

УДК 621.436

## ПОКРАЩЕННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИЗЕЛЯ, ЩО ПРАЦЮЄ НА БІОДИЗЕЛЬНИХ ПАЛИВНИХ КОМПОЗИЦІЯХ

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

*Анотація.* Наведено результати експериментальних досліджень визначених аналітично заходів налаштувального характеру щодо зниження вмісту оксидів азоту і твердих частинок у відпрацьованих газах біодизельного двигуна та визначення впливу цих заходів на потужнісні й економічні показники біодизеля.

*Ключові слова:* дизельний двигун, біодизельне паливо, токсичність, характеристика, експеримент.

## УЛУЧШЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИЗЕЛЯ, РАБОТАЮЩЕГО НА БИОДИЗЕЛЬНЫХ ТОПЛИВНЫХ КОМПОЗИЦИЯХ

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

*Аннотация.* Приведены результаты экспериментальных исследований определенных аналитически мероприятий регулировочного характера по снижению содержания оксидов азота и твердых частиц в отработавших газах биодизельного двигателя и определению влияния этих мероприятий на мощностные и экономические показатели биодизеля.

*Ключевые слова:* дизельный двигатель, биодизельное топливо, токсичность, характеристика, эксперимент.

## IMPROVEMENT OF ECOLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE DIESEL ENGINE WORKING ON BIODIESEL FUEL COMPOSITIONS

A. Levterov, Senior Researcher, Ph. D. (Eng.),  
V. Savitskyi, Engineer, Institute of Mechanical Engineering Problems  
NAS of Ukraine after A. Podhornyi, Kharkov

*Abstract.* The ways of decreasing the toxicity of exhaust gases produced by the biodiesel engine are determined analytically. Optimization of the corner of advancing the fuel supply and the coefficient of air surplus is offered as the action of adjusting character, providing the improvement of ecological indexes of the biodiesel engine.

*Key words:* the diesel engine, biodiesel fuel, toxicity, characteristic, experiment.

### Вступ

Як засвідчують наші попередні дослідження [1] та світовий досвід у галузі використання біопалив для дизелів, досягти задовільних енергетичних та економічних показників

біодизеля менш складно, аніж істотно покращити його екологічні показники. Пояснюється це тим, що розмаїття біопалив, які мають різні властивості, є причиною погіршення, або покращення складу відпрацьованих газів дизеля; особливо це стосується

вмісту в них оксидів азоту. Для визначення шляхів покращення екологічних показників біодизелів необхідно виконати великий обсяг експериментальних та розрахункових досліджень робочих процесів. Експериментальні дослідження можуть бути більш ефективними та менш витратними, якщо їх попереджувати відповідними розрахунковими дослідженнями. Але останні вкрай обмежені відсутністю теплофізичних та термодинамічних властивостей біопалив, без чого не можливе математичне моделювання процесів, що відбуваються у циліндрі біодизеля, особливо процесу згоряння палива, коли утворюються шкідливі складові продуктів згоряння.

Вміст шкідливих речовин у відпрацьованих газах (ВГ) дизеля визначається специфікою організації робочого циклу цього типу двигунів. Так, у ВГ дизеля (а надто за використання біодизельних паливних композицій) дуже мало газоподібних продуктів неповного згоряння (оксиду вуглецю та вуглеводнів, що не згоріли), що обумовлено, головним чином, роботою з великими коефіцієнтами надлишку повітря. Натомість дизель має суттєвий рівень емісії оксидів азоту, величина якого не дуже відрізняється від аналогічного показника роботи бензинового двигуна. Радикальною відзнакою дизеля від інших типів двигунів є підвищена димність відпрацьованих газів або вміст твердих частинок (насамперед сажі).

Частка оксидів азоту у сумарних токсичних викидах (за еквівалентною токсичністю) становить 60–95 % [2], решта належить переважно сажі з наявними на її поверхні канцерогенними поліциклічними ароматичними вуглеводнями, серед яких і найбільш токсичний – бенз(а)пірен. Тобто екологічність дизеля визначається в основному вмістом у його відпрацьованих газах оксидів азоту та твердих частинок (димністю).

### Аналіз публікацій

Аналіз публікацій та фундаментальні положення основ згоряння в поршневому двигуні [2, 3] дозволяють зробити висновок щодо можливих шляхів зниження утворення оксидів азоту ( $\text{NO}_x$ ): перед- та постполум'яні впливи. Передполум'яний шлях стосується заходів, що вживаються до початку процесу в камері згоряння, постполум'яний – впливає на сформовані у продуктах згоряння шкідливі речовини.

Бажане зниження кількості утвореного  $\text{NO}_x$  за передполум'яним шляхом може досягатись модифікацією процесу згоряння, яка спрямована на:

- а) зменшення пікової температури в камері згоряння;
- б) скорочення часу перебування горючої суміші в зоні пікової температури.

Модифікація за варіантом «а» досягається такими заходами:

- формуванням збіднених сумішей;
- організацією низькотемпературного згоряння (LTC));
- охолодженням повітряного заряду циліндра;
- впорскуванням води в зону згоряння;
- зволоженням повітряного заряду водяною парою;
- рециркуляцією ВГ та додатковим їх охолодженням;
- використанням водно-паливних емульсій;
- використанням паливних присадок, інертних газів, водню.

Модифікація за варіантом «б» забезпечується таким:

- збільшенням тиску в системі впорскування палива;
- обиранням моменту початку впорскування палива ближче до ВМТ та його тривалістю;
- багатостадійним впорскуванням палива;
- зміною фаз газорозподілу;
- оптимізацією конструкції інжектора.

Окрім того, змінити рівень утворення  $\text{NO}_x$  можна за рахунок варіювання ступеня стиску, геометрії камери згоряння, заміною частини вуглеводневого палива воднем або синтез-газом та застосуванням автоматичного регулювання параметрів двигуна.

Постполум'яний вплив на продукти згоряння дизеля каталітичними та хімічними методами являє собою галузь, що межує з дослідженнями процесів у ДВЗ, але безпосередньо не є предметом наших пошуків.

На жаль, до цього часу універсального методу, що контролює формування  $\text{NO}_x$  без побічних ефектів, не існує. В основі своїй всі методи погіршують чи то потужнісні та (або) економічні показники двигуна, чи то характеристики робочого циклу, що може спричинити збільшення вмісту у ВГ інших забруднювачів, наприклад, сажі.

Так, метод рециркуляції ВГ, який широко застосовується, стає менш привабливим на режимах великих навантажень двигуна або зі збільшенням коефіцієнта рециркуляції, оскільки погіршується якість згоряння. Проте одночасне застосування рециркуляції ВГ та додавання етанолу до палива дозволяє досягти зменшення рівня емісії  $\text{NO}_x$  до 88 %, але втрата паливної економічності при цьому досягає 18 % [4].

Судячи з аналізу публікацій, основна маса досліджень показників дизельних двигунів за використання як мінерального, так і біодизельного палива, виробленого з різної рослинної або тваринної сировини, для нівелювання формування  $\text{NO}_x$  спрямована здебільшого на змінення характеристик впорскування палива, застосування рециркуляції ВГ та удосконалення каталізаторів. Ці методи вважаються найбільш доступними та ефективними.

Особлива увага приділяється дослідженням змін початку та тривалості впорскування палива, ступінчастого впорскування, впорскування з підвищеним тиском подачі палива або повітря та їх впливу на робочі характеристики дизеля. Ці дослідження стосуються як експериментальних робіт, так і математичного моделювання робочого циклу дизеля, що працює на мінеральному паливі, біологічному, або на їх сумішах різного складу [5].

Очищення відпрацьованих газів дизеля від сажі та інших твердих частинок здійснюється переважно фільтрами твердих частинок (ФТЧ). При цьому тверді частинки вилучаються з потоку ВГ (відфільтровуються), накопичуються у фільтруючому елементі й утримуються у ньому до моменту відновлення функціональних властивостей ФТЧ (регенерації). Відома досить велика кількість способів нейтралізації твердих частинок у ВГ дизелів, на основі яких побудовано достатню кількість конструкцій ФТЧ, що реалізують той чи інший принцип роботи [6].

### Мета і постановка завдання

Метою досліджень біодизельного двигуна є аналітичне визначення та експериментальна перевірка шляхів покращення його екологічних показників.

Заради досягнення зазначеної мети необхідно вирішити такі задачі:

- визначення умов використання та складу паливних композицій, за яких існує потреба в покращенні екологічних показників дизеля;
- аналітичне визначення та експериментальна перевірка ефективності оптимальних способів покращення екологічних показників біодизельного двигуна;
- дослідження впливу обраних способів покращення екологічних характеристик на потужнісні та економічні показники двигуна, що працює на сумішевому біодизельному паливі.

За розгляду умов використання паливних композицій необхідно мати на увазі, що підвищення потужності біодизельного двигуна шляхом збільшення енергонаповнення циліндрів не приводить до критичного погіршення екологічних показників, які залишаються кращими за аналогічні показники дизельного прототипу [7]. Та, незважаючи на цю обставину, для запобігання погіршенню вже досягнутих високих екологічних показників таке підвищення буде доцільним лише у разі нагальної потреби і тільки у комплексі із заходами, що передбачають певне зниження викидів токсичних речовин.

Потреба у покращенні екологічних показників може виникнути не тільки за підвищення ефективної потужності біодизельного двигуна, а і за використання паливних композицій з помірним вмістом (до 60 %) біологічної складової [1]. Доцільність застосування саме таких паливних сумішей може пояснюватись, з одного боку, економічними чинниками, а з іншого – тим фактом, що за роботи дизеля на такому паливі зниження потужнісних та економічних показників не перевищує 4–5 % [1]. Таке зниження в експлуатації взагалі може залишитись непомітним. До того, за такого підходу до використання біопалива для дизельних двигунів паливний насос високого тиску не потребуватиме зміни налаштувань щодо максимальної циклової подачі палива.

Проте за роботи на сумішах із вмістом біопалива, меншим за 40 %, екологічні переваги від застосування біодизельних паливних композицій, порівняно з роботою двигуна на мінеральному дизельному паливі, практично зникають [1].

Таким чином, передбачається покращення екологічних характеристик біодизельного

двигуна шляхом зниження рівня емісії оксидів азоту та димності відпрацьованих газів для трьох видів паливних композицій за об'ємної частки біопалива 0; 40; 60 %. При цьому паливна суміш із нульовим вмістом біологічної складової (мінеральне дизельне паливо) досліджується для порівняння.

Вирішення цієї задачі певним чином ускладнюється тим, що на утворення оксидів азоту і твердих частинок справляють вплив суперечливі фактори. Тобто узгодженням параметрів дизеля неможливо отримати одночасно абсолютний мінімум як емісії оксидів азоту, так і димності ВГ. Мова може йти лише про те, щоб знайти деякий компроміс [2]. Тому виробники дизельних двигунів додержуються однієї з таких концепцій:

- а) знижувати емісію  $\text{NO}_x$  шляхом узгодження параметрів робочого циклу, а тверді частинки видаляти вже з відпрацьованих газів;
- б) зменшувати емісію твердих частинок шляхом узгодження параметрів робочого циклу, а  $\text{NO}_x$  нейтралізувати у ВГ;
- в) визнати за критерій оптимізації паливну економічність (або інший параметр), організувати робочий цикл так, щоб досягався певний локальний мінімум емісії ТЧ та  $\text{NO}_x$ , а ті частки викидів цих токсичних компонентів, що перевищують чинні норми, видаляти з ВГ [2].

Незважаючи на те, що остання концепція більш поширена, ніж перші дві, має право на існування і концепція «а», але із застереженням, що приймаються одночасно два антагоністичні критерії оптимізації – емісія  $\text{NO}_x$  та ефективний ККД. Саме такий підхід, коли за суттєвого зниження рівня емісії оксидів азоту зменшення ефективного ККД залишається прийнятним, а боротьба з димністю ВГ здійснюється за допомогою ФТЧ, пропонується нижче.

#### **Аналітичне визначення та експериментальна перевірка шляхів покращення екологічних характеристик біодизеля**

За результатами аналізу публікацій, а також попередніх розрахунків та експериментів, із наведених вище заходів із модифікації процесу згоряння заради зниження кількості  $\text{NO}_x$  у ВГ біодизельного двигуна для досліджень обрано такі:

– скорочення часу перебування горючої суміші в зоні пікової температури шляхом наближення моменту початку впорскування палива до ВМТ;

– зменшення пікової температури у камері згоряння шляхом використання збіднених паливноповітряних сумішей.

Обидва способи мають налаштувальний характер, що істотно спрощує та здешевлює їх реалізацію. Експериментальне оцінювання ефективності визначених аналітично способів, а також дослідження їх впливу на енергетичні параметри роботи біодизельного двигуна та димність ВГ проводились в умовах моторного стенда.

Об'єктом досліджень було обрано дизельний двигун широкого призначення Д21А, що працював на паливних композиціях, біологічна складова яких синтезована за оригінальною гомогенною технологією етанольної переестерифікації ріпакової олії в Інституті біоорганічної хімії та нафтохімії НАН України. Мінеральна складова – дизельне паливо підвищеної якості (Євро) за ДСТУ 4840:2007.

Крім експериментальної перевірки зазначених вище шляхів зниження кількості  $\text{NO}_x$  у ВГ біодизеля, дослідження в умовах моторного стенда мали за мету розробку відповідних заходів налаштувального характеру щодо зниження рівня емісії оксидів азоту, а саме:

- оптимізація кута випередження впорскування палива ( $\theta$ );
- оптимізація мінімальної величини коефіцієнта надлишку повітря ( $\alpha_{\min}$ ).

При цьому умовами оптимізації є досягнення суттєвого зниження рівня емісії оксидів азоту (на 50 % і більше) за прийнятного погіршення енергетичних параметрів двигуна та димності ВГ.

На першому етапі експериментальних досліджень вивчалися залежності основних показників роботи дизеля, а саме – концентрації оксидів азоту  $C_{\text{NO}_x}$  у відпрацьованих газах, середнього ефективного тиску  $p_e$ , ефективного ККД ( $\eta_e$ ) та димності відпрацьованих газів ( $D$ ), від кута випередження впорскування палива (КВВП). Ці залежності отримано за штатних налаштувань паливного насоса високого тиску, що визначають величину циклової подачі палива, на режимі максимального

го крутного моменту зовнішньої швидкісної характеристики за частоти обертання колінчастого вала  $n = 1400 \text{ хв}^{-1}$  шляхом збільшення та зменшення кута  $\theta$  відносно до оптимального за критерієм максимуму  $p_e$ .

Як впливає з графічної інформації, наведеної на рис. 1, для паливних композицій, що досліджувались, максимальним величинам середнього ефективного тиску (або крутного моменту  $M_K$ , який є прямо пропорційним до  $p_e$ ), а також ефективного ККД відповідає кут  $\theta = 21^\circ$  повороту колінчастого вала (п.к.в.) до верхньої мертвої точки (ВМТ). За зменшення зазначеного кута ( $\theta < 21^\circ$  п.к.в.) спостерігається істотне зниження рівня емісії  $\text{NO}_x$  (що і є метою даного дослідження), але за деякого підвищення димності ВГ. Перше відбувається з причини зниження максимальної температури циклу, а друге є наслідком зменшення періоду видимого згоряння.

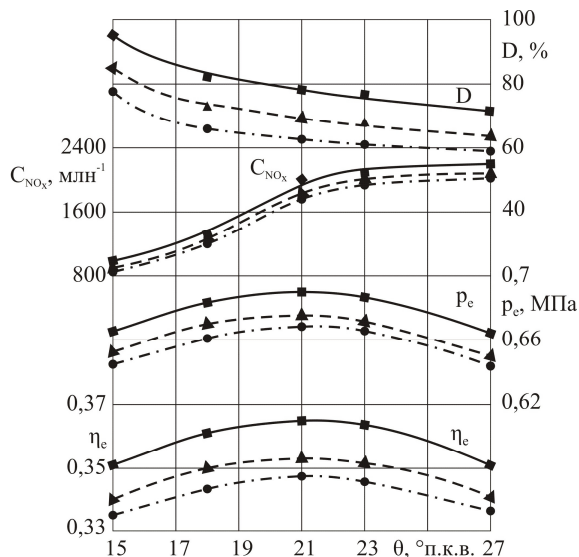


Рис. 1. Залежності основних показників роботи двигуна D21A від КВВП на режимі зовнішньої швидкісної характеристики за  $n = 1400 \text{ хв}^{-1}$ : —■— 100 % диз. палива; —▲— 40 % біопалива; —●— 60 % біопалива

Втім, вже за величини КВВП, яка дорівнює  $15^\circ$  п.к.в. до ВМТ ( $\Delta\theta = -6^\circ$  п.к.в.), було виявлено тенденцію до істотного погіршення показників роботи – зниження  $p_e$  та  $\eta_e$ , а надто підвищення димності ВГ (рис. 1). За цього значення кута  $\theta$  змінення основних показників роботи біодизельного двигуна, порівняно з роботою за штатних налаштувань  $\theta$  (або кута, що є оптимальним за критерієм максимуму крутного моменту, який дорівнює  $21^\circ$  п.к.в.), становить:

- вміст оксидів азоту у ВГ для усіх видів паливних сумішей, що досліджувались, знижується більш як на 50 %;
- потужнісні показники ( $p_e$ ) знижуються трохи більше ніж на 3 %, а економічні ( $\eta_e$ ) – менш ніж на 4 %;
- димність відпрацьованих газів підвищується майже на чверть.

Із зазначеного дещо турбує становище з димністю відпрацьованих газів, проте і воно не суперечить викладеній вище концепції «а» із застереженням. Отримані результати відповідають і умовам оптимізації кута  $\theta$ , а саме – за суттєвого зниження рівня емісії  $\text{NO}_x$  (зменшення у 2 рази) погіршення потужнісних та економічних показників є прийнятним (до 4 %). Тобто оптимальна величина КВВП становить  $\theta = 15^\circ$  п.к.в. до ВМТ, а видалення твердих частинок із ВГ може здійснюватися за допомогою відповідного фільтру з достатньою ефективністю.

Другий етап випробувань було присвячено дослідженню залежностей тих же показників роботи дизеля ( $C_{\text{NO}_x}$ ,  $p_e$ ,  $\eta_e$  та  $D$ ), що і під час оптимізації КВВП, але від коефіцієнта надлишку повітря. Ці залежності отримано на режимі номінальної ефективної потужності зовнішньої швидкісної характеристики, за частоти обертання колінчастого вала  $n = 1600 \text{ хв}^{-1}$  та штатного налаштування КВВП. Збільшення  $\alpha_{\text{min}}$  здійснювалось шляхом зниження максимальної циклової подачі палива.

Як впливає з наведених на рис. 2 зазначених залежностей, тільки один показник має екстремум у досліджуваних межах  $\alpha$  (1,54–2,7). Це ефективний ККД, що досягає максимальної величини за  $\alpha \approx 2,1$  для усіх паливних композицій, що досліджувались.

За зростання  $\alpha$  середній ефективний тиск плавно знижується (рис. 2), що легко пояснюється зменшенням циклової подачі палива (або енергонаповнення циліндрів двигуна).

Щодо залежностей димності та вмісту у ВГ оксидів азоту, то тут, на відміну від зазначеної у [2] (з посиланням на авторитетних дослідників) антагоністичності цих показників, за підвищення коефіцієнта надлишку повітря спостерігається їх одночасне зниження. Додає унікальності стану та обставина, що в інтервалі  $\alpha$  від такої величини, яка відповідає

штатним налаштуванням максимальної циклової подачі палива, до  $\alpha \approx 2,1$  підвищується ефективний ККД (рис. 2).

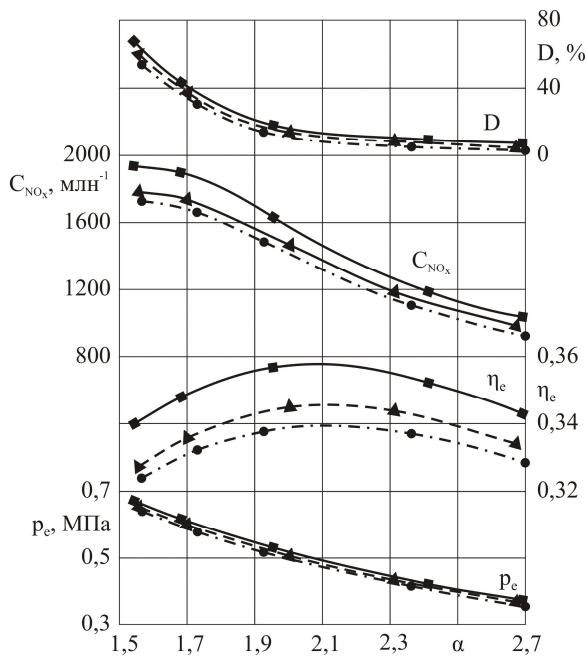


Рис. 2. Залежності основних показників роботи двигуна Д21А від коефіцієнта надлишку повітря на режимі зовнішньої швидкісної характеристики за  $n = 1600 \text{ хв}^{-1}$ : —■— 100 % диз. палива; —▲— 40 % біопалива; —●— 60 % біопалива

Димність відпрацьованих газів дуже істотно знижується навіть за невеликого підвищення  $\alpha$ . Так, за переходу з  $\alpha = 1,54$  на  $\alpha = 2,05$ , що відповідає зниженню  $p_e$  на 25 %, димність ВГ зменшується на 80 % (рис. 2). Подальше зниження  $D$  за зростання  $\alpha$  відбувається менш інтенсивно. Такий характер залежності димності ВГ від  $\alpha$  пояснюється покращенням якості сумішоутворення з підвищеним надлишком повітря.

Ситуація з рівнем емісії оксидів азоту залежно від  $\alpha$  радикально відрізняється від описаної вище. За незначного підвищення коефіцієнта надлишку повітря відбувається дуже повільне зниження вмісту оксидів азоту у ВГ, і тільки за  $\alpha > 1,8-1,85$  (або  $p_e < 80-85 \%$  від  $p_{e_{max}}$ ) інтенсивність зниження  $C_{NO_x}$  дещо зростає (рис. 2). Неістотне зниження рівня емісії оксидів азоту на режимі високих навантажень двигуна пояснюється тим, що основна маса  $NO_x$  утворюється протягом невеликого проміжку часу в першій фазі згоряння – періоді затримки займання (ПЗЗ) [2].

Тому за сталої витрати повітря підвищення подачі палива за межами ПЗЗ відносно слабо впливає на утворення  $NO_x$ . Подальше зниження рівня емісії оксидів азоту відповідає характеру зміни максимальної температури циклу зі зростанням  $\alpha$  та залишається доволі повільним. Тому зниження  $C_{NO_x}$ , наприклад, на 50 %, досягається за  $\alpha > 3$ , а зменшення  $p_e$  при цьому становить більш як 50 %, що навряд чи можна вважати прийнятним.

Зважаючи на неможливість досягнення істотного зменшення рівня емісії оксидів азоту без великих втрат середнього ефективного тиску, оптимізація мінімальної величини коефіцієнта надлишку повітря не може розглядатися як самостійний захід. Її, за невеликого зниження  $C_{NO_x}$  та істотного зменшення димності ВГ, можна використовувати сукупно з іншими заходами, наприклад, з оптимізацією кута  $\theta$ .

Досліджувались два варіанти оптимізації  $\alpha_{min}$ , які відрізняються величиною критерію оптимізації ( $C_{NO_x}$ ). За варіантом I зниження концентрації оксидів азоту у ВГ становить 5 %, а за варіантом II – 25 % від величини  $C_{NO_x}$ , яка спостерігається за штатних налаштувань максимальної циклової подачі палива (або  $\alpha_{min}$ ). Оптимальні величини  $\alpha_{min}$  для варіантів I та II складають відповідно 1,75 і 2,1. Відносні зміни основних показників роботи дизеля в середньому для усіх паливних композицій, що досліджувались (відмінність між відносними змінами відповідних показників для різних композицій не перевищує 1,5 %), після оптимізації КВВП, оптимізації  $\alpha_{min}$  за варіантами I та II, а також за цими варіантами сукупно з оптимізацією КВВП наведено у табл. 1.

Інформація, наведена у табл. 1, підтверджує зазначене вище, а саме те, що обидва варіанти оптимізації  $\alpha_{min}$  не можна розглядати як самостійні заходи зниження рівня емісії оксидів азоту. Проте використання варіанта I оптимізації  $\alpha_{min}$  сукупно з оптимізацією кута  $\theta$  знижує вміст  $NO_x$  у ВГ на 53 %, тобто більш ніж у 2 рази, за практично незмінного ефективного ККД (-1 %), та спричиняє зниження  $p_e$  і димності ВГ відповідно на 14 % і 36 %. За такого підходу зміни основних показників роботи двигуна можна вважати прийнятними, за виключенням знижен-

ня димності ВГ, що є недостатнім. Тому тверді частинки потрібно видаляти з відпрацьованих газів за допомогою спеціальних засобів, наприклад, фільтра.

Таблиця 1 Відносні зміни основних показників роботи дизеля

| Варіант оптимізації   | Відносні зміни основних показників роботи дизеля, % |     |       |          |
|---|---|-----|-------|----------|
|   | $C_{NO_x}$  | $D$ | $p_e$ | $\eta_e$ |
| Оптимізація КВВП  | -51   | +23 | -3    | -4       |
| Варіант I оптимізації $\alpha_{min}$                              | -5  | -48 | -11   | +3       |
| Варіант II оптимізації $\alpha_{min}$                             | -25   | -82 | -27   | +5       |
| Варіант I оптимізації $\alpha_{min}$ сукупно з оптимізацією КВВП  | -53   | -36 | -14   | -1       |
| Варіант II оптимізації $\alpha_{min}$ сукупно з оптимізацією КВВП | -63   | -78 | -29   | +1       |

Дуже привабливим є сукупне використання варіанта II оптимізації  $\alpha_{min}$  та оптимізації КВВП, яке за практично незмінного ефективного ККД (+1 %) забезпечує зниження емісії  $NO_x$  на 63 %, а димності ВГ – на 78 %, тобто у 4,5 рази (табл. 1). Величина останнього показника надає змогу відмовитись від додаткового очищення ВГ спеціальними засобами. Єдиним, проте доволі істотним, недоліком такого поєднання заходів є зниження потужнісного показника ( $p_e$ ) на 29 %. Тому використання такого комплексного заходу може бути виправданим за нагальної потреби в істотному зниженні токсичності ВГ, наприклад, за роботи у закритих приміщеннях з обмеженою вентиляцією, або під час зміни режиму роботи транспортного засобу із замського на міський. А це саме та ситуація, що нагадує про існування терміну «дворівневий двигун», який в дещо іншій інтерпретації наведено у праці [2]. У нашому випадку за електронного керування двигуном водій перемикачем може свідомо змінити налаштування максимальної циклової подачі палива (або  $\alpha_{min}$ ) та кута  $\theta$  і тим самим обмежити потужність, але забезпечити істотне зниження вмісту шкідливих речовин у відпрацьованих газах.

Таким чином, розроблені заходи налаштувального характеру, а саме – оптимізація кута випередження впорскування палива або (та) коефіцієнта надлишку повітря, мають знач-

ний потенціал щодо покращення екологічних характеристик за прийняттого зниження енергетичних показників біодизеля.

## Висновки

Експериментальні дослідження визначених аналітично шляхів зниження вмісту оксидів азоту у ВГ біодизельного двигуна показали, що найбільш ефективними виявились такі заходи налаштувального характеру:

а) оптимізація кута випередження впорскування палива, завдяки якій вміст оксидів азоту у ВГ зменшується на 51 %, за зниження потужнісних показників на 3 % та економічних – на 4 % і підвищення димності на 23 %. Для істотного зниження останнього показника необхідно застосовувати ефективні засоби очистки відпрацьованих газів від твердих частинок;

б) оптимізація КВВП сукупно з варіантом I оптимізації мінімальної величини коефіцієнта надлишку повітря, що знижує емісію  $NO_x$  на 53 % за практично незмінного ефективного ККД та зниження середнього ефективного тиску і димності ВГ відповідно на 14 і 36 %. Величина останнього показника свідчить про необхідність додаткового очищення ВГ за допомогою спеціальних засобів;

в) сукупне застосування оптимізації КВВП з варіантом II оптимізації  $\alpha_{min}$ , яке за практично незмінного ефективного ККД забезпечує зниження концентрації оксидів азоту у відпрацьованих газах на 63 %, а їх димності – на 78 %, що дозволяє відмовитись від додаткового очищення ВГ спеціальними засобами. Недоліком такого поєднання заходів є зниження середнього ефективного тиску (або номінальної потужності) на 29 %, що може бути виправданим за нагальної потреби в істотному зниженні токсичності ВГ, або за створення «дворівневого двигуна».

Запропоновані заходи щодо покращення екологічних показників біодизельного двигуна є універсальними та можуть використовуватися і для дизеля, що працює на мінеральному паливі.

## Література

1. Левтеров А.М. Вивчення впливу моторних властивостей біопалива на енергоеколо-

- гічні характеристики дизельного двигуна / А.М. Левтеров, В.П. Мараховський, В.Д. Савицький // Автомобильный транспорт: сб. науч. тр. – 2012. – Вып. 31. – С. 57–61.
2. Марков В.А. Токсичность отработавших газов дизелей / В.А. Марков, Р.М. Баширов, И.И. Габитов. – М.: Изд МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 376 с.
  3. Heywood J.B. *Internal Combustion Engine Fundamental* / J.B. Heywood. – New York: McGraw-Hill, 1988. – 930 p.
  4. Hebbar G.S. Control of NO<sub>x</sub> from a DI diesel engine with hot EGR and ethanol fumigation: an experimental investigation Find out how to access preview-only content / G.S. Hebbar, A.K. Bhat // *International Journal of Automotive Technology*. – 2013. – Vol. 14. – P. 333–341.
  5. Tat M.E. Fuel Property Effects on Injection Timing, Ignition Timing, and Oxides of Nitrogen Emissions from Biodiesel-Fueled Engines / M.E. Tat, J.H. Van Gerpen, P.S. Wang // *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. – 2007. – Vol. 50, № 4. – P. 1123–1128.
  6. Строков А.П. Современные методы очистки отработавших газов дизелей от твердых частиц / А.П. Строков, А.Н. Кондратенко // *Двигатели внутреннего сгорания*. – 2010. – № 2. – С. 99–104.
  7. Левтеров А.М. Підвищення ефективної потужності дизеля, що працює на сумішевому біодизельному паливі / А.М. Левтеров, В.Д. Савицький // *Автомобильный транспорт: сб. науч. тр.* – 2014. – Вып. 34. – С. 32–38.
  - ecological characteristics of the diesel engine.] *Avtomobilnyi transport: sb. nauch. tr.*, 2012, Vol. 31. pp. 57–61.
  2. Markov V.A., Bashirov R.M. and Gabitov I.I. *Toksichnost otrabotavshih gazov dizele*. [Toxicity of the fulfilled gases of diesel engines.]. Moscow, Izd MGТУ im. N.E. Bauman Publ., 2002. 376 p.
  3. Heywood J.B. *Internal Combustion Engine Fundamental*. New York, McGraw-Hill Publ., 1988. 930 p.
  4. Hebbar G.S. and A.K. Bhat Control of NO<sub>x</sub> from a DI diesel engine with hot EGR and ethanol fumigation: an experimental investigation Find out how to access preview-only content *International Journal of Automotive Technology*, 2013, Vol. 14. pp. 333–341.
  5. Tat M.E., J.H. Van Gerpen and P.S. Wang Fuel Property Effects on Injection Timing, Ignition Timing, and Oxides of Nitrogen Emissions from Biodiesel-Fueled Engines *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 2007, Vol. 50, no. 4. pp. 1123–1128.
  6. Stokov A.P., Kondratenko A.N. *Sovremenyie metodyi ochistki otrabotavshih gazov dizeley ot tverdyyih chastits* [Modern methods of clearing of the fulfilled gases of diesel engines from solid particles]. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya*, 2010, no. 2. pp. 99–104.
  7. Lyevtyerov A.M., Savyts'kyi V.D. *Pidvyshchennya efektyvnoyi potuzhnosti dyzelya, shcho pratsyuye na sumishevomu biodyzel'nomu palyvi* [Increase of effective power of the diesel engine working on mix biodiesel fuel]. *Avtomobilnyi transport: sb. nauch. tr.*, 2014, Vol. 34. pp. 32–38.

### References

1. Lyevtyerov A.M., Marakhovs'kyi V.P. and Savyts'kyi V.D. *Vyvchennya vplyvu motornykh vlastyvostrych biopalyva na enerhoekolohichni kharakterystyky dyzel'noho dvyhuna* [Studying influence of motor properties of biofuel on energy-

Рецензент: О.М. Врублевський, професор, д.т.н., ХНАДУ.

Стаття надійшла до редакції 27 квітня 2015 р.