

А.П. Марченко, М.Т. Міщенко

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЗГОРЯННЯ БЕНЗИНУ З ДОБАВКОЮ ВОДНЮ В ДВИГУНІ З ІСКРОВИМ ЗАПАЛЮВАННЯМ НА РЕЖИМАХ ЗОВНІШНЬОЇ ШВИДКІСНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Напрямки розвитку та вдосконалення автомобільного транспорту в усьому світі невід'ємно пов'язані з прагненням до скорочення використання автомобілів «на традиційних видах пального», що зумовлене обмеженими обсягами нафти та екологічною безпекою людства. Оскільки режими зовнішньої швидкісної характеристики є найбільш характерними для експлуатації автомобілів у містах, відповідно дослідження екологічних показників двигунів на цих режимах є актуальною задачею. Тому пошук шляхів зниження викидів двоокису вуглецю автомобільних двигунів на швидкісних режимах є актуальною задачею. Стрімке зростання кількості автомобілів з двигунами внутрішнього згоряння і невідворотне зменшення світових запасів нафти спричиняють необхідність розробок та впровадження енергозберігаючих технологій, і використання альтернативних палив. Актуальними є дослідження спрямовані на пошук шляхів покращення паливної економічності та екологічних показників автомобільних двигунів. Одним із перспективних напрямів, є вплив на процес згоряння в бензинових двигунах шляхом використання добавок альтернативних видів палива до яких належить водень. Представлене дослідження параметрів згоряння бензину з добавкою водню в двигуні з іскровим запалюванням на режимах зовнішньої швидкісної характеристики являє собою комплексний аналіз процесу згоряння бензино-водневої суміші та встановлення її впливу на концентрацію двоокису вуглецю у відпрацьованих газах шляхом розробки математичної моделі, що враховує склад компонентів суміші та особливості процесу згоряння, дозволяє достатньо точно розраховувати робочий процес двигуна з добавкою водню при $\psi \leq 10\%$, її ідентифікації за результатами експериментальних досліджень та зняття індикаторних діаграм. В процесі дослідження розроблено залежності для визначення параметрів згоряння моделі Вібе з урахуванням добавки водню до бензину на режимах зовнішньої швидкісної характеристики та проаналізовано вплив добавки водню на концентрацію CO_2 у відпрацьованих газах. Показано, що зі збільшенням добавки водню до 10% за масовою часткою до бензину, спостерігається зниження викидів CO_2 майже до 30% на режимах зовнішньої швидкісної характеристики, що відповідає сучасним екологічним нормам, які виставляються до бензинових ДВЗ.

Ключові слова: двигун внутрішнього згоряння; водень; робочий процес; викиди двоокису вуглецю; математична модель; параметри згоряння; індикаторна діаграма; характеристика тепловиділення.

Вступ

Зниження викидів з відпрацьованими газами бензинових двигунів є важливою умовою розвитку автомобілебудування. Постійне посилення екологічних норм, які висуваються до компаній-виробників визначається необхідністю знизити екологічну напруженість при активному використанні автотранспорту у містах [1]. Останнім часом вельми актуальним є питання щодо шкідливих викидів двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ), одним з яких є вуглекислий (CO_2) газ. Крім того, у відпрацьованих газах присутні й інші шкідливі сполуки - це бенз(а)спірен, оксиди азоту, сірчисті сполуки. При цьому багато компонентів відпрацьованих газів не тільки шкідливі самі по собі, а також є «парниковими газами», які сприяють глобальному потеплінню.

Багатьма дослідниками показано, що водень, як добавка до вуглецевих палив, має ряд властивостей, що дозволяють по-новому організувати робочий процес двигунів з іскровим запалюванням [2-4]. А саме, значно підвищити їх економічність і знизити токсичність відпрацьованих газів. Також відомо, що ефективність процесу згоряння в ДВЗ насамперед залежить від закону підведення теплоти. Як паливо для двигуна внутрішнього згоряння водень вияви-

вся дуже вибухонебезпечною речовиною, і необхідно враховувати безпеку. Через його низьку енергію запалення попереднє запалювання є серйозною проблемою. Невелика відстань гасіння дозволяє паливу проходити через вузькі отвори (впускні та випускні клапани), а також – у впускний колектор. Детонація двигуна зі стехіометричними або багатими сумішами є ще одним аспектом, який, мабуть, досить поширений для двигунів, що працюють на водні. Але ця ж характеристика дозволяє працювати зі збагаченим воднем бензиновим двигуном, який працює в надплинному стані без детонації, спалаху або пропусків запалювання.

В дослідженні [5] встановлено властивості горіння воднево-повітряної суміші. Виявилось, що вона має вищу температуру самозаймання порівняно з бензиновою сумішшю, що робить її більш стійкою до ударів. Також зазначено, що оксиди азоту є єдиними токсичними продуктами згоряння водню. В дослідженні [6] було виявлено, що втрати тепла через стінки камери згоряння при використанні карбюрованого водню вищі, ніж у при роботі на бензині. Для зменшення теплових втрат рекомендується змінити кут випередження запалення до ВМТ та збільшити коефіцієнт надлишку повітря.

Разом із тим, у відповідності із сучасної стратегії щодо широкого використання зеленого водню в силових установках на транспорті та стратегічних завдань щодо пріоритетів з декарбонізації можна стверджувати про високу актуальність досліджень процесів згоряння у бензинових ДВЗ із додаванням водню.

Мета дослідження

В даному дослідженні метою є аналіз впливу суміші бензину з добавкою водню на параметри згоряння в двигуні з іскровим запалюванням ВАЗ-21083 та її вплив на концентрацію двоокису вуглецю у відпрацьованих газах на режимах зовнішньої швидкісної характеристики.

Методика розрахункового та експериментального дослідження

З метою визначення характеру впливу добавки водню на показники бензинового двигуна, розроблено математичну модель розрахунку робочого процесу.

Математична модель робочого процесу двигуна включає наступні розділи:

- визначення теплофізичних властивостей повітря, встановлення паливної композиції довільного компонентного складу;
- спрощений розрахунок робочого процесу для отримання параметрів робочого тіла в циліндрі на початку такту випуску в першому наближенні;
- квазістаціонарний розрахунок газообміну, стиску і розширення в циліндрі за методом об'ємного балансу;
- розрахунок процесу згоряння за моделлю Вібе [7];
- розрахунок теплообміну в циліндрі за моделлю Вошні [10];
- втрати на тертя за емпіричною залежністю, залежно від середньої швидкості поршня;
- визначення компонентного складу продуктів згоряння.

В основу математичної моделі покладені диференціальні рівняння тепло-масообміну та рівняння стану.

$$dM = dM_s - dM_B ; \quad (1)$$

$$dQ = dI - Vdp ; \quad (2)$$

$$\frac{dp}{p} + \frac{dV_n - dV_x}{V} - \frac{dT}{T} = \frac{dM}{M} , \quad (3)$$

де dM – зміна маси робочого тіла, що обумовлена надходженням свіжого заряду dM_s і виходом робочого тіла з надпоршневої порожнини dM_B протягом проміжку часу dt ;

dQ – теплота, що підведена до робочого тіла за цей же проміжок часу;

dI – зміна ентальпії робочого тіла протягом

проміжку часу dt ;

dV_n – зміна об'єму надпоршневої порожнини, що обумовлена переміщенням поршня протягом проміжку часу dt ;

dV_x – зміна об'єму робочого тіла, що обумовлена зміною кількості молей робочого тіла внаслідок хімічних реакцій окиснювання горючих компонентів газової суміші протягом проміжку часу dt .

Процес згоряння реалізований за моделлю Вібе [7], заданням показників характеру та тривалості згоряння[9], використовуючи емпіричні формули.

$$x = 1 - \exp \left[-C \cdot \left(\frac{\varphi - \varphi_0}{\varphi_z} \right)^{m+1} \right] \quad (4)$$

де φ_0 , φ_z , φ – відповідно кут початку згоряння, тривалість згоряння та поточне значення кута повороту кривошипа в процесі згоряння;

C – константа, що характеризує повноту згоряння палива;

m – показник динаміки згоряння.

Константа C визначається за залежністю:

$$C = \ln(1 - pol), \quad (5)$$

де pol – доля палива, що повністю згоряє за цикл

$$pol = \sum pol_i \cdot r_i ; \quad (6)$$

pol_i , r_i – відповідно, повнота згоряння та об'ємна доля i -го компоненту палива.

Теплообмін в циліндрі описується моделлю Вошні [10].

$$\alpha_g = 130 \cdot \frac{(p \cdot 10^{-5})^{0,8} \cdot \omega^{0,8}}{T^{0,53} \cdot D^{0,2}} , \quad (7)$$

де p – тиск в циліндрі, Па;

T – температура в циліндрі, К;

D – діаметр циліндру, м;

ω – швидкість руху газів в циліндрі, м/с.

В період згоряння та розширення швидкість руху газів визначається відповідно [10]:

$$\omega = 2,28 \cdot C_m + 3,34 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{V_c \cdot T}{p \cdot V} \cdot (p - p_c), \quad (8)$$

де V_c – об'єм камери згоряння, м³;

p_c – тиск газів в циліндрі за відсутності згоряння, Па;

C_m – швидкість поршня, м/с.

В основу методики експериментального дослідження покладено:

- визначення індикаторних та ефективних показників двигуна;
- отримання індикаторних діаграм;
- визначення експериментальних характеристик тепловиділення;
- виконання замірів вмісту CO₂ у відпрацьованих газах.

Експериментальне дослідження проведено на

базі лабораторного комплексу кафедри ДГЕУ НТУ «ХП», і полягало в ідентифікації математичної моделі робочого процесу автомобільного двигуна. В якості макетних об'єктів розрахункового і експериментального дослідження були застосовані дослідження з використанням двигунів MeM3-307 та легкового автомобіля ВАЗ – 21081.

На дослідному двигуні встановлено розподільний вал та ресивер від двигуна ВАЗ – 21103, систему розподіленого впорскування палива, комплекс датчиків для контролю параметрів та інженерний блок електронного керування. В ході виконання експериментального дослідження було розроблено ряд заходів для зняття індикаторної діаграми.

Технічна характеристика дослідного двигуна представлена на табл. 1.

Таблиця 1. Технічна характеристика двигуна ВАЗ-21081

№ з/п	Найменування параметра двигуна	Значення параметра
1	Розташування і кількість циліндрів	В ряд, 4
2	Діаметр циліндра, мм	76
3	Хід поршня, мм	60,6
4	Геометричний ступінь стиску	9
5	Номінальна потужність, кВт	40
6	Номінальна частота обертання, хв ⁻¹	5600
7	Максимальний крутний момент, Н·м	77,9
9	Робочий об'єм V_h , л	1,1
10	Маса двигуна, кг	127

Для відбору проб відпрацьованих газів з метою вимірювання концентрації двоокису вуглецю (CO₂) використовувався газоаналізатор Sauermann Si-Ca 230 (рис. 2).

На рис. 1 наведено схему та загальний вигляд експериментального стенду з двигуном ВАЗ – 21081.

Випробування проводилися за наступних умов:

- температура навколишнього середовища 278 К
- атмосферний тиск 0,0978 МПа,
- температура охолоджуючої рідини на виході з двигуна 80...90°С,
- температура мастила – в межах 80...100°С.

Керування двигуном ВАЗ – 21083 здійснюється за допомогою інженерного блоку ЄБК на базі Январь 7.2, який функціонально аналогічний блоку Bosch M7.9.7. Керування інженерним блоком виконується програмним забезпеченням J5 On-Line Tuner, що дозволяє визначати коефіцієнт надлишку повітря, частоту обертання колінчастого валу двигуна, годинну витрату повітря та кут випередження запалювання. Масова витрата палива визначалась ваговим методом. Для визначення температури відпрацьованих газів використані хромель-алюмінієва термопара і гальванометр. Для підключення до інженерного блоку використовується кабель адаптера K-Line.

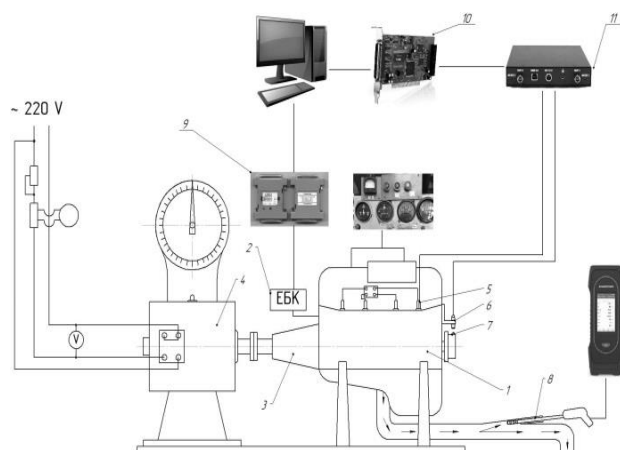


Рис. 1. Схема стенду та загальний вигляд:

1 – двигун, оснащений контрольно-вимірювальними приладами і, пристроями, що забезпечують його роботу; 2 – діагностичний роз'єм; 3 – коробка передач; 4 – навантажуючий пристрій / електродвигун для приводу колінчастого валу при прокрутці; 5 – датчику тиску в циліндрі двигуна AVL 6 – датчику кута повороту колінчастого валу; 7 – мітка ВМТ; 8 – зонд газоаналізатора Sauermann Si-Ca 230; 9 – адаптер K-Line; 10 – плата АЦП PCI L-Card 783-86; 11 – підсилювач

Автоматизований системний комплекс для вимірювання параметрів двигуна включає в себе ряд компонентів, таких як датчик ВМТ, датчик тиску у циліндрі AVL, датчик кута повороту колінчастого валу, блок підсилювачів, плата АЦП PCI L-Card 783-86, програмне забезпечення Powergraph 3.3.9 Pro та EngineAnalysisPro v1.0. Датчик тиску у циліндрі двигуна представляє собою п'єзокварцовий датчик виробництва компанії AVL (Австрія). Крім того, спеціально для цього датчика був встановлений підсилювач сигналу, а також проведено його тарування. Навантаження двигуна забезпечується електричною балансирною машиною.

Газоаналізатор обладнаний зондом для відбору проби газу та програмним забезпеченням ОС Android для керування його функціями. Технічну характеристику газоаналізатора Sauermann Si-CA 230 представлено в табл. 2.



Рис. 2. Комплект газоаналізатора Sauermann Si-CA 230

Таблиця 2. Технічна характеристика газоаналізатора Sauermann Si-CA 230

Параметр	Речовина	Діапазон
Концентрація	CO, г/кВт·год	0...150 г/кВт·год
Концентрація	C _x H _y , ppm	0,00... 5,00 %
Концентрація	NO, ppm	0,00...5000,00 ppm
Концентрація	CO ₂ , %	0,00 ... 99,00 %
Концентрація	NO _x , ppm	0,00...7500,00 ppm
Погрішність вимірів	%	1%
Маса	кг	0,825

За результатами вимірювань вмісту у відпрацьованих газах шкідливих речовин, які здійснювались за допомогою газоаналізатора Sauermann Si-CA 230, у табл. 3 наведено вміст двоокису вуглецю.

Таблиця 3. Вміст у ВГ шкідливих речовин

n, хв ⁻¹	CO ₂ , %
2610	13,7
3220	13,4
3870	12,4
4190	13,1
4850	13,6
5590	12,9

Для ідентифікації математичної моделі робочого процесу двигуна ВАЗ – 21083 проведено дослідження, та отримано показники роботи двигуна на режимах зовнішньої швидкісної характеристики при частотах обертання від 5590 хв⁻¹ до 2610 хв⁻¹ та знято індикаторні діаграми.

Результати розрахункового дослідження

Ідентифікація математичної моделі оцінювалась шляхом накладання експериментальних та розрахункових індикаторних діаграм (рис. 3) та характеристик тепловиділення (рис. 4). В табл. 4 наведено порівняння результатів розрахунку ефективного ККД (η_e), індикаторного ККД (η_i), питомої ефективної витрати палива (g_e) і максимального тиску циклу (P_z) з експериментальними.

Таблиця 4. Порівняння експериментальних та розрахункових значень показників двигуна ВАЗ-21081 на режимах максимального крутного моменту та номінальної потужності

Швидкісний режим n, хв ⁻¹	η_e	η_i	g_e , г/кВт·год	P_z , МПа
	експ/ розр	експ/ розр	експ/ розр	експ/ розр
3870	0,31/0,316	0,41/0,401	258/255	5,19/5,21
5590	0,28/0,281	0,4/0,394	291/293	5,257/5,25

За результатами експериментального дослідження визначили показники динаміки та тривалості згоряння на режимах максимального крутного моменту та максимальної потужності. Ці показники представлені в табл. 5.

Таблиця 5. Показники тривалості та характеру згоряння у двигуні ВАЗ – 21081

Режим n, хв ⁻¹	m	φ_z
3870	3,1	67
5590	3,7	62

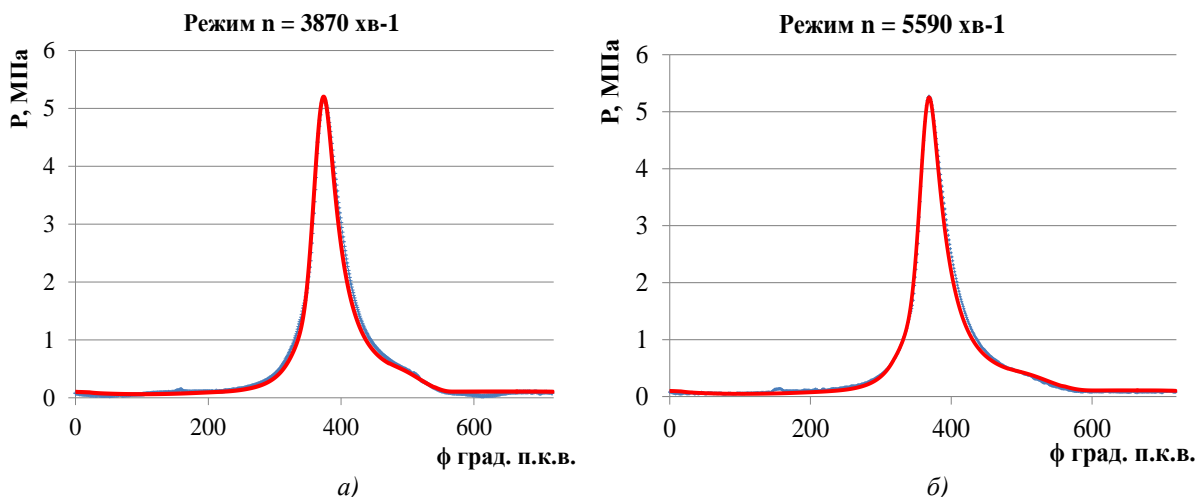


Рис. 3. Експериментальні та розрахункові індикаторні діаграми ВА3-21081. Точками показано експериментальні дані

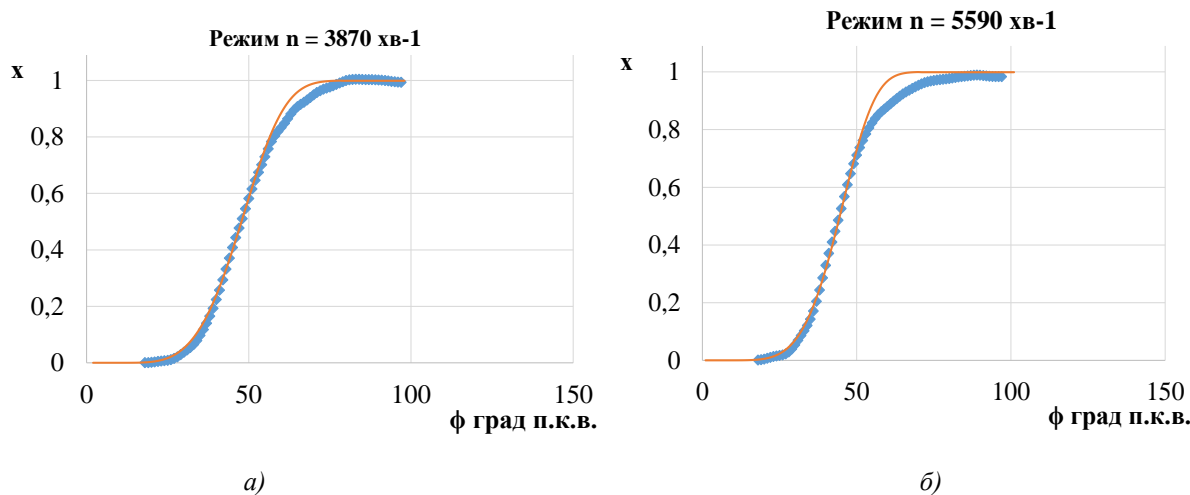


Рис. 4. Експериментальні та розрахункові характеристики тепловиділення двигуна ВА3-21081. Точками показано експериментальні дані

Базуючись на експериментальних даних, одержаних шляхом обробки індикаторних діаграм, характеристик тепловиділення, отримані наступні залежності показників моделі І.І. Вібе для розрахунку процесу згоряння на режимах зовнішньої швидкісної характеристики при роботі двигуна на бензині:

$$m = \left(\frac{n}{n_0}\right)^{0,48} \cdot m_0, \quad (9)$$

$$\varphi_z = \left(\frac{n}{n_0}\right)^{-0,8} \cdot (\varphi_{поч})_0 + (\varphi_{вид})_0, \quad (10)$$

де m_0 – показник характеру згоряння бензинового двигуна, працюючого на тому ж режимі;

$(\varphi_{поч})_0, (\varphi_{вид})_0$ – тривалість початкового та видимого періодів згоряння бензинового двигуна.

Ці залежності справедливі за умови $n = 2160 - 5590$ хв⁻¹;

На рис. 5 наведено графіки зміни параметрів

згоряння на режимах зовнішньої швидкісної характеристики.

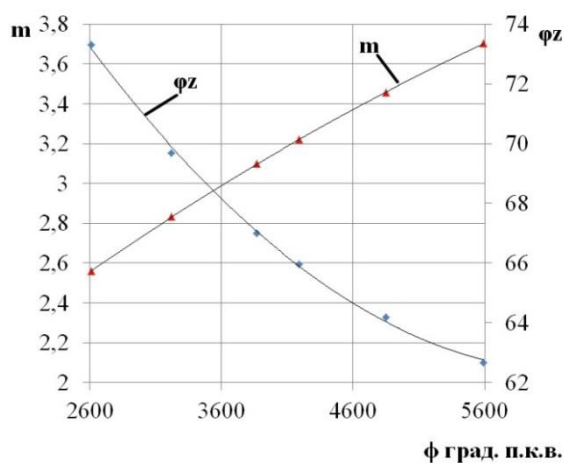


Рис. 5. Зміна показника характеру та тривалості згоряння на режимах ЗШХД

Добавка водню до бензину істотно впливає на розвиток та перетікання процесу згоряння, а також на наповнення двигуна свіжим зарядом, що призводить до зміни параметрів робочого процесу та тепловиділення в порівнянні з роботою двигуна на бензині при однакових значеннях коефіцієнту надлишку повітря. Однією з причин збільшення потужності бензинового двигуна при роботі з добавкою водню є зростання швидкості згоряння [11]. Процес згоряння в початковий період визначається величиною нормальної швидкості полум'я. Нормальна швидкість полум'я водню в суміші з повітрям майже на порядок вища, ніж у бензині. Тому збільшення частки газоподібного водню в безповітряній композиції значно скорочує початковий період згоряння. В дослідних композиціях паливоповітряної суміші збільшення масової частки водню від 0 до 0,1 призводить до скорочення початкового періоду згоряння майже вдвоє [11].

Дослідження [10, 12-14] показали, що зменшення тривалості видимого згоряння з зростанням добавки водню, майже не впливає на потужність та економічність двигуна при роботі на сумішах, близьких до стехіометричних, вплив $\phi_{вид}$ на показники робочого процесу відзначається тільки при $\phi_{вид} > 45$ град.п.к.в. Скорочення тривалості процесу згоряння, також, призводить до зменшення оптимального кута випередження запалювання.

На рисунках 6 та 7 наведені результати дослідження впливу добавки водню на параметри згоряння m та ϕ_z , це дослідження доводить, що показники мають інший характер зміни залежно від добавки водню. Наступні аналітичні вирази наближено описують ці залежності [11]:

$$m = m_0 - 12\psi ; \quad (11)$$

$$\phi_z = [(\phi_{поч})_0 - 95\psi] + [(\phi_{вид})_0 - 80\psi], \quad (12)$$

де $\psi = 0 - 0,1$ масова доля водню.

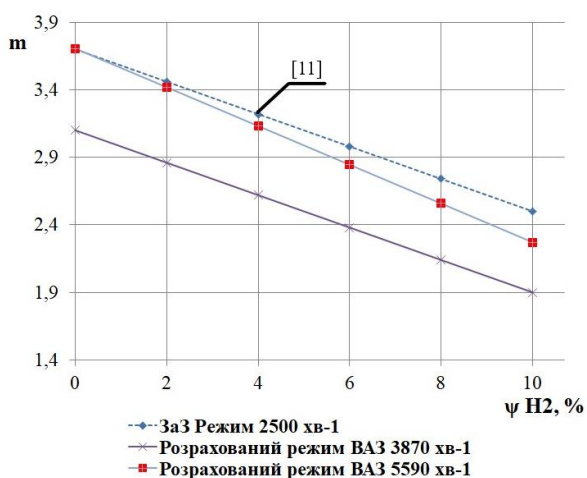


Рис. 6. Вплив добавки водню на показник характеру згоряння

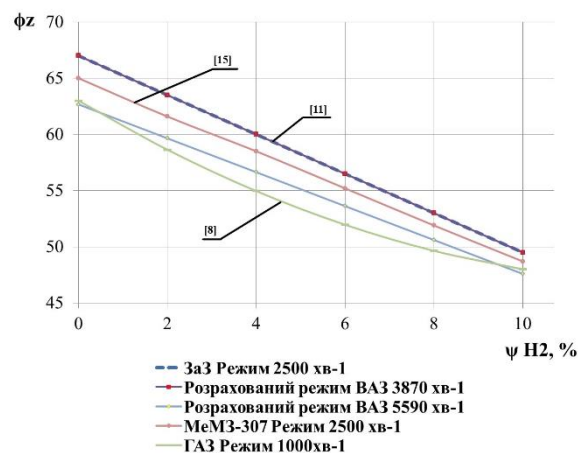


Рис. 7. Вплив добавки водню на тривалість процесу згоряння

Експериментальне дослідження [15] з двигуном МеМЗ-307, дозволило встановити майже лінійну залежність зміни тривалості згоряння при збільшенні добавки водню до 10%. Залежність тривалості згоряння від частки водню в сумішевому паливі ψ на встановленому режимі наведено на рис. 7.

В дослідженні [8] шляхом обробки експериментальних індикаторних діаграм отримані емпіричні залежності зміни характеру та тривалості згоряння, що зв'язують з функцію тепловиділення І.І. Вібе з складом бензо-водневої суміші. Для складу суміші, близької до стехіометричної ($\alpha = 1-1,05$) та добавках водню $\psi \leq 10\%$ зміна параметру m апроксимується залежністю, аналогічно до дослідження [11]. Тривалість згоряння відповідно масової долі водню в паливі на швидкісних режимах роботи двигуна визначається наступною залежністю:

$$\phi_z = (\phi_z)_0 + 0,085\psi^2 - 2,35\psi . \quad (13)$$

Базуючись на аналізі літературних джерел, у яких розглянуті експериментальні дослідження [8, 11, 15], прийнято рішення визначати параметри згоряння стосовно вибраних макетних бензинових ДВЗ, при цьому в основу прийняті залежності, що запропоновані в роботі [11].

На рис. 8 показано вплив добавки водню на концентрацію CO_2 у відпрацьованих газах при роботі двигуна на режимах зовнішньої швидкісної характеристики. Об'ємна доля CO_2 у продуктах згоряння визначалась за формулою:

$$rCO_2 = \frac{1}{12} \cdot C / M'_{пр.зг.}, \quad (14)$$

де $M'_{пр.зг.}$ – кількість продуктів згоряння на 1 кг палива, кМоль.

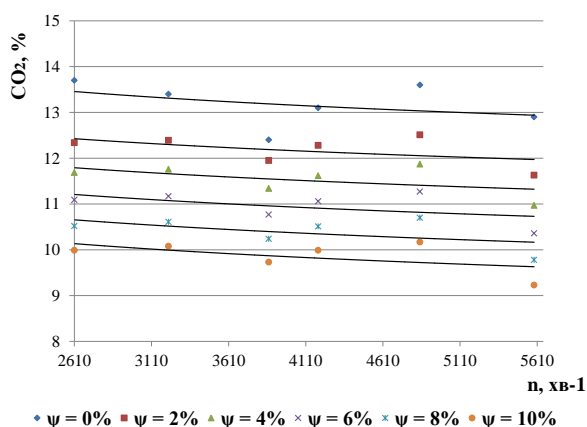


Рис. 8. Вплив добавки водню на концентрацію CO₂ у ВГ на режимах зовнішньої швидкісної характеристики двигуна автомобіля ВАЗ - 21081

Таким чином, розроблена математична модель дозволяє достатньо точно розраховувати робочий процес двигуна з добавкою водню при $\psi \leq 10\%$, а запропоновані залежності дають змогу визначити показники моделі Вібе на режимах зовнішньої швидкісної характеристики. Також шляхом розрахункового дослідження встановлено позитивний вплив добавки водню на концентрацію CO₂ у відпрацьованих газах.

Висновки

1. Результати дослідження зміни параметрів згоряння свідчать про те, що розроблена математична модель розрахунку робочого процесу, відрізняється від існуючих моделей, оскільки дозволяє визначити характер та тривалість процесу згоряння під час роботи бензинового двигуна з добавкою водню.

2. Наукова новизна запропонованої моделі полягає також і в тому, що одночасно із параметрами процесу згоряння на режимах роботи ДВЗ досліджував і результати впливу цього процесу на викиди із відпрацьованими газами головного елементу технології декарбонізації на транспорті, а саме газу CO₂.

3. Встановлено збільшення швидкості горіння суміші, пропорційно до збільшення відсоткового вмісту водню, шляхом аналізу впливу добавки водню на характер та тривалість згоряння, що позитивно впливає на перетікання робочого процесу, і як наслідок підвищує індикаторні показники двигуна.

4. Розрахунки доводять позитивний вплив добавки водню до бензину, що зумовлює зниження вмісту CO₂ у відпрацьованих газах до 30% при додаванні водню $\psi = 10\%$ по масі палива.

Дослідження виконано за грантової підтримки Національного фонду досліджень України в рамках проекту 2023.04/0124 «Поліпшення тактико-техніч-

них характеристик вітчизняних БПЛА шляхом розробки авіаційного двигуна з перспективними показниками питомої потужності».

The research was carried out with the grant support of the National Research Foundation of Ukraine within the framework of the project 2023.04/0124 "Improving the tactical and technical characteristics of domestic UAVs by developing an aircraft engine with promising specific power indicators."

Список літератури:

1. Біла Книга Європейської Комісії – План розвитку єдиного європейського транспортного простору – на шляху до конкурентоспроможної та ресурсоефективної транспортної системи. // Видавн. центр ЄС в Люксембурзі, 2011. – 28 с. https://brdo.com.ua/wp-content/uploads/2016/01/1_Bila-knyga-transport-plan-rozvytku-yedynogo-yevropey-skogo-transportnogo-prostoru-na-shlyahu-do-konkuretnospromozhnoi-ta-resursoefektyvnoi.pdf.
2. Аналіз і математичне моделювання процесу згоряння водню в чотиритактному одноциліндровому двигуні з іскровим запалюванням / А. П. Марченко, А. А. Осетров, І. Дубей та ін. // Двигуни внутрішнього згоряння. - 2010. - № 1. - С. 24-28.
3. Тимошевський, Б.Г. Поліпшення робочих характеристик дизельних двигунів за допомогою додавання водню / Б.Г. Тимошевський, М.Р. Ткач, Д.О. Шалапо // Водний транспорт. – 2018. – № 1 (27). – С. 24-28. <https://doi.org/10.33298/2226-8553/2018.1.27.03>.
4. Пат. 64479 Україна, МКІ F02B 43/00. Спосіб подачі водню до основного палива двигуна внутрішнього згоряння / Кузьменко Анатолій Петрович, Кабанов Олександр Миколайович, Дзюбенко Олександр Андрійович, Липинський Михайло Сергійович; власники: Харків. нац. автомоб.-дор. ун-т, Кузьменко Анатолій Петрович, Кабанов Олександр Миколайович, Дзюбенко Олександр Андрійович, Липинський Михайло Сергійович. - N и 2011 04348; заявл. 11.04.2011; опубл. 10.11.2011, Бюл. N 21. - 4 с. 5. Shudo, T. Thermal Efficiency Analysis in a Hydrogen Premixed Combustion Engine [Текст] / T. Shudo, Y. Nakajima, T. Futakuchi // JSAE Review. – Vol 21. – pp. 177-182, 2000.
6. Das L. Exhaust Emission Characterization of Hydrogen-Operating Engine System: Nature of Pollutants and Their Control Techniques [Текст] / L. Das // International Journal of Hydrogen Energy. – Vol 16. – No. 11. – pp. 765-775, 1991.
7. Біле І.І. Нове про робочі цикли двигунів. – М. – Свердловськ: Машигіз, 1962. – 272 с.
8. Застосування водню в бензинових двигунах / Міценко А.І. – Київ: Наук. думка, 1984. – 143 с.
9. Woschni, G. Eine Methode zur Vorausberechnung der Änderung des Brennverlaufs mittelschnellaufender Dieselmotoren bei geänderten Betriebsbedingungen / G. Woschni, F. Anisitiis // MTZ. – 1973. – № 4. – S. 160–165.
10. Стечкін Б.С., Генкін К.І., Золотаревський В.С., Сквородинський І.В. Індикаторна діаграма, динаміка тепловиділення та робочий цикл швидкохідного поршневого двигуна. – М.: Видавництво АН СРСР, 1960. 199 с.
11. Талда Г.Б. Підвищення паливної економічності та зниження токсичності бензинових двигунів добавкою водню до бензину // Дисертація на здобуття наукового ступеня канд. техн. наук. - Харків, 1984. - 213 с.
12. Воїнов А.Н. Згоряння в швидкохідних поршневих двигунах. – 2 вид., переп. та доп. – М.: «Машинобудування», 1977. – 277 с.
13. Генкін К.І. Газові двигуни. – М.: «Машинобудування», 1977. – 193 с.
14. Мо-

розов К.А., Черняк Б.Я., Синельников Н.І. Особливості робочих процесів високооберткових карбюраторних двигунів. – М.: «Машинобудування», 1973. – 99 с. 15. Результати дослідження газового двигуна, що працює з постійною добавкою водню в паливі / Р. Маамрі [та ін] // Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ": зб. наук. тр. Темат. вип. : Нові рішення у сучасних технологіях - Харків: НТУ "ХПІ". - 2011. - № 43. - . 61-69. 16. Тимошевський Б. Г. Характеристики процесу згоряння двигуна 2Ч 7,2/6 з добавками до 65% синтез-газу до бензину / Б. Г. Тимошевський, М. Р. Ткач, О. С. Познанський, О. С. Митрофанов, О. Ю. Прокурін // Двигуни внутрішнього згоряння. - 2015. - №1. - С. 33-37. 17. Avramenko A.M. Prospects of Using Hydrogen Microaddition to Improve Diesel Engine Ecological Indicators / Avramenko A.M., Lievtierov A.M., Bhansev V.M., Hladkova N.Yu., Kirieieva V.M. // Проблеми машинобудування. — 2019. — Т. 22, № 2. — С. 70-75. <https://doi.org/10.15407/pmach2019.02.070>. 18. Lejsek D. Mixture Formation and Combustion in a Passenger Car Engine with Low Pressure H₂ Direct Injection / D. Lejsek, D. Seboldt, J. Geiler, P. Leick, M. Frank and K. Stapf // 19th Symposium "Sustainable Mobility, Transport and Power Generation", Graz, 2023.

Bibliography (transliterated):

1. White Paper of the European Commission - Plan for the Development of a Single European Transport Area - Towards a competitive and resource-efficient transport system. [Bila Knyha Yevropeiskoi Komisii – Plan rozvytku yedynoho yevropeiskoho transportnoho prostoru – na shliakhu do konkurentospromozhnoi ta resursoefektyvnoi transportnoi systemy], EU Publishing Center in Luxembourg, 2011, pp. 28. https://brdo.com.ua/wp-content/uploads/2016/01/1_Bilaknyga-transport-plan-rozvytku-yedynoho-yevropey-skogo-transportnoho-prostoru-na-shlyahu-do-konkuretnospromozhnoi-ta-resursoefektyvnoi-.pdf. 2. Marchenko A. P., Osetrov A. A., Dubey I. (2010), Analysis and mathematical modeling of hydrogen combustion in a four-stroke single-cylinder engine with spark ignition [Analiz i matematychni modeliuvannya protsesu zghoriannya vodniu v chotyrytaktomui odnotsyndrovomu dyvuhuni z iskrovym zapaliuvanniam], Internal Combustion Engines, No 1, pp. 24-28. 3. Tymoshevskiy, B.G. (2018), Improvement of the performance of diesel engines by adding hydrogen [Polipshennia robochykh kharakterystyk dyzelykh dyvuhuniv za dopomohoiu dodavannya vodniu] / B.G. Tymoshevskiy, M.R. Tkach, D.O. Shalapk, Water Transport, No. 1 (27), pp. 24-28. <https://doi.org/10.33298/2226-8553/2018.1.27.03>. 4. Pat. 64479 Ukraine, ICI F02B 43/00. Method for supplying hydrogen to the main fuel of an internal combustion engine / Kuzmenko Anatoliy Petrovych, Kabanov Oleksandr Mykolaiovych, Dziubenko Oleksandr Andriiovych, Lypynskiy Mykhailo Serhiyovych ; owners: Kharkiv National

Automobile and Highway University, Kuzmenko Anatoliy Petrovych, Kabanov Oleksandr Mykolaiovych, Dziubenko Oleksandr Andriiovych, Lypynskiy Mykhailo Serhiyovych. - Nu 2011 04348; application for examination filed April 11, 2011; published November 10, 2011, Bulletin. N 21. - 4 p. 5. Shudo, T. (2000), Thermal Efficiency Analysis in a Hydrogen Premixed Combustion Engine, JSAE Review, No 21, pp. 177-182. 6. Das, L. (1991), Exhaust Emission Characterization of Hydrogen-Operating Engine System: Nature of Pollutants and Their Control Techniques, International Journal of Hydrogen Energy, Vol 16, No. 11, pp. 765-775. 7. Vibe I.I. (1962), New about engine duty cycles [Nove pro robochi tsyky dyvuhuniv], Sverdlovsk: Mashgiz, p. 272. 8. Mishchenko A.I. (1984), Use of hydrogen in gasoline engines [Zastosuvannia vodniu v benzynovykh dyvuhunakh], Kyiv: Nauk. dumka, pp. 143 p. 9. Woschni, G. (1973), Eine Methode zur Vorausberechnung der Anderung des Brennverlaufs mittelschnellauflender Dieselmotoren bei geanderten Betriebsbedingungen, MTZ, No. 4, pp. 160–165. 10. Stechkin B.S., Genkin K.I., Zolotarevskiy V.S., Skovorodynskiy I.V. (1960), Indicator diagram, dynamics of heat release and operating cycle of a high-speed piston engine [Indykatorna diahrama, dynamika teplovydillennia ta robochyi tsykl shvydkokhidnoho porshnevoho dyvuhuna], Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, pp. 199. 11. Talda G.B. (1984), Increasing fuel efficiency and reducing the toxicity of gasoline engines by adding hydrogen to gasoline Ph. D. [Pidvyshchennia palyvnoi ekonomichnosti ta znyzhennia toksychnosti benzynovykh dyvuhuniv dobavkoiu vodniu do benzynu], Kharkiv, pp. 213. 12. Voinov A.N. (1977), Combustion in high-speed piston engines [Zghoriannya v shvydkokhidnykh porshnevnykh dyvuhunakh], 2 ed., rev. and additional, Mashinobuduvaniya, pp. 277. 13. Genkin K.I. (1977), Gas engines [Hazovi dyvuhuni], Machine Building, pp. 193. 14. Morozov K.A., Chernyak B.Ya., Synelnikov N.I. (1973), Features of working processes of high-speed carburetor engines [Osoblyvosti robochykh protsesiv vysokoobertovykh karbiuratornykh dyvuhuniv.], Machine Building, pp. 99. 15. Maamri R. (2011), Research results of a gas engine operating with a constant addition of hydrogen in the fuel [Rezultaty doslidzhennia hazovoho dyvuhuna, shcho pratsiue z postiinoiu dobavkoiu vodniu v palyvi], Visnyk Nat. technical "KhPI" University: Coll. of science tr. Subject. issue : New solutions in modern technologies, Kharkiv: NTU "KhPI", No. 43, pp. 61-69. <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/14975>. 16. Tymoshevskiy, B. G. (2015), Characteristics of the combustion process of the 2Ch 7.2/6 engine with additives up to 65% of synthesis gas to gasoline [Kharakterystyky protsesu zghoriannya dyvuhuna 2Ch 7,2/6 z dobavkamy do 65% syntez-hazu do benzynu], Internal Combustion Engines, No 1, pp. 33-37. 17. Avramenko A.M., Lievtierov A.M., Bhansev V.M., Hladkova N.Yu., Kirieieva V.M. (2019), Prospects of Using Hydrogen Microaddition to Improve Diesel Engine Ecological Indicators, Problems of machine building, No 2, pp. 70-75. <https://doi.org/10.15407/pmach2019.02.070>. 18. Lejsek D., Seboldt D., Geiler J., Leick P., Frank M. and Stapf K. (2023), Mixture Formation and Combustion in a Passenger Car Engine with Low Pressure H₂ Direct Injection, 19th Symposium "Sustainable Mobility, Transport and Power Generation", Graz.

Надійшла до редакції 29.07.2024 р.

Марченко Андрій Петрович – доктор техн. наук, професор, проректор з наукової роботи Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: marchenko@kpi.kharkov.ua, orcid.org/0000-0001-9746-4634

Мищенко Микита Тимофійович – аспірант кафедри двигунів та гібридних енергетичних установок Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: mykyta.mishchenko@gmail.com, orcid.org/0000-0002-1265-8155

RESEARCH OF THE COMBUSTION PARAMETERS OF GASOLINE WITH ADDITIONAL HYDROGEN IN A SPARK-IGNITION ENGINE IN EXTERNAL SPEED CHARACTERISTIC MODES

A.P. Marchenko, M.T. Mishchenko

The directions of development and improvement of road transport around the world are inextricably linked to the desire to reduce the use of cars "on traditional fuels" due to limited oil and environmental safety of mankind. Since the modes of external speed characteristic are the most typical for the operation of cars in cities, the study of environmental performance of engines in these modes is an urgent task. Therefore, finding ways to reduce carbon dioxide emissions from automobile engines at high-speed modes is an urgent task. The rapid growth in the number of cars with internal combustion engines and the inevitable decline in world oil reserves necessitate the development and implementation of energy-saving technologies and the use of alternative fuels.

Research aimed at finding ways to improve the fuel efficiency and environmental performance of automotive engines is relevant. One of the promising areas is the influence on the combustion process in gasoline engines by using additives of alternative fuels, which include hydrogen. The presented study of the parameters of combustion of gasoline with hydrogen additive in a spark ignition engine at external speed characteristics is a comprehensive analysis of the combustion process of a gasoline-hydrogen mixture and determination of its effect on the concentration of carbon dioxide in exhaust gases by developing a mathematical model that takes into account the composition of the mixture components and features of the combustion process, allows for sufficiently accurate calculation of the operating process of an engine with hydrogen additive at $\psi \leq 10\%$, its identification by the results of experiments. In the course of the study, dependencies were developed to determine the combustion parameters of the Wiebe model, taking into account the addition of hydrogen to gasoline in the modes of external speed characteristics, and the effect of hydrogen addition on the concentration of CO₂ in exhaust gases was analyzed. It is shown that with an increase in the hydrogen additive to 10% by mass fraction to gasoline, there is a decrease in CO₂ emissions to almost 30% in the external speed characteristic modes, which corresponds to modern environmental standards for gasoline internal combustion engines.

Keywords: internal combustion engine; hydrogen; working process; carbon dioxide emissions; mathematical model; combustion parameters; indicator diagram; heat release characteristic.