

М.Р. Ткач, Б.Г. Тимошевський, О.С. Митрофанов, А.Ю. Проскурін, А.С. Познанський

ОСОБЛИВОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЗГОРЯННЯ СИНТЕЗ-ГАЗУ В ПОРШНЕВИХ ДВИГУНАХ

Метою роботи є аналіз особливостей робочого процесу у двигунах внутрішнього згоряння при використанні синтетичного газу зі значним вмістом водню. На теперішній час ефективне використання синтетичного газу дозволяє використати енергетичні ресурси спиртових палив та суттєво підвищити екологічні показники двигунів. Крім того, виробництво синтетичного газу на борту транспортного засобу певним чином дозволяє підвищити паливну економічність двигуна за рахунок використання енергії випускних газів. У статті розглянуто особливості процесу згоряння синтез-газу у робочому циліндрі двигуна внутрішнього згоряння з іскровим запалюванням. Метою дослідження також є оцінка параметрів тепловиділення синтез-газу. Найбільш суттєвим результатом є отримання залежностей для визначення поточного значень показника характеру згоряння τ і тривалості згоряння ϕ_z в моделі тепловиділення професора І. І. Вібе для двигунів з іскровим запалюванням, що працюють на синтез-газі з діапазоном зміни коефіцієнта надлишку повітря α (1,0...2,2) та варіюванням вмісту водню у складі палива 30...100 % за об'ємом. Встановлено змінність показника згоряння τ (1,6...5,5) у напівемпіричній моделі тепловиділення професора І. І. Вібе, що у більшою мірою відповідає реальному закону тепловиділення при експериментальних дослідженнях. Запропоновані залежності для визначення τ і ϕ_z дозволяють врахувати особливості процесу згоряння синтез-газу в двигунах з іскровим запалюванням і тим самим значно підвищити точність визначення індикаторного тиску в робочому циліндрі (відносна середньоквадратична похибка не перевищує 4,5%). Виконані дослідження та математичне моделювання різних типорозмірів двигунів дозволили встановити можливий діапазон зміни показника характеру згоряння τ моделі професора І. І. Вібе, який становить 1,6...5,5. Отримані результати досліджень можуть бути використані при проектуванні та конструюванні нових двигунів з іскровим запалюванням, що працюють на альтернативному паливі, або конвертації вже існуючих, а також для уточнення математичної моделі процесу згоряння.

Ключові слова: синтетичний газ; робочий процес; тепловиділення; показники згоряння; індикаторний тиск, експеримент; поршневі двигуни; математична модель.

Вступ

У всіх промислово розвинених країнах щороку зростає інтерес до проблеми зниження споживання палива тепловими двигунами. Це зумовлено численними недоліками використання невідновлюваних джерел енергії, серед яких найбільш суттєвими є економічні та екологічні аспекти. З економічної точки зору, вартість виробництва 1 кВт енергії з органічного палива постійно зростає через скорочення його запасів і ускладнення процесів видобутку. З екологічного боку, застосування такого палива спричиняє забруднення довкілля продуктами згоряння, а також призводить до підвищення концентрації парникових газів в атмосфері — явища, що має загрозливу динаміку в останні роки. Сукупність цих чинників стимулює активне впровадження альтернативних палив у сфері енергетики та транспорту.

Перспективними видами рідких альтернативних видів палив є спирти (метиловий, етиловий), біодизель, а газоподібних — водень і водневмісний газ (синтез-газ) [1, 2]. Застосування цих видів палива в транспортних енергетичних установках з двигунами внутрішнього згоряння (ДВЗ) обумовлено необхідністю внесення певних конструктивних змін енергетичної установки, а також змін організації робочого циклу. Особливо це стосується застосування в енергетичних установках водню та синтез-газу. Незважаючи на всі труднощі, що пов'язані із застосуванням водню, перспективність його використання як

палива для ДВЗ підтверджується значною кількістю досліджень та реалізованих проєктів енергетичних установок [3, 4].

Водень має специфічні фізико-хімічні властивості, що безпосередньо впливають на особливості процесу згоряння в циліндрі ДВЗ. Навіть незначні добавки водню до інших видів палива суттєво впливають на властивості суміші, процес згоряння та показники роботи двигуна [5, 6]. Зокрема, водень має низьку щільність (що значно впливає на енергоємність паливоповітряного заряду), високу швидкість згоряння (100...115 м/с), має широкі межі запалення і низьку енергію займання. Ці та інші властивості зумовлюють відмінності характеристики тепловиділення, і, відповідно, її математичної моделі від характеристики бензинового двигуна.

Так, у роботі [7] професора А. П. Марченка було проаналізовано особливості процесу згоряння водню, а також запропоновано один із способів математичного опису характеристик тепловиділення в ДВЗ із іскровим запалюванням.

Постановка задачі

Більшість існуючих публікацій та досліджень пов'язана з використанням саме водню, як палива або його добавок до основного палива. При цьому процес згоряння синтез-газу, вплив його складу (переважно суміш таких газів, як H_2 , CO , CO_2 , CH_4 [8, 9]), а також коефіцієнта надлишку повітря α на характеристики тепловиділення в двигунах з іскровим

запалюванням розкриті не в повній мірі, а наявні доступні дані можна використовувати тільки в якості первинної оцінки процесу тепловиділення при моделюванні робочого циклу ДВЗ.

Мета даної роботи є аналіз динаміки тепловиділення при використанні водневмісного газу та розробка адекватної математичної моделі, яка враховує особливості даного процесу.

Виклад основного матеріалу

Аналіз динаміки тепловиділення для ДВЗ із іскровим запалюванням, що працюють на синтез-газі, здійснюється методами математичного та фізичного моделювання. Правильно організований експеримент дає змогу отримати реальну картину процесів, що відбуваються в циліндрі ДВЗ, а математичне моделювання дозволяє суттєво прискорити та здешевити процес проектування і створення нового двигуна. Однак через складність опису процесу згоряння, для забезпечення точності та надійності результатів, отриманих під час математичного моделювання, до моделі необхідно додати емпіричні залежності та коефіцієнти.

В основу дослідження покладено власні результати експериментів для різних типорозмірів чотиритактних поршневих двигунів із іскровим запалюванням – 4Ч 8,2/7 [10], 2Ч 7,2/6 [11], а також відомі дані інших авторів [2, 3]. Це дозволяє надати більш узагальнені рекомендації щодо опису динаміки процесу тепловиділення у ДВЗ із іскровим запалюванням, що працюють на синтез-газі.

На сьогодні розроблено досить велику кількість моделей розрахунку процесу тепловиділення. Так, низка дослідників (Н. В. Іноземцев, В. К. Кошкін, М. М. Глагольєв, В. І. Сороко-Новіцький та ін.) пропонує використовувати для розрахунку швидкості згоряння в двигунах із іскровим запалюванням швидкість переміщення фронту полум'я [12, 13]. В основі моделі лежить постулат М. Гюї про те, що кількість паливної газової суміші, яка запалюється одиницею поверхні фронту полум'я за одиницю часу, є сталою величиною ($V/F = \text{const}$, де V — об'ємна витрата паливної суміші за одиницю часу; F — площа фронту полум'я), а також припущення, що поверхня фронту полум'я має сферичну форму. Проте, як свідчать експериментальні дані, фронт має неправильну форму, і швидкість його поширення є змінною на різних ділянках згоряння. Варто зазначити, що насправді в робочому циліндрі ДВЗ реакція згоряння не завершується в дуже вузькій зоні полум'я (як це відбувається в ламінарному потоці), тому уявлення поверхні фронту полум'я як реакційної поверхні призводить до неточностей у розрахунках характеристики тепловиділення. Також ускладненим є визначення зміни площі реакційної

поверхні зі зміщенням фронту полум'я та нормальної швидкості самого фронту полум'я, від якої залежить масова швидкість згоряння. Ще одним чинником, що впливає на точність визначення характеристики тепловиділення, є коректний облік впливу турбулентності суміші залежно від частоти обертання двигуна, що є доволі складним завданням [14].

Також для опису процесу згоряння в поршневих двигунах досить широко застосовуються розроблені ще у ХХ столітті емпіричні та напівемпіричні моделі (Б. М. Гончара, Б. П. Пугачова, К. Неймана, І. І. Вібе та ін.), які описують характер зміни кривої тепловиділення в робочому циліндрі ДВЗ. Такі моделі вирізняються відносною простотою опису та універсальністю, а також є придатними для аналізу динаміки і розрахунку тепловиділення в циліндрі ДВЗ із іскровим запалюванням, що працює на синтез-газі. Серед відомих моделей найбільшого поширення набула модель професора І. І. Вібе, у якій відносна швидкість згоряння та частка згорілого палива описуються такими напівемпіричними залежностями [12]:

$$\frac{dx}{d(\varphi)} = -C \frac{(m+1)}{\varphi_z} \left(\frac{\varphi}{\varphi_z} \right)^m \exp \left[C \left(\frac{\varphi}{\varphi_z} \right)^{m+1} \right],$$

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

де φ — поточний кут повороту колінчастого валу двигуна; φ_z — кут тривалості процесу згоряння; m — емпіричний коефіцієнт характеру згоряння (визначає динаміку згоряння); $C = \ln[1-x_z]$, x_z — частка згорілого палива на момент закінчення процесу згоряння).

Для проведення аналізу динаміки тепловиділення та побудови його математичної моделі для ДВЗ із іскровим запалюванням, що працюють на синтез-газі, було виконано експериментальні дослідження двигунів різних типорозмірів за різних умов роботи, а також отримано індикаторні діаграми.

Для забезпечення збігу розрахункової та експериментальної індикаторних діаграм, залежно від типу двигуна та умов його роботи, підбирають значення параметрів m та φ_z . Ці параметри в моделі І. І. Вібе для дизельних і бензинових двигунів обираються з відомого діапазону та задаються як постійні величини.

Під час математичного моделювання особливий інтерес становить саме показник характеру згоряння, який відображає зміну в часі відносної щільності ефективних центрів у процесі згоряння. Так, при використанні синтез-газу застосування постійного значення m призводить до значних відхилень

між експериментальними та розрахунковими кривими, що чітко спостерігається, наприклад, при порівнянні експериментальних і розрахункових індикаторних діаграм (рис. 1) для різних режимів роботи двигуна з іскровим запалюванням 2Ч 7,2/6 за умов 43 % вмісту H_2 за об'ємом.

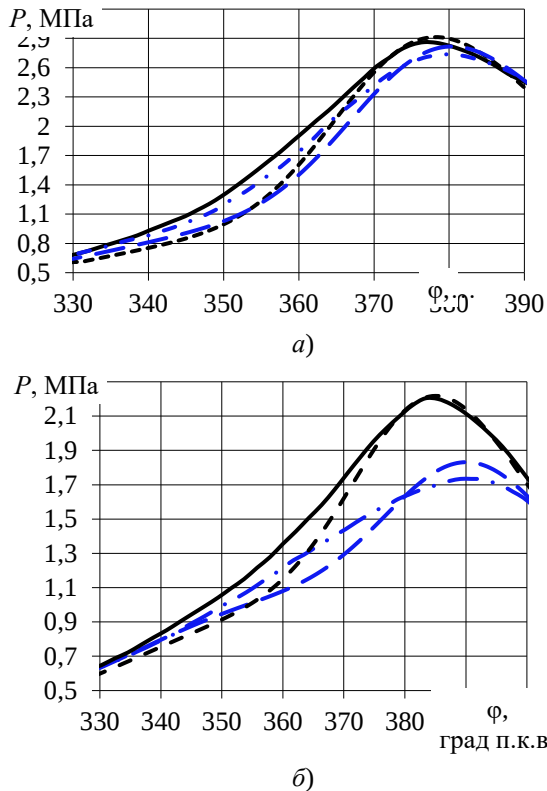


Рис. 1. Порівняння експериментальних і розрахункових фрагментів індикаторних діаграм, що відповідають процесу згоряння синтез-газу за різних значень коефіцієнта надлишку повітря α : а — експеримент ($\alpha = 1,34$), --- розрахунок ($\alpha = 1,34$); — експеримент ($\alpha = 1,49$), --- розрахунок ($\alpha = 1,49$); б — експеримент ($\alpha = 1,63$), --- розрахунок ($\alpha = 1,63$); — експеримент ($\alpha = 1,96$), --- розрахунок ($\alpha = 1,96$)

Значення показника характеру згоряння m та тривалості φ_z при математичному моделюванні (рис. 1) підбиралися на основі досягнення мінімального значення середньоквадратичного відхилення показника індикаторного тиску. Максимальне значення відносної середньоквадратичної похибки визначення тиску в циліндрі залежно від коефіцієнта надлишку повітря та режиму роботи ДВЗ становило до 12,5%, а значення середньоквадратичного відхилення — 80,2 кПа. При цьому довірчий інтервал з імовірністю 0,95 становив $\pm 157,1$ кПа.

Діапазон, з якого обиралися значення показника m , становив 1,6...5,5. При використанні мінімальних значень діапазону спостерігається збіг кри-

вої тиску в першій половині згоряння та значне відхилення у другій, а при використанні максимальних — відхилення на початковій фазі згоряння та збіг у кінцевій. Тобто фактично згоряння синтез-газу в циліндрі двигуна відбувається більш інтенсивно на початковому етапі і менш інтенсивно наприкінці, тобто закон згоряння (або відносна швидкість тепловиділення) близький до трикутної форми.

Отже, можна зробити висновок, що показник характеру згоряння m для двигунів, які працюють на синтез-газі, має явно змінний характер і змінюється в діапазоні 1,6...5,5 протягом усього процесу згоряння паливоповітряної суміші. Рішенням задачі підвищення точності математичної моделі може стати застосування змінного значення показника характеру згоряння m . При цьому необхідно враховувати, що значення m залежить від ряду факторів, таких як використовуване паливо, спосіб запалювання паливоповітряної суміші, коефіцієнт надлишку повітря, режим роботи та багато інших. Для двигунів із іскровим запалюванням, які працюють на синтез-газі, факторами, що визначають динаміку тепловиділення, є коефіцієнт надлишку повітря α та склад газу (передусім вміст водню, який має високу швидкість згоряння). Відповідно, при розробці математичної моделі необхідно врахувати вплив цих факторів.

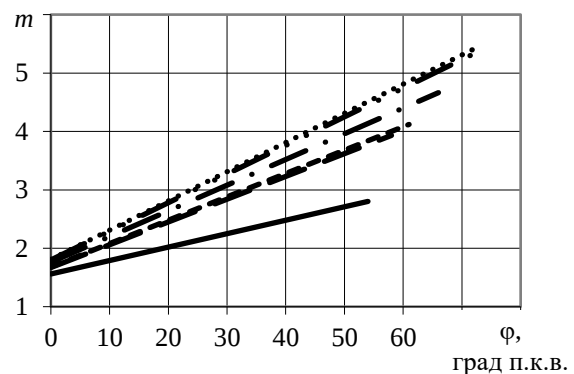


Рис. 2. Зміна характеристики показника згоряння m у процесі згоряння за різних значень коефіцієнта надлишку повітря: — $\alpha = 1,25$; --- $\alpha = 1,34$; - - - $\alpha = 1,49$; - · - · - $\alpha = 1,63$; · · · · · $\alpha = 1,88$; · · · · · $\alpha = 1,96$

На основі аналізу та обробки значної кількості експериментальних індикаторних діаграм різних двигунів, що працюють на синтез-газі з вмістом водню 30...100% за об'ємом, пропонується для знаходження змінного в процесі згоряння значення m (рис. 2) використовувати рівняння прямої:

$$m_i = a \cdot \varphi_i \cdot \frac{\varphi_z}{\varphi_z} + b,$$

де φ_i — поточне значення кута періоду згоряння; a ,

b – коефіцієнти рівняння прямої, що залежать від коефіцієнта надлишку повітря α (для діапазону зміни 1.0...2.2):

$$a = 0,2532 \cdot \alpha^3 - 1,2593 \cdot \alpha^2 + 2,0906 \cdot \alpha - 1,1149;$$

$$b = 0,659 \cdot \alpha^3 - 3,4831 \cdot \alpha^2 + 6,3403 \cdot \alpha - 2,1937.$$

Для визначення тривалості згоряння φ_z у моделі І.І. Вібе на основі експериментальних даних для різних значень концентрації водню пропонується таке рівняння:

$$\varphi_z = -10,186 \cdot \alpha^2 + 59,464 \cdot \alpha - 4,1447 - 434,6 \cdot C_{H_2}^3 + 1080,2 \cdot C_{H_2}^2 - 907,85 \cdot C_{H_2} + 225,19,$$

де C_{H_2} – концентрація водню у складі синтез-газу (зміст водню для діапазону 30...100% за об'ємом).

Виходячи з отриманих рівнянь для визначення m та φ_z , безрозмірна швидкість згоряння для двигунів із іскровим запалюванням, що працюють на синтез-газі, визначається таким чином:

$$\frac{dx}{d\varphi} = -\frac{C}{\varphi_z} \left(\frac{\varphi_i}{\varphi_z} \right)^{a\varphi_i+b} \cdot \exp C \left(\frac{\varphi_i}{\varphi_z} \right)^{a\varphi_i+b+1} \cdot \left(a\varphi_i \ln \left(\frac{\varphi_i}{\varphi_z} \right) + a\varphi_i + b + 1 \right).$$

Перевірка адекватності запропонованої моделі процесу тепловиділення може бути виконана шляхом порівняння експериментальних та розрахункових характеристик відносної швидкості згоряння на прикладі двигуна 2Ч 7,2/6 (рис. 3).

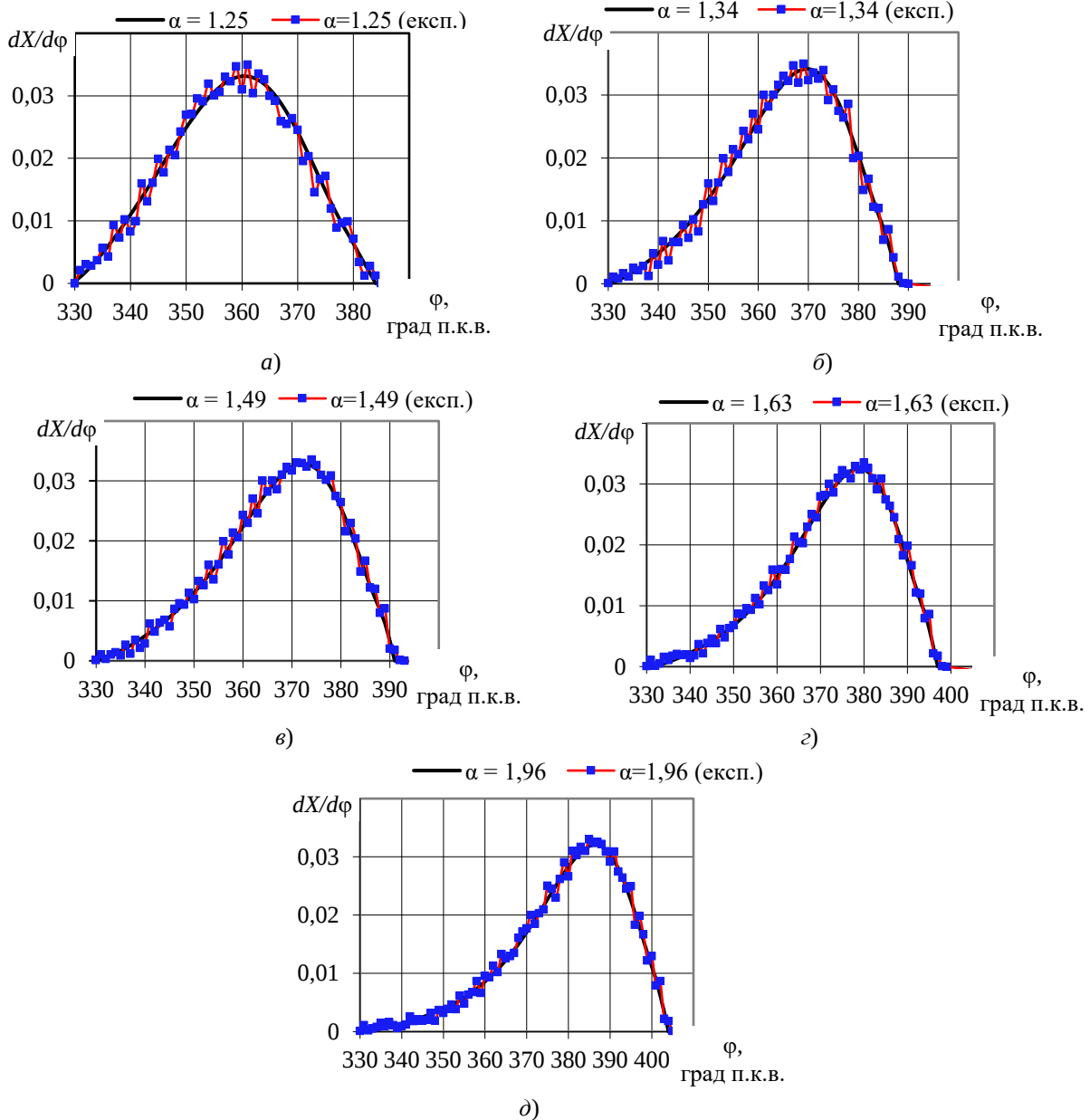


Рис. 3. Порівняння експериментальних і розрахункових відносних характеристик швидкості згоряння при використанні синтез-газу з різними значеннями коефіцієнта надлишку повітря α : а – $\alpha = 1,25$; б – $\alpha = 1,34$; в – $\alpha = 1,49$; г – $\alpha = 1,63$; д – $\alpha = 1,96$; — — розрахунок; $\square$ — експеримент

Застосування змінного показника характеру згоряння m та врахування впливу коефіцієнта надлишку повітря, а також вмісту водню в складі синтез-газу дозволило досягти високої узгодженості експериментальних і розрахункових кривих відносно швидкості згоряння паливоповітряної суміші. Це, у свою чергу, призводить до більш точного збігу індикаторного тиску в робочому циліндрі двигуна 2Ч 7,2/6 (рис. 4).

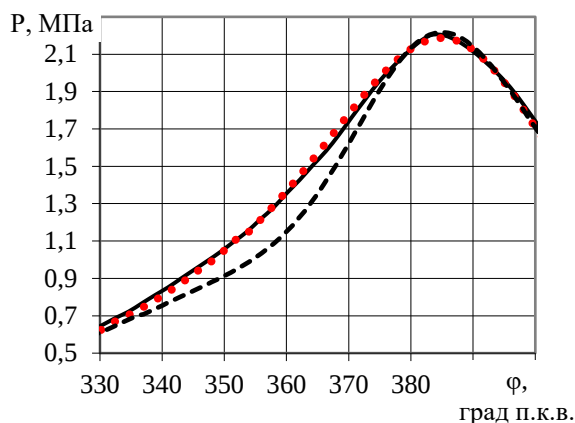


Рис. 4. Порівняння експериментального та розрахункових фрагментів індикаторних діаграм, що відповідають процесу згоряння синтез-газу з коефіцієнтом надлишку повітря $\alpha = 1,63$

— експеримент; - - - - - розрахунок при $m = \text{const}$; — розрахунок при $m = \text{var}$

При використанні запропонованих залежностей максимальна відносна середньоквадратична похибка визначення індикаторного тиску в циліндрі зменшується до 4,5 %, максимальне значення середньоквадратичного відхилення становить 27,6 кПа, а довірчий інтервал з імовірністю 0,95 не перевищує ± 54 кПа.

Висновки

Проведена оцінка параметрів тепловиділення при використанні синтез-газу в двигунах із іскровим запалюванням дала змогу оцінити характер зміни процесу згоряння та встановити його змінну закономірність (інтенсивне згоряння на початку процесу та уповільнене — в кінці). Таким чином, встановлено, що для двигунів із іскровим запалюванням, які працюють на синтез-газі, значення показника згоряння m у напівемпіричній моделі тепловиділення професора І. І. Вібе має змінний характер, що в більшій мірі відповідає реальному закону тепловиділення за результатами експериментальних досліджень.

Експериментальні дослідження та математичне моделювання різних типорозмірів двигунів дозволили встановити можливий діапазон зміни показника характеру згоряння m моделі професора І. І. Вібе, який становить 1,6...5,5.

Отримані залежності для визначення поточних значень m і тривалості згоряння φ_z для двигунів, що працюють на синтез-газі з діапазоном зміни коефіцієнта надлишку повітря 1,0...2,2 та варіюванням вмісту водню у складі палива 30...100 % за об'ємом.

Урахування особливостей процесу згоряння синтез-газу в двигунах з іскровим запалюванням дозволило суттєво підвищити точність визначення індикаторного тиску в циліндрі (відносна середньоквадратична похибка становила 4,5 %) і таким чином адекватно оцінювати енергетичні та економічні параметри роботи двигуна.

Список літератури:

1. Марченко А. П. Порівняльна оцінка ефективності застосування рослинних палив у дизельному двигуні / А. П. Марченко, А. А. Прохоренко, А. А. Осетров, В. Смайліс, В. Сечила // Двигуни внутрішнього згоряння. — 2004. — № 1. — С. 46-51.
2. Shudo T. Influence of Reformed Gas Composition on HCCI Combustion of Onboard Methanol-Reformed Gases [Text] / T. Shudo, T. Takahashi // SAE Technical Paper Series. — 2004. — 8-10 June. — P. 23-31. DOI:10.4271/2004-01-1908.
3. Verhelst S. A study of the combustion in hydrogen-fuelled internal combustion engines / Verhelst S. // Department of Flow, Heat and Combustion Mechanics, Ghent University, 2005. — 222 p.
4. Ma J. Simulation and prediction on the performance of a vehicle's hydrogen engine / J. Ma, Y. Su, Y. Zhou, Z. Zhang // Int. J. Hydrogen Energy. Vol. 28. — pp. 77-83, 2003. DOI: 10.1016/S0360-3199(02)00046-0.
5. Methods to improve the performance of diesel engines by adding hydrogen into high pressure line / B. G. Tymoshevskyy, M. R. Tkach, D. O. Shalapk, A. Y. Proskurin, O. S. Mytrofanov // Міжнародний журнал про інновації у суднобудуванні «Shipbuilding & marine infrastructure». — Миколаїв: НУК, 2018. — № 2 (10). — С. 87-91.
6. Tsujimura T. The utilization of hydrogen in hydrogen/diesel dual fuel engine [Text] / Tsujimura T., Suzuki Y. // International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 42. 2017. P. 14019-14029. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.06.081.
7. Аналіз і математичне моделювання процесу згоряння водню в чотиритактному одноциліндровому двигуні з іскровим запалюванням [Текст] / А. П. Марченко, А. А. Осетров, І. Дубей, Р. Маамри // Двигуни внутрішнього згоряння. — 2010. — № 1. — С. 24-28.
8. Ethanol steam reforming on Ni/Al₂O₃ catalysts: Effect of Mg addition / A. J. Vizcaino // International Journal of Hydrogen Energy. — 2008. — Vol 33. — P. 3489-3492. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2007.12.012.
9. Hydrogen from steam reforming of ethanol in low and middle temperature range for fuel cell application / J. Sun // International Journal of Hydrogen Energy. — 2004. Vol 29. — P. 1075-1081. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2003.11.004.
10. Analysis of the piston engine operation on ethanol with the synthesis-gas additives / Mytrofanov O., Proskurin A., Poznanskiy A. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. — 2018. — Vol. 4 (1-94). — p. 14-19. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.136380.
11. Ефективність двигуна 2 Ч 7,2/6 при роботі на бензині з добавками синтез-газу [Текст] / М. Р. Ткач, Б. Г. Тимошевецький, О. С. Митрофанов, А. С. Познанський, А. Ю. Проскурін // Двигуни внутрішнього згоряння: Всеукраїнський науково-технічний журнал. №2. — 2011. — 3-8 С.
12. Hosseini S. A developed quasi-dimensional combustion model in spark-ignition engines / S. Hosseini, R. Abdollah, A. Khani //

Materials of the World Congress on Engineering, 2–4 July [2008]. – London, 2008. – P. 158–163. 13. J.B. Heywood, "Internal Combustion Engine Fundamentals", Mc Graw Hill, 1988.

Bibliography (transliterated):

1. Marchenko, A.P., Prokhorenko, A.A., Osetrov, A.A., Smailis, V. and Senchyla, V. (2004), "Comparative assessment of the efficiency of using vegetable fuels in a diesel engine" ["Porivnialna otsinka efektyvnosti zastosuvannya roslynnykh palyv u dyzelnomu dvyhuni"], *Dvyhuny vnutrishnoho zghoriannia*, No. 1, pp. 46–51. 2. Shudo, T. and Takahashi, T. (2004), "Influence of Reformed Gas Composition on HCCI Combustion of Onboard Methanol-Reformed Gases", *SAE Technical Paper Series*, June 8–10, pp. 23–31. DOI: 10.4271/2004-01-1908. DOI:10.4271/2004-01-1908. 3. Verhelst, S. (2005), A study of the combustion in hydrogen-fuelled internal combustion engines, Department of Flow, Heat and Combustion Mechanics, Ghent University, 222 p. 4. Ma, J., Su, Y., Zhou, Y. and Zhang, Z. (2003), "Simulation and prediction on the performance of a vehicle's hydrogen engine", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 28, pp. 77–83. DOI: 10.1016/S0360-3199(02)00046-0. 5. Tymoshevskyy, B.G., Tkach, M.R., Shalapko, D.O., Proskurin, A.Y. and Mytrofanov, O.S. (2018), "Methods to improve the performance of diesel engines by adding hydrogen into high pressure line", *Shipbuilding & Marine Infrastructure*, No. 2(10), pp. 87–91. 6. Tsujimura, T. and Suzuki, Y. (2017), "The utilization of hydrogen in hydrogen/diesel dual fuel engine", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 42, pp. 14019–14029. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.06.081. 7. Marchenko, A.P.,

Osetrov, A.A., Dubey, I. and Maamri, R. (2010), "Analysis and mathematical modeling of hydrogen combustion in a four-stroke single-cylinder spark-ignition engine" ["Analiz i matematychnye modeliuvannia protsesu zghoriannia vodniu v chotyrytaktomni odnotsylindrovomu dvyhuni z iskrovym zapaliuvanniam"], *Dvyhuny vnutrishnoho zghoriannia*, No. 1, pp. 24–28. 8. Vizcaino, A.J., Arena, P., Baronetti, G., Carrero, A., Calles, J.A., Laborde, M. and Amadeo, N. (2008), "Ethanol steam reforming on Ni/Al₂O₃ catalysts: Effect of Mg addition", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 33, pp. 3489–3492. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2007.12.012. 9. Sun, J. (2004), "Hydrogen from steam reforming of ethanol in low and middle temperature range for fuel cell application", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 29, pp. 1075–1081. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2003.11.004. 10. Mytrofanov, O., Proskurin, A. and Poznanskiy, A. (2018), "Analysis of the piston engine operation on ethanol with the synthesis-gas additives", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 4, pp. 14–19. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.136380. 11. Tkach, M.R., Tymoshevskyy, B.G., Mytrofanov, O.S., Poznanskiy, A.S. and Proskurin, A.Y. (2011), "Efficiency of the two-cylinder four-stroke engine 7.2/6 when running on gasoline with synthesis gas additives" ["Efektyvnist dvyhuna 2 Ch 7.2/6 pry roboti na benzyni z dobavkamy syntez-hazu"], *Dvyhuny vnutrishnoho zghoriannia*, No. 2, pp. 3–8. 12. Hosseini, S., Abdolah, R. and Khani, A. (2008), "A developed quasi-dimensional combustion model in spark-ignition engines", *Proceedings of the World Congress on Engineering*, July 2–4, London, pp. 158–163. 13. Heywood, J.B. (1988), *Internal Combustion Engine Fundamentals*, McGraw-Hill, New York, 930 p.

Надійшла до редакції 15.06.2025 р.

Ткач Михайло Романович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інженерної механіки та технології машинобудування Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна, e-mail: mykhaylo.tkach@nuos.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-4944-7113>.

Тимошевський Борис Георгійович – доктор технічних наук, професор кафедри двигунів внутрішнього згоряння, установок та технічної експлуатації Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна, e-mail: borys.tymoshevskiy@nuos.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-4649-702X>.

Митрофанов Олександр Сергійович – доктор технічних наук, професор кафедри двигунів внутрішнього згоряння, установок та технічної експлуатації Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна, e-mail: mitrofanov.al.ser@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-3460-5369>.

Проскурін Аркадій Юрійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри двигунів внутрішнього згоряння, установок та технічної експлуатації Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна, e-mail: arkadii.proskurin@nuos.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-5225-6767>.

Познанський Андрій Станіславович – кандидат технічних наук, доцент кафедри інженерної механіки та технології машинобудування Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна, e-mail: andreypoznansky@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-4351-7504>.

FEATURES OF MODELING THE COMBUSTION PROCESS OF SYNTHESIS GAS IN PISTON ENGINES

M. Tkach, B. Tymoshevskiy, O. Mytrofanov, A. Proskurin, A. Poznanskiy

The purpose of the work is to analyze the features of the working process in internal combustion engines when using synthetic gas with significant hydrogen content. At present, the effective use of synthetic gas allows you to use the energy resources of alcohol fuels and significantly increase the environmental performance of engines. In addition, the production of synthetic gas on board a vehicle in a certain way allows you to increase the fuel efficiency of the engine by using the energy of exhaust gases. The article considers the features of the combustion process of synthesis gas in the working cylinder of an internal combustion engine with spark ignition. The purpose of the study is also to estimate the parameters of heat release of synthesis gas. The most significant result is to obtain dependencies for determining the current values of the combustion character indicator m and the combustion duration φ_z in the heat release in professor's I. I. Wiebe model for spark-ignition engines operating on synthesis gas with a range of changes in the excess air coefficient α (1.0...2.2) and a variation in the hydrogen content in the fuel composition of 30...100% by volume. The variability of the combustion index m (1.6...5.5) in the semi-empirical heat release in professor's I. I. Wiebe model has been established, which largely corresponds to the real law of heat release in experimental studies. The proposed dependencies for determining m and φ_z allow us to take into account the peculiarities of the combustion process of synthesis gas in spark-ignition engines and thereby significantly increase the accuracy of determining the indicator pressure in the working cylinder (the relative root-mean-square error does not exceed 4.5%). The conducted studies and mathematical modeling of various engine sizes allowed us to establish a possible range of changes in the combustion character index m in professor's I. I. Wiebe model, which is 1.6...5.5. The obtained research results can be used in the design and construction of new spark-ignition engines operating on alternative fuels, or the conversion of existing ones, as well as to refine the mathematical model of the combustion process.

Keywords: synthetic gas; working process; heat release; combustion parameters; indicator pressure; experiment; piston engines; mathematical model.