВПО МГАУ. – 2007. – 340 с.
3. Левтеров А.М. Вивчення впливу моторних властивостей біопалива на енергоекологічні характеристики дизельного двигуна / А.М. Левтеров, В.П. Мараховський, В.Д. Савицький // Автомобильный транспорт: сб. научн. тр. – 2012. – Вып. 31. – С. 57–61.

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

Стаття надійшла до редакції 17 січня 2014 р.