

## Покращення хімотологічних властивостей дизельного палива мікродобавкою вуглецевих сфероїдальних наночастинок

Є.В. Полункін<sup>1</sup>, В.С. Пилявський<sup>1</sup>, Я.О. Березницький<sup>1</sup>,  
Т.М. Каменєва<sup>1</sup>, А.М. Левтеров<sup>2</sup>, А.М. Авраменко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Інститут біоорганічної хімії та нафтохімії ім. В.П. Кухаря НАН України  
Україна, 02160, Київ, Харківське шосе, 50, тел./факс: (044) 292-30-88, E-mail: polunkin@i.ua

<sup>2</sup>Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України  
Україна, 610000, Харків, вул. Пожарського, 2/10, тел.: (057) 349-47-02, E-mail: levterov@nas.gov.ua

Роботу присвячено виявленню впливу мікрокількісних добавок вуглецевих сфероїдальних нанорозмірних частинок на експлуатаційні властивості дизельного палива при згорянні в двигунах. Наноматеріали отримували методом високочастотного розрядно-імпульсного синтезу на вольфрамових електродах з використанням у якості вихідної сировини вуглеводневих газів. Продукт синтезу модифікували бромом, потім проводили екстракцію в різних розчинниках та відфільтровували. Середній розмір бромованих сфероїдальних наноматеріалів після екстракції в етанолі складав 5–15 нм. Дослідження дії добавки синтезованих наночастинок до палива на експлуатаційні показники роботи двигунів проводили на моторному стенді з дизельним двигуном 1Ч 8.5/11 при роботі на стандартному дизельному паливі та паливі з добавкою присадки різної концентрації при наступних режимах: навантаження  $N_e = 3$  кВт, частота обертання колінчастого валу двигуна  $n = 1300$  хв<sup>-1</sup>. Основними експериментальними характеристиками оцінки впливу добавок до палива на досконалість робочого процесу в циліндрах дизельного двигуна було обрано витрати палива (питомі та годинні) та ефективний коефіцієнт корисної дії (ККД). Згідно отриманих результатів при додаванні в паливо мікрокількісних доз синтезованих наноматеріалів витрати палива зменшились на 6–10 % і, відповідно, збільшився ефективний ККД у порівнянні з аналогічними показниками при роботі двигуна в такому ж режимі на паливі без добавки. Проведено аналіз процесу згоряння палива в двигуні за методом розгорнутих індикаторних діаграм та показано, що дія добавки синтезованих наночастинок на економічність використання палива в двигуні обумовлена зміною ступеня перетворення енергії згоряння компонентів палива в теплову енергію.

**Ключові слова:** двигуни внутрішнього згоряння, дизельне паливо, добавки до палив, вуглецеві наночастинок

### Вступ

Більше половини нафти, яка видобувається в світі, йде на виробництво моторних палив. В Україні за рік споживається до 10 млн тонн автомобільних та авіаційних моторних палив, основна частка їх імпортується, що коштує понад 10 млрд доларів США. Зменшення витрат моторних палив хоча б на 10 відсотків збереже для України більше 1 млрд доларів США в рік.

В двигунах внутрішнього згоряння (ДВЗ) ефективний коефіцієнт корисної дії не перевищує 25 % у бензинових і 40 % у дизельних двигунів, в сучасних турбодизельних двигунах цей показник може досягати 50–55 % [1, 2]. Таким чином, понад 50 % енергії палив в більшості двигунів витрачається даремно.

Одним з важливих факторів, які впливають на ефективність використання енергії в двигунах, є **повнота згоряння** палива. Під неповним згорянням інколи розуміють, що деяка частина палива в камері

згоряння двигуна зовсім не реагує з киснем та викидається назовні без будь-яких хімічних перетворень.

Але для оцінки повноти трансформації енергії згоряння палива (ЕЗП) в механічну роботу двигунів внутрішнього згоряння треба враховувати не тільки відсоткову долю палива, яке взагалі було задіяно в реакції з киснем, а і глибину хімічних перетворень при таких процесах.

Відомо [3, 4], що виділення енергії в двигунах складається з ряду послідовних хімічних реакцій взаємодії компонентів палива з киснем. Тому повне протікання процесу окиснення в хімічному плані являє собою глибоке перетворення реагентів до кінцевих нетоксичних продуктів – діоксиду вуглецю CO<sub>2</sub> та води.

Під час процесу горіння в режимі неповного окиснення (зокрема, при недостатній кількості кисню

або при нестачі часу для завершення хімічних реакцій) утворюються оксид вуглецю CO та проміжні продукти перетворень палива (спирти, альдегіди, кислоти, поліконденсовані сполуки і сажа) [5, 6]. Внаслідок неповного (часткового) окиснення палива при роботі двигунів внутрішнього згоряння поряд зі зменшенням ЕЗП збільшується кількість токсичних продуктів у відпрацьованих газах. Ці викиди є головною причиною забруднення атмосферного повітря в багатонаселених містах. При спалюванні однієї тони моторних палив в автомобільних двигунах в атмосферу потрапляє до 100 кг шкідливих продуктів неповного окиснення [7].

В сучасних умовах для України найбільш прийнятним шляхом зменшення споживання автомобільних та авіаційних моторних палив є підвищення їх енергоефективності за рахунок нових присадок, які сприяють оптимізації процесу горіння та поглибленню окиснення компонентів палив в двигунах.

Унікальні фізико-хімічні властивості вуглецевих наночастинок різної будови дали змогу створити ряд нових матеріалів, в тому числі й присадок до паливно-мастильних матеріалів (ПММ), антифрикційних та антизадирних присадок до мастил та олів. Існує ряд патентів по використанню фулеренів та їх похідних в якості присадок до ПММ.

В роботах [10-12] наведено спроби використання деяких алотропних модифікацій вуглецю (фулерен, нанотрубки та нанолісти) як присадок до дизельних палив.

Раніше в роботах [8, 9] нами було показано, що мікродобавками (близько  $10^{-2}$  % мас.) вуглецевих сфероїдальних нанорозмірних частинок (ВСНЧ) можна підвищити потужність, зменшити витрати палива та покращити екологічні характеристики при роботі бензинових двигунів на етанолвмісних бензинах.

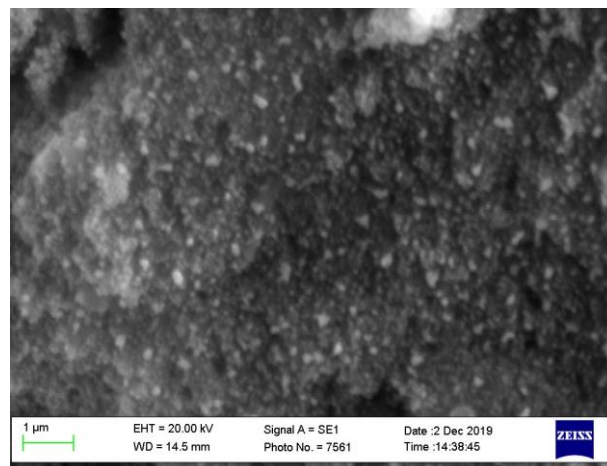
Метою цієї роботи є встановлення можливості підвищення енергії згоряння вуглеводневого дизельного палива шляхом його модифікації карбоновими сфероїдальними наночастинами.

#### *Матеріали та методи дослідження*

Для синтезу цільових нанорозмірних добавок до моторного палива як базовий прекурсор було обрано алотропну форму вуглецевих матеріалів з особливими структурними та електронними властивостями – карбонові сфероїдальні наночастинок [10]. Ці частинки являють собою полішаруваті концентричні графеноподібні пелюстки, які крім шестичленних вміщують також п'ятичленні цикли вуглецю в стані  $sp^2$ - $sp^3$ -гібридації.

Вихідний наноматеріал отримували методом височастотного розрядно-імпульсного синтезу на вольфрамових електродах з використанням у якості вихідної сировини вуглеводневих газів (пропан-бутанова суміш) [15, 16].

Згідно електронної мікроскопії (методи СЕМ і ТЕМ), синтезовані таким чином вихідні карбонові наночастинок мали сферичну будову, діаметри окремих частинок знаходились в інтервалі 5–40 нм (рис. 1).



**Рис. 1.** Електронномікроскопічне зображення вихідних синтезованих зразків багатошарових карбонових наносфер (електронний мікроскоп JEM-2100F при напрузі 20 kV)

Після виділення з продукту синтезу карбонових сфероїдальних наночастинок для покращення їх розчинності та підвищення здатності до поляризації проводили поверхневе модифікування наноматеріалу бромом за методикою [8].

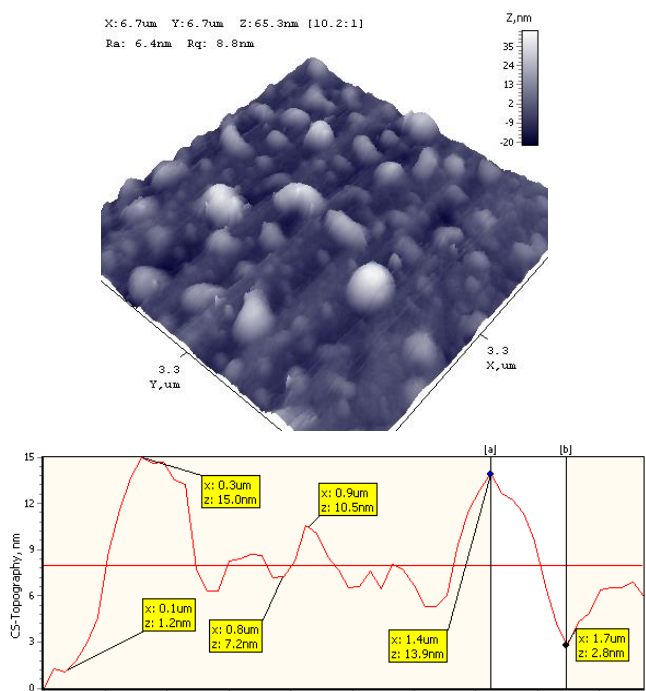
Отриманий нанопорошок фракціонували екстракцією в різних розчинниках (гексан, бензол, толуол, етанол, N-метил-2-піролідон). Процес екстрагування проводили витримуванням при різних температурних умовах протягом встановленого експериментально часу.

Фільтрацію отриманих екстрактів проводили крізь фільтри з різним діаметром пор (до 400 нм). Топографію поверхні порошків отриманих наноматеріалів, особливості асоціації окремих наночастинок в агрегати різних розмірів було досліджено методами електронної та атомно-силової мікроскопії.

Середній розмір сфероїдальних наноматеріалів після екстракції за результатами атомно-силової мікроскопії складав 10–15 нм (рис. 2).

В роботі [17] детально досліджено особливості будови таких наноматеріалів, наведено їх рентгєнівські дифрактограми і спектри комбінаційного розсіювання (КР). Проведено чисельний аналіз структурних і спектральних даних в інтервалах фундаментальних D і G смуг і смуг 2-го порядку з їх розкладанням на спектральні компоненти. Встановлено наявність в ВСНЧ графіто- і алмазоподібних станів вуглецю, а також існування делокалізованої електронної щільності (ЕЩ) і розподілення її близько атомів С.

Вплив добавки синтезованих бромованих наночастинок до палива на експлуатаційні показники роботи двигунів вивчали на моторному стенді зі стаціонарним дизельним двигуном широкого призначення (ІЧ 8.5/11) при роботі на стандартному дизельному паливі та паливі модифікованому добавками різної концентрації на наступних режимах: навантаження  $N_e = 3$  кВт, частота обертання колінчастого валу двигуна  $n = 1300$  хв<sup>-1</sup>.



**Рис. 2.** АСМ-зображення поверхні скла з нанесеними зразками бромованих наночастинок (екстрагованих етанолом) і переріз, проведений через вершини частинок

Методика порівняльних експериментальних досліджень передбачала роботу двигуна при фіксованій потужності та частоті обертання колінчастого валу, а критерієм ефективності модифікації палива наночастинами була питома витрата палива (г/кВт·год), яка визначає рівень ефективного ККД двигуна.

Дизельне паливо при всьому циклі випробувань використовували з однієї партії, характеристики палива було підтверджено сертифікатом відповідності (ДСТУ 4840:2007. Паливо дизельне підвищеної якості).

Програма випробувань виконувалась таким чином. При штатному налаштуванні системи керування двигуном та роботі на стандартному дизельному паливі без добавки присадки реєстрували такі показники:

- ефективна потужність,  $N_e$ ;
- крутний момент,  $M_k$ ;
- годинні  $G_T$  та питомі  $g_e$  витрати палива на вибраному режимі навантаження.

Ефективний ККД,  $\eta_e$  розраховували за наступною формулою:

$$\eta_e = 3600 N_e / G_T Q_n,$$

де  $Q_n$  – нижча теплота згоряння палива, для дизельного палива  $Q_n$  дорівнює 43500 кДж/кг.

Вибрані умови налаштування дозволяють отримувати оптимальні показники робочого двигуна по потужності, крутному моменту та економічності.

Після першого етапу досліджень без змін налаштування системи керування двигуном проводили випробування роботи двигуна з реєстрацією відповідних показників при використанні палива з різним вмістом ВСНЧ.

### Результати та їх обговорення

Для дослідження зміни енергоефективності дизельного палива при додаванні ВСНЧ використовували метод індикаторних діаграм. Вимірювання зміни робочого тиску відбувалось наступним чином.

Сигнал від датчика тиску після підсилення та фільтрації передавався на дослідницький аналогово-цифровий перетворювач (АЦП) марки Е14-140 та дали на персональний комп'ютер.

У роботі для індичіювання використовувався датчик тиску тензометричного типу. Для реєстрації сигналів з високою точністю датчик повинен мати високу частоту власних коливань. Робочу частоту власних коливань чутливого елемента датчика обирають так, щоб вона перевищувала частоту гармонік найвищого порядку при індичіюванні.

Верхня межа полоси частот, яку повинен пропускати датчик для чотиритактного двигуна [14]:

$$f = \frac{150 \cdot n}{120},$$

де  $n$  – частота обертання колінчастого валу ( $\text{хв}^{-1}$ ).

Таким чином, для досліджуваного дизельного двигуна, при  $n = 1300 \text{ хв}^{-1}$  маємо:

$$f = \frac{150 \cdot 1300}{120} = 1625 \text{ Гц}$$

Частота власних коливань датчика повинна бути не нижче 10 – 20 кГц. У проведеному дослідженні для каналів АЦП частота дискретизації обиралася рівною 20 кГц.

Оскільки є гідравлічний опір у індикаторному каналі, то утворюється різниця тисків у циліндрі двигуна та біля чутливого елемента датчика. Це вносить похибку у вимірювання тиску.

Величина різниці тисків залежить від довжини індикаторного каналу, площі, частоти обертання колінчастого валу та від величини тиску у циліндрі [14].

Величина похибки від гідравлічного опору індикаторного каналу розраховується за такою формулою [14]:

$$\Delta p_{ik} = \left( \frac{n}{1,25 \cdot 10^6} \right) \cdot \left( \frac{l_k}{d} \right) \cdot p_z,$$

де  $l_k$  – довжина індикаторного каналу, мм,  $d$  – його діаметр, мм,  $p_z$  – максимальний тиск згоряння, атм.

Таким чином, маємо:

$$\Delta p_{ik} = \left( \frac{1300}{1,25 \cdot 10^6} \right) \cdot \left( \frac{10}{6} \right) \cdot 56 = 0,097 \text{ атм},$$

тобто 0,0097 МПа, що становить 0,17% від вимірюваної величини і знаходиться в допустимих межах згідно рекомендацій [14].

Відносне середньоквадратичне відхилення похибки  $\delta_b$  такого виміру для максимальної витрати дизельного

палива  $V = 0,95$  кг/год складає:

$$\delta_B = \frac{2\sigma_B}{V} \cdot 100\% = 0,29\%$$

Згідно отриманих результатів, при додаванні в паливо мікрокількісних доз синтезованих наночастинок витрати палива на стабільному вибраному режимі зменшилися на 6–10 % (в залежності від концентрації добавки) у порівнянні з аналогічними витратами при роботі двигуна в такому ж режимі на паливі без добавки.

При цьому важливо відзначити, що величина зменшення витрат палива від вмісту добавки має екстремальний характер (рис. 3). Найбільш оптимальним за впливом на показники роботи двигуна виявилось додавання до дизельного палива модифікованих карбонових наночастинок у кількості приблизно 3 ppm на масу палива (масова доля  $3 \cdot 10^{-4}$  %). При подальшому збільшенні концентрації добавки в паливо, витрати самого палива починають дещо зростати.

При роботі двигуна на паливі з добавкою ВСНЧ зменшуються годинні і питомі витрати палива, а також зростає величина ефективного ККД (рис. 3, 4). Тобто для одержання однакової кількості корисної механічної потужності двигуна при роботі на паливі з добавкою потрібна менша кількість палива.

Розглянемо за рахунок яких факторів вплив незначної кількості нанорозмірних добавок (мільйонні долі на масу палива) позначається на енергоефективності двигуна.

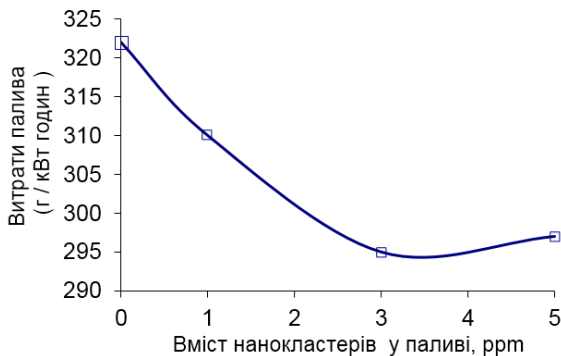


Рис. 3. Залежність питомих витрат дизельного палива від вмісту в паливі бромованих наночастинок

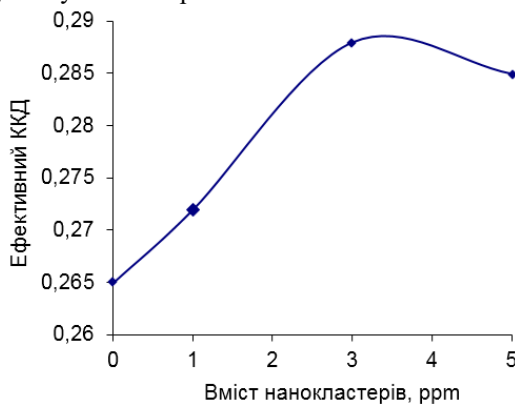


Рис. 4. Залежність ефективного ККД двигуна від вмісту в паливі бромованих наночастинок

Зміни в енергетичному балансі двигуна внутрішнього згоряння можуть бути обумовлені дією таких головних чинників [12]:

- змінами ступеня перетворення енергії згоряння компонентів палива в теплову енергію;
- змінами у витратах теплової енергії паливної суміші крізь металеві деталі камери згоряння та з відпрацьованими газами;
- змінами в структурі витрат механічної потужності.

Основні закономірності перетворення енергії згоряння компонентів палив в двигунах в теплову енергію, а також наступної трансформації її в корисну механічну роботу детально вивчено і описано в науково-технічній літературі [12, 13].

Вважається, що низьке значення коефіцієнтів корисної дії ДВЗ обумовлено, в основному, нецільовою витратою теплової енергії, отриманої при окисненні палива. Дійсно, особливості процесу перетворень енергії згоряння компонентів палив в реальному циклі двигуна роблять неминучими витрати теплової енергії при її виділенні та перетворенні в механічну роботу.

Витрати теплової енергії залежать від конструкції двигуна, матеріалів та умов процесу. В принципі, ця складова енергетичного балансу може змінюватись під дією палива при зміні теплопровідності металевих поверхонь внаслідок відкладень продуктів згоряння при довготривалій роботі двигуна. Оскільки ж ці чинники при наших випробуваннях були сталими, то на величину таких витрат синтезовані нами добавки до палива не впливають.

В двигунах внутрішнього згоряння корисно використовується тільки частина механічної енергії стислих газів, які утворюються при згорянні паливної суміші. Ця енергія виділяється в інтервалі часу, який відповідає переміщенню поршня від верхньої до нижньої мертвої точки (ділянка d-z-e, рис. 5). Деяка ж частина механічної енергії неминуче витрачається на протидію підвищеному тиску паливної суміші при її стискуванні в камері до моменту запалювання (ділянка a-y, рис. 5), а також на початку запалювання (ділянка u-c, рис. 5) при переміщенні поршня вгору до верхньої мертвої точки.

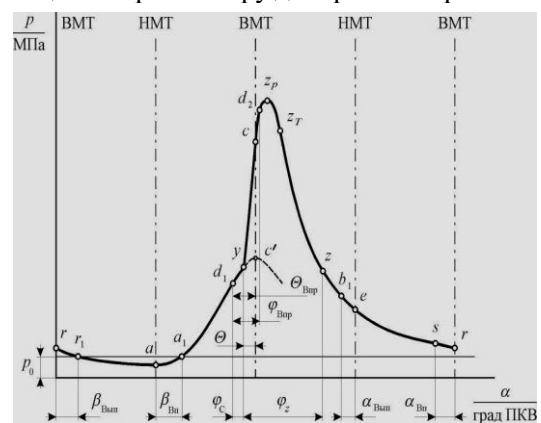


Рис. 5. Узагальнений хід залежності тиску в камері згоряння ДВЗ від кута повороту колінчастого валу (розгорнута індикаторна діаграма) [12]



Присадки до палива здатні впливати на співвідношення корисної механічної енергії (яка витрачається на прискорення руху поршня при переміщенні вниз від верхньої мертвої точки) та енергії, яка витрачається на подолання опору стискуваної суміші (при переміщенні поршня вгору до верхньої мертвої точки). Цей ефект обумовлено, з одного боку, можливим впливом добавки на інтервал часу до спалахування суміші (який характеризує цетанове число дизельного палива). З іншого боку, добавка може впливати також на швидкість згоряння палива на різних стадіях.

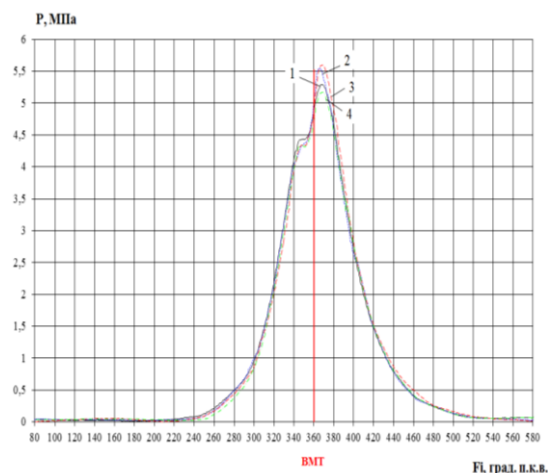
Відмінності цих факторів при згорянні палива без добавки та з добавкою наночастинок можна зафіксувати порівнянням розгорнутих індикаторних діаграм (рис. 5). При зміні таких чинників на індикаторній діаграмі повинні спостерігатися зсуви як ліній стиснення та розширення, так і ділянки максимального тиску згоряння.

Якщо під дією добавки цетанове число палива зростає і, відповідно, проміжок часу до спалаху зменшується, тоді лінія стиснення зсувається вліво, а площа під цією кривою повинна зростати. А це, в свою чергу, веде до збільшення витрат механічної енергії при переміщенні поршня до верхньої мертвої точки на подолання протидії стискуваної паливо-повітряної суміші. Якщо ж цетанове число палива під дією добавки зменшується (тобто проміжок часу до спалаху паливо-повітряної суміші збільшується), тоді, навпаки, лінія стиснення повинна зсуватися вправо. Такий зсув може призводити також до негативних наслідків – зниження енергоефективності палива через нестачу часу для завершення процесів хімічних перетворень на початкових етапах переміщення поршня від верхньої мертвої точки.

Використання існуючих товарних антидимних та антисажових добавок до дизельних палив (таких як алкілфеноляти барію) впливає на процеси горіння палива та описано в роботі [7]. На фазі холодно-полум'яного горіння (зародження та розгалуження ланцюгів окиснення) ці добавки захоплюють кисень та утворюють пероксиди барію. В подальшому, у фазі гарячо-полум'яного горіння (рекомбінація радикалів з виділенням енергії) пероксиди барію розпадаються з виділенням кисню, необхідного для остаточного згоряння пального, що, в свою чергу, зменшує кількість сажі у відпрацьованих газах.

Якби цей механізм мав місце і в нашому випадку, то на розгорнутій індикаторній діаграмі при роботі двигуна на паливі з добавкою ВСНЧ слід було б чекати зсуву максимуму підвищення тиску вправо, тобто інтенсивне згоряння палива повинно було б відбуватися більш тривалий час після займання суміші ніж при роботі на паливі без добавки.

На рис. 6 показано результати дослідження впливу синтезованих наночастинок на динаміку процесу згоряння дизельного палива в двигуні за методом розгорнутих індикаторних діаграм.



**Рис. 6.** Вплив добавки вуглецевих сфероїдальних наночастинок до палива на динаміку підвищення тиску в камері згоряння дизельного двигуна 1Ч8,5/11: 1 – дизельне паливо без добавки; 2 – дизельне паливо при вмісті наночастинок 10 ppm; 3 – дизельне паливо при вмісті наночастинок 1 ppm; 4 – дизельне паливо з добавкою етанолу без наночастинок

В роботі для обробки індикаторних діаграм використовувалася осереднена індикаторна діаграма, яку було отримано на основі вибірки зі 100 експериментальних діаграм на досліджуваному режимі при роботі двигуна на дизельному паливі та дизельному паливі з добавкою.

Аналіз процесу згоряння палива в двигуні за методом розгорнутих індикаторних діаграм показав, що зсуву кривої індикаторної діаграми вліво на ділянці руху поршня до верхньої мертвої точки, або вправо після проходження поршнем верхньої мертвої точки не спостерігалось (рис. 6). Не спостерігалось також зсуву піку діаграми тиску.

У випадку застосування палива з добавкою максимум тиску мав місце при тому ж куті повороту колінчастого валу (близько 10 градусів після верхньої мертвої точки) при переміщенні поршня від верхньої мертвої точки, що і у випадку застосування палива без добавки. При цьому максимальне значення тиску у випадку застосування палива з добавкою збільшувалось на 6–10 % у порівнянні з відповідним значенням, при випробуванні палива без додавання наночастинок.

Для порівняння відзначимо, що в контрольному випробуванні при додаванні в паливо масової долі етанолу 0,2 % максимальне значення тиску в камері згоряння зменшилось на 3 % також без зсуву ліній стиснення та розширення на досліджуваній індикаторній діаграмі (рис. 6). Тобто додавання етанолу до нафтового дизельного палива в цілому зменшує його енергоефективність.

Таким чином, отримані результати досліджень свідчать, що дія добавки синтезованих наночастинок на економічність використання палива в двигуні обумовлена зміною ступеня перетворення енергії згоряння компонентів палива в теплову енергію. Конкретні ме-

ханізми впливу синтезованих наночастинок на кінетику та механізми різних стадій хімічних перетворень палива при згорянні потребують подальших більш детальних досліджень.

*Авторський колектив висловлює вдячність першому віце-президенту НАН України академіку НАН України А.Г. Наумовцю за постійний інтерес та підтримку наших досліджень у цьому напрямку.*

### Література

- Heywood J.B. Internal Combustion Engines Fundamentals. NY: McGraw-Hill. 1988. 930.
- Абрамчук Ф.І., Гугаревич Ю.Ф., Долганов К.Є., Тимченко І.І. Автомобільні двигуни. Підручник. К.: Арістей, 2006. 476.
- Caton J.A. An Introduction to Thermodynamic Cycle Simulations for Internal Combustion Engines. NY: John Wiley & Sons, 2016. 367.
- Gupta H.N. Fundamentals of Internal Combustion Engines. New Delhi: 2006. 597.
- Сафонов А.С., Ушаков А.И., Гришин В.В. Химотология горюче-смазочных материалов. СПб.: НППИКС, 2007. 488.
- Капустин В.М. Нефтяные и альтернативные топлива с присадками и добавками. М.: КолосС, 2008. 232.
- Данилов А.М. Применение присадок в топливах. М.: Химиздат, 2010. 368.
- Гайдай О.О., Пилявський В.С., Полункін Є.В. Поліпшення експлуатаційних властивостей етанольних моторних палив мікродозами карбонових сферодальних наночастинок. *Наукоємні технології (Science-based technologies)*. 2016. 1 (29). 3-8.
- Haidai O., Pilyavski V., Shelud'ko Y., Polunkin Y. Improvement of Performance Characteristics of Ethanol Motor Fuels Through Use of Additives Based on Nanoscale Carbon Clusters. EUREKA. *Physical Sciences and Engineering*. 2016. 6. 3-10.
- Ugarte D. Curling and Closure of Graphitic Networks Under Electron-beam Irradiation. *Nature*. 1992. 359. 707-709.
- Рудь А.Д., Кускова Н.И., Богуславский Л.З., Кирьян И.М., Зелинская Г.М., Белый Н.М. Структурно-энергетические аспекты синтеза углеродных наноматериалов высоковольтными электроразрядными методами. *Химия и химическая технология*. 2013. 56 (7). 99-104.
- Колчин А.И., Демидов В.П. Расчет автомобильных и тракторных двигателей. М.: Высшая школа. 2008. 496.
- Двигатели внутреннего сгорания. Теория поршневых и комбинированных двигателей. под ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова. М.: Машиностроение, 1983. 376.
- Райков И.Я. Испытания двигателей внутреннего сгорания. - М.: Высш. школа, 1975. 180.
- Gad M. S., Ali Yehia Khaled Ahmed, Abdelhakeem Amer A. Effect of multi carbon nanosheet on diesel engine performance. Fullerenes, *Nanotubes and Carbon Nanostructures*. 2018. 26. 722-728.
- Ghafoori M., Ghobadian B., Najafi G., Layeghi M., Rashidi A., Rashidi A. Effect of nano-particles on the performance and emission of a diesel engine using biodiesel-diesel blend. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*. 2015. 12. 3097-3108
- Корниенко Н. Е., Рудь А. Д., Кирпач К. А., Полункин Е. В., Кирьян И. М., Богуславский Л. З. Функционализация углеродных наносфер кислородом и галогенами и изучение их свойств методами рентгеновской дифракции и колебательной спектроскопии. *Міжнародна наукова конференція "Матеріали для роботи в екстремальних умовах - 6"*. 2016. 391-394

### References

- Heywood J.B. Internal Combustion Engines Fundamentals. NY: McGraw-Hill. 1988. 930.
- Abramchuk F.I., Hutarevych Yu.F., Dolhanov K.Ye., Tymchenko I.I. Avtomobilni dvyhuny. Pidruchnyk. K.: Aristei, 2006. 476. [In Ukrainian].
- Caton J.A. An Introduction to Thermodynamic Cycle Simulations for Internal Combustion Engines. NY: John Wiley & Sons, 2016. 367.
- Gupta H.N. Fundamentals of Internal Combustion Engines. New Delhi: 2006. 597.
- Safonov A.S., Ushakov A.I., Grishin V.V. Himmotologiya goryuche-smazochnyh materialov. SPb.: NPIKC, 2007. 488. [In Russian].
- Kapustin V.M. Neftyanye i alternativnye topliva s prisadkami i dobavkami. M.: KolosS, 2008. 232. [In Russian].
- Danilov A.M. Primenenie prisadok v toplivah. M.: Himizdat, 2010. 368. [In Russian].
- Haidai O.O., Pyliavskiy V.S., Polunkin Ye.V. Polipshennia ekspluatatsiinykh vlastyvostei etanolnykh motornykh palyv mikrodozamy karbonovykh sferoidalnykh nanoklasteriv. *Naukoiemni tekhnolohii (Science-based technologies)*. 2016. 1 (29). 3-8. [In Ukrainian].
- Haidai O., Pilyavski V., Shelud'ko Y., Polunkin Y. Improvement of Performance Characteristics of Ethanol Motor Fuels Through Use of Additives Based on Nanoscale Carbon Clusters. EUREKA. *Physical Sciences and Engineering*. 2016. 6-10.
- Ugarte D. Curling and Closure of Graphitic Networks Under Electron-beam Irradiation. *Nature*. 1992. 359. 707-709.
- Rud A.D., Kuskova N.I., Boguslavskij L.Z., Kiryan I.M., Zelinskaya G.M., Belyj N.M. Strukturno-energeticheskie aspekty sinteza uglerodnyh nanomaterialov vysokovoltnymi elektrorazryadnymi metodami. *Himiya i himicheskaya tehnologiya*. 2013. 56 (7). 99-104. [In Russian].
- Kolchin A.I., Demidov V.P. Raschet avtomobilnyh i traktornyh dvigatelej. M.: Vysshaya shkola. 2008. 496. [In Russian].

13. Dvigateli vnutrennego sgoraniya. Teoriya porshnevnyh i kombinirovannyh dvigatelej, pod red. A.S. Orlina, M.G. Kruglova. M.: Mashinostroenie, 1983. 376. [In Russian].

14. Raykov I.YA. Ispytaniya dvigateley vnutrennego sgoraniya. - M.: Vyssh. shkola, 1975. 180. 15. Gad M. S., Ali Yehia Khaled Ahmed, Abdelhakeem Amer A. Effect of multi carbon nanosheet on diesel engine performance. *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures*. 2018. 26. 722-728.

16. Ghafoori M., Ghobadian B., Najafi G., Layeghi M., Rashidi A., Rashidi A. Effect of nano-particles on the

performance and emission of a diesel engine using biodiesel-diesel blend. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*. 2015. 12. 3097-3108

17. Korniyenko N. Ye., Rud A. D., Kirpach K. A., Polunkin Ye. V., Kiryan I. M., Boguslavskiy L. Z. Funktsionalizatsiya uglerodnykh nanosfer kislorodom i galogenami i izucheniye ikh svoystv metodami rentgenovskoy difraktsii i kolebatelnoy spektroskopii. *Mizhnarodna naukova konferentsiya "Materiali dlya roboti v ekstremalnikh umovakh-6"*. 2016. 391-394. [In Russian].

Надійшла до редакції 04.02.2020 р.

## Improvement of chemmotological properties of diesel fuel by micro-addition of carbon spheroidal nanoparticles

*Ie.V. Polunkin<sup>1</sup>, V.S. Pilyavsky<sup>1</sup>, Ya.O. Bereznitsky<sup>1</sup>, T.M. Kamenieva<sup>1</sup>, A.M. Levterov<sup>2</sup>, A.M. Avramenko<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*V.P. Kukhar Institute of Bioorganic Chemistry and Petrochemistry NAS of Ukraine, Ukraine, 02160, Kyiv, Kharkivske shausse, 50, tel./fax: 044 292-30-88, e-mail: polunkin@i.ua*

<sup>2</sup>*A.M. Pidgorny Institute of Mechanical Engineering NAS of Ukraine, Ukraine, 610000, Kharkiv, Pozharsky, 2/10, tel.: (057) 349-47-02, e-mail: levterov@nas.gov.ua*

The work is devoted to the detection of the influence of micro-quantitative additives of carbon nanosized particles of a spheroidal structure on the performance properties of diesel fuel during combustion in engines. Nanomaterials were obtained by the high-frequency discharge-pulse synthesis method on tungsten electrodes using hydrocarbon gases as feedstock. The synthesis product was modified with bromine, then extracted in different solvents and filtered. The average size of brominated spheroidal nanomaterials after extraction in ethanol was 5–10 nm. The study of the effect of the addition of synthesized nanoparticles on the fuel on the performance of engines was carried out on a motor stand with a diesel engine 1H 8.5/11 when working on standard diesel fuel and fuel with additives of different concentrations under the following modes: load  $N_e = 3$  kW, rotational speed engine  $n = 1300$  min<sup>-1</sup>. The main experimental characteristics of the evaluation of the impact of additives on fuel on the perfection of the workflow in the diesel engine cylinders were selected fuel consumption (specific and hourly) and effective efficiency (efficiency). According to the results, when adding microfuel doses of synthesized nanomaterials (approximately 3 ppm by weight of fuel), the fuel consumption decreased by 6–10 % and, accordingly, the effective efficiency increased compared to the same performance when operating the engine in the same mode without additive fuel. The analysis of the process of combustion of fuel in the engine by the method of detailed indicator diagrams was done and it is shown that the effect of the addition of synthesized nanoparticles on the fuel efficiency in the engine is caused by a change in the degree of chemical energy conversion of fuel components into thermal energy.

**Keywords:** internal combustion engines, diesel fuel, fuel additives, carbon nanoparticles