

УДК 621.431

Б.Г. ТИМОШЕВСЬКИЙ, М.Р. ТКАЧ, О.С. МИТРОФАНОВ*Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, Миколаїв, Україна***МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЗГОРЯННЯ СИНТЕЗ-ГАЗУ
У ЦИЛІНДРІ ДВЗ**

Наведена математична модель процесу згоряння синтез-газу в поршневих двигунах з іскровим запаленням. Відмінною особливістю моделі є врахування швидкості розповсюдження фронту полум'я у циліндрі в залежності від складу синтез-газу. Докладно описаний спосіб визначення площі фронту полум'я, а також об'єму вигорілого синтез-газу в залежності від геометричних особливостей камери згоряння та швидкості вигорання синтез-газу. Встановлена адекватність цієї моделі шляхом порівняння результатів математичного моделювання та відомих експериментальних даних. Розбіжність цих результатів не перевищує 8%, що досить прийнятне при моделюванні робочих процесів ДВЗ.

Ключові слова: синтез-газ, альтернативне паливо, фронт полум'я, швидкість згоряння, парова конвекція, параметри робочого процесу.

Постановка проблеми

На кафедрі двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) Національного університету кораблебудування під керівництвом професора Ю.Л. Мошечева розроблена математична модель робочого циклу двигуна, яка досить адекватно відображає реальні процеси у двигунах, що працюють на стандартному дизельному паливі. Використання її для визначення параметрів ДВЗ, що працює на синтез-газі, не є прийнятним. Насамперед це пов'язане з процесами тепловиділення, які базуються на об'ємному законі вигорання та описується напівемпіричним рівнянням І.І. Вібе. До основних недоліків останнього належать: для розрахунку двигуна, що працює на синтез-газі, потрібні експериментальні дані (загальна тривалість згоряння φ_z й емпіричний коефіцієнт характеру згоряння m); немає чіткого взаємозв'язку складу синтез-газу зі швидкістю згоряння компонентів. Варто відзначити, що об'ємний закон вигорання не враховує реальної геометрії фронту полум'я та геометрії камери згоряння, а також розташування джерела запалення.

Для ДВЗ, які працюють на синтез-газі, більш прийнятною є модель, яка враховує швидкість згоряння кожного компонента газу та враховує геометрію камери згоряння. Однак існуюча модель є достатньо придатною для подальшого удосконалення з метою врахування необхідних чинників і особливостей при згорянні синтез-газу різного складу в двигунах з примусовим іскровим запаленням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Попередній аналіз показав, що для двигунів з іскровим запаленням досить часто використовується напівем-

піричне рівняння І.І. Вібе, навіть у двозонних моделях робочого циклу ДВЗ [1–5]. Воно набуло досить широкого поширення завдяки своїй простоті та задовільній точності при використанні звичайних видів палива. Але для випадку застосування синтез-газу, складовими якого є водень, оксид вуглецю, метан, ацетилен та ін., більш доцільним є використання моделі, яка б враховувала швидкість згоряння кожного з компонентів [2, 6].

Мета даної роботи – розробка адекватної математичної моделі процесу згоряння синтез-газу, яка враховує швидкість розповсюдження фронту полум'я, геометрію камери згоряння, розташування джерела запалення, а також враховує вплив складу синтез-газу на процеси згоряння.

2. Виклад основного матеріалу

Маса заряду, яка згоріла в певний проміжок часу, може бути розрахована за наступним рівнянням [2]:

$$\frac{dM_b}{dt} = \rho_u A_f w_T,$$

де ρ_u – густина газу в зоні свіжого заряду; A_f – площа поверхні фронту полум'я; w_T – турбулентна швидкість розповсюдження фронту полум'я.

Турбулентна швидкість розповсюдження фронту полум'я залежить від ламінарної швидкості згоряння синтез-газу та може бути представлена залежністю [2, 7, 8]

$$w_T = f \cdot w_H, \quad (1)$$

де f – коефіцієнт, що враховує турбулізацію потоку.

Коефіцієнт f у рівнянні (1) може бути визначе-

ний за залежністю, запропонованою у [2]:

$$f = 1 + 0,002 \cdot n,$$

де n – кількість обертів колінчастого вала двигуна.

Нормальна швидкість розповсюдження полум'я залежить тільки від молекулярних характеристик суміші. Значення максимальної нормальної швидкості може бути отримане за формулою [9]

$$w_{n \max} = \frac{C_1 w_1 + C_2 w_2 + C_n w_n}{C_1 + C_2 + C_n}, \quad (2)$$

де C_1, C_2, C_n – вміст компонентів у синтез-газі; w_1, w_2, w_n – відповідно максимальне значення нормальної швидкості розповсюдження полум'я для суміші кожного компоненту з повітрям.

Формула (2) більш придатна для суміші газів з малим вмістом баласту (не більш 5%). За наявності у синтез-газі баласту (CO_2, N_2) більше ніж 5% необхідно визначати нормальну швидкість розповсюдження полум'я без баласту, а потім корегувати значення відповідно до формули [9]

$$w_{н.б.} = w_n (1 - 0,01 \cdot N_2 - 0,012 \cdot \text{CO}_2),$$

де N_2, CO_2 – вміст азоту та двоокису вуглецю у складі синтез-газу.

Для синтез-газу відомого складу нормальна швидкість розповсюдження полум'я є фізико-хімічною характеристикою та залежить від температури й тиску. Залежність нормальної швидкості від тиску та температури має вигляд [1–3, 5]:

$$w_n = w_{н.о} \left(\frac{T}{T_0} \right)^a \left(\frac{P}{P_0} \right)^b (1 - 2,1\gamma_r),$$

де $w_{н.о}$ – нормальна швидкість розповсюдження фронту полум'я при абсолютній нормальній початковій температурі; T_0, P_0 – абсолютні початкові температура та тиск синтез-газу відповідно; T, P – відповідно температура підігріву синтез-газу та надлишковий тиск; γ_r – коефіцієнт залишкових газів; $a = 2,18 - 0,8(\alpha - 1)$; $b = -0,16 - 0,22(\alpha - 1)$.

Таким чином, збільшення температури синтез-газу призводить до значного зростання нормальної швидкості, а підвищення тиску – навпаки.

Площа поверхні фронту полум'я визначається з врахуванням геометрії камери згоряння, положення джерела запалення та положення поршня.

Миттєве положення поршня пов'язане з кутом повороту колінчастого вала залежністю [6]

$$z = \frac{S_n}{2} \left(1 - \cos \varphi + \frac{\lambda}{2} \sin^2 \varphi \right),$$

де S_n – хід поршня; φ – змінне значення кута повороту колінчастого вала, яке відраховується від положення поршня у верхній мертвій точці; λ – відношення радіуса кривошипу до довжини шатуна.

У цілому професором Д.Д. Матієвським було виділено та визначено три основні випадки:

симетрична камера згоряння висотою $H_{к.з.}$ циліндричної форми з розташуванням свічки запалення на осі;

симетрична камера згоряння висотою $H_{к.з.}$ циліндричної форми з асиметричним розташуванням свічки запалення;

клиноподібна камера згоряння висотою $H_{к.з.}$ з асиметричним розташуванням свічки запалення.

У першому випадку, найбільш простому, фронт полум'я являє собою поверхню половини сфери, а об'єм продуктів згоряння – об'єм цієї напівсфери. Залежно від радіуса фронту полум'я R_f , координати положення поршня z та діаметра циліндра $D_{ц}$ можливо виділити чотири випадки:

при $R_f \leq \frac{D_{ц}}{2}$ і $R_f \leq z$ поверхня фронту полум'я та об'єм продуктів згоряння відповідно ви-

значаються як

$$F_f = \frac{8}{D_{ц}^2} R_f^2; \quad V_b = \frac{2\pi R_f^3}{3};$$

при $R_f \leq \frac{D_{ц}}{2}$ і $R_f > z$ поверхня фронту полум'я та об'єм продуктів згоряння

$$F_f = \frac{8}{D_{ц}^2} R_f z; \quad V_b = \left(R_f^2 - \frac{z^2}{3} \right) \pi z;$$

при $R_f > \frac{D_{ц}}{2}$ і $R_f \leq z$ поверхня фронту полум'я та об'єм продуктів згоряння

ви-

$$F_f = \frac{8}{D_{ц}^2} R_f^2 \left(1 - \sqrt{1 - \frac{D_{ц}^2}{4R_f^2}} \right);$$

$$V_b = \frac{2\pi R_f^3}{3} \left[1 - \left(1 - \frac{D_{ц}^2}{4R_f^2} \right)^{\frac{3}{2}} \right];$$

при $R_f > \frac{D_{ц}}{2}$ і $R_f > z$ поверхня фронту полум'я та об'єм продуктів згоряння відповідно ви-

значаються за формулами

$$F_f = \frac{8}{D_{ц}^2} R_f^2 \left(\frac{z}{R_f} - \sqrt{1 - \frac{D_{ц}^2}{4R_f^2}} \right);$$

$$V_b = \frac{2\pi R_f^3}{3} \left[\frac{3z}{2R_f} - \frac{z^3}{2R_f^3} - \left(1 - \frac{D_{ц}^2}{4R_f^2} \right)^{\frac{3}{2}} \right].$$

У другому випадку фронт полум'я являє собою поверхню четвертої частини сфери, розрізаної циліндром, а об'єм продуктів згоряння – об'єм цієї фігури. Залежно від R_f та z можливо виділити чотири

випадки:

при $0 < R_f \leq D_{\text{ц}}$ і $R_f \leq z$ поверхня фронту полум'я та об'єм продуктів згоряння відповідно визначаються як

$$F_f = 2R_f^2 \left[\frac{\pi}{2} - E \left(\varphi_C; \frac{D_{\text{ц}}}{R_f} \right) \right]; \quad (3)$$

$$V_b = \frac{\pi R_f^3}{3} - \frac{R_f D_{\text{ц}}^2}{9} \sin 2\varphi_C \sqrt{1 - \frac{R_f^2}{D_{\text{ц}}^2} \sin^2 \varphi_C} - \frac{2R_f^3}{3} \left[\frac{2}{3} \left(2 - \frac{D_{\text{ц}}^2}{R_f^2} \right) E \left(\varphi_C; \frac{D_{\text{ц}}}{R_f} \right) - \frac{1}{3} \left(1 - \frac{D_{\text{ц}}^2}{R_f^2} \right) F \left(\varphi_C; \frac{D_{\text{ц}}}{R_f} \right) \right]; \quad (4)$$

при $z < R_f \leq D_{\text{ц}}$ поверхня фронту полум'я та об'єм продуктів згоряння

$$F_f = 2R_f^2 \left[\frac{z}{R_f} \left(\frac{\pi}{2} - \varphi_B \right) - E \left(\varphi_C; \frac{D_{\text{ц}}}{R_f} \right) + E \left(\varphi_B; \frac{D_{\text{ц}}}{R_f} \right) \right]; \quad (5)$$

$$V_b = \frac{z D_{\text{ц}}^2}{2} \left(\varphi_B - \frac{\sin 2\varphi_B}{2} \right) + \left(z R_f^2 - \frac{z^3}{3} \right) \times \left(\frac{\pi}{2} - \varphi_B \right) - \frac{R_f D_{\text{ц}}^2}{9} \sin 2\varphi_C \sqrt{1 - \frac{R_f^2}{D_{\text{ц}}^2} \sin^2 \varphi_C} + \frac{z D_{\text{ц}}^2}{9} \sin 2\varphi_B - \frac{4R_f^3}{9} \left(2 - \frac{D_{\text{ц}}^2}{R_f^2} \right) \times \left[E \left(\varphi_C; \frac{D_{\text{ц}}}{R_f} \right) - E \left(\varphi_B; \frac{D_{\text{ц}}}{R_f} \right) \right]; \quad (6)$$

при $D_{\text{ц}} < R_f \leq z$ поверхня фронту полум'я та об'єм продуктів згоряння

$$F_f = 2R_f^2 \left[\frac{\pi}{2} - E \left(\frac{D_{\text{ц}}}{R_f} \right) \right]; \quad (7)$$

$$V_b = \frac{\pi R_f^3}{3} - \frac{2R_f^3}{3} \left[\frac{2}{3} \left(2 - \frac{D_{\text{ц}}^2}{R_f^2} \right) E \left(\frac{D_{\text{ц}}}{R_f} \right) - \frac{1}{3} \left(1 - \frac{D_{\text{ц}}^2}{R_f^2} \right) F \left(\frac{D_{\text{ц}}}{R_f} \right) \right]; \quad (8)$$

при $R_f > D_{\text{ц}}$ і $R_f > z$ поверхня фронту полум'я та об'єм продуктів згоряння відповідно визначаються за формулами

$$F_f = 2R_f^2 \left[\frac{z}{R_f} \left(\frac{\pi}{2} - \varphi_B \right) - E \left(\frac{D_{\text{ц}}}{R_f} \right) + E \left(\varphi_B; \frac{D_{\text{ц}}}{R_f} \right) \right]; \quad (9)$$

$$V_b = \frac{z D_{\text{ц}}^2}{2} \left(\varphi_B - \frac{\sin 2\varphi_B}{2} \right) + \left(z R_f^2 - \frac{z^3}{3} \right) \times \left(\frac{\pi}{2} - \varphi_B \right) + \frac{R_f D_{\text{ц}}^2}{9} \sin 2\varphi_C \sqrt{1 - \frac{R_f^2}{D_{\text{ц}}^2} \sin^2 \varphi_C} - \frac{4R_f^3}{9} \left(2 - \frac{D_{\text{ц}}^2}{R_f^2} \right) \left[E \left(\frac{D_{\text{ц}}}{R_f} \right) - E \left(\varphi_B; \frac{D_{\text{ц}}}{R_f} \right) \right] + \frac{2R_f^3}{9} \left(1 - \frac{D_{\text{ц}}^2}{R_f^2} \right) \left[F \left(\frac{D_{\text{ц}}}{R_f} \right) - F \left(\varphi_B; \frac{D_{\text{ц}}}{R_f} \right) \right]. \quad (10)$$

У третьому випадку залежно від R_f , z та $H_{\text{к.з.}}$ можливо виділити чотири випадки:

при $0 < R_f \leq \sqrt{D_{\text{ц}}^2 + H_{\text{к.з.}}^2}$ і $R_f \leq z$ поверхня фронту полум'я та об'єм продуктів згоряння відповідно визначаються як

$$F_f = 2R_f^2 \left[\frac{\pi}{2} - E \left(\varphi_C; \frac{D_{\text{ц}}}{R_f} \right) - \arcsin \left(\frac{\cos \varphi_C}{\sqrt{1 + \frac{D_{\text{ц}}^2}{H_{\text{к.з.}}^2}}} \right) \right]; \quad (11)$$

$$V_b = \frac{\pi R_f^3}{3} - \frac{R_f D_{\text{ц}}^2}{9} \sin 2\varphi_C \sqrt{1 - \frac{R_f^2}{D_{\text{ц}}^2} \sin^2 \varphi_C} - \frac{H_{\text{к.з.}} D_{\text{ц}}^2}{2} \left(\frac{\varphi_C}{2} - \frac{\sin 2\varphi_C}{3} + \frac{\sin 4\varphi_C}{24} \right) - \frac{2R_f^3}{3} \left[\frac{2}{3} \left(2 - \frac{D_{\text{ц}}^2}{R_f^2} \right) E \left(\varphi_C; \frac{D_{\text{ц}}}{R_f} \right) - \frac{1}{3} \left(1 - \frac{D_{\text{ц}}^2}{R_f^2} \right) F \left(\varphi_C; \frac{D_{\text{ц}}}{R_f} \right) + \arcsin \left(\frac{\cos \varphi_C}{\sqrt{1 + \frac{D_{\text{ц}}^2}{H_{\text{к.з.}}^2}}} \right) \right]; \quad (12)$$

при $z < R_f \leq \sqrt{D_{\text{ц}}^2 + H_{\text{к.з.}}^2}$ і $R_f \leq z$ поверхня фронту полум'я та об'єм продуктів згоряння визначаються як

$$\begin{aligned}
 F_f &= 2R_f^2 \left[\frac{z}{R_f} \left(\frac{\pi}{2} - \varphi_B \right) - E \left(\varphi_C; \frac{D_{II}}{R_f} \right) + \right. \\
 &+ E \left(\varphi_B; \frac{D_{II}}{R_f} \right) - \arcsin \left. \left[\frac{\cos \varphi_C}{\sqrt{1 + \frac{D_{II}^2}{H_{к.з.}^2}}} \right] \right]; \quad (13) \\
 V_b &= \frac{zD_{II}^2}{2} \left(\varphi_B - \frac{\sin 2\varphi_B}{2} \right) + \left(zR_f^2 - \frac{z^3}{3} \right) \times \\
 &\times \left(\frac{\pi}{2} - \varphi_B \right) - \frac{R_f D_{II}^2}{9} \sin 2\varphi_C \sqrt{1 - \frac{R_f^2}{D_{II}^2} \sin^2 \varphi_C} + \\
 &+ \frac{zD_{II}^2}{9} \sin 2\varphi_B - \frac{H_{к.з.} D_{II}^2}{2} \times \\
 &\times \left(\frac{\varphi_C}{2} - \frac{\sin 2\varphi_C}{3} + \frac{\sin 4\varphi_C}{24} \right) - \frac{2R_f^3}{3} \times \\
 &\times \arcsin \left[\frac{\cos \varphi_C}{\sqrt{1 + \frac{D_{II}^2}{H_{к.з.}^2}}} \right] - \frac{4R_f^3}{9} \left(2 - \frac{D_{II}^2}{R_f^2} \right) \times \\
 &\times \left[E \left(\varphi_C; \frac{D_{II}}{R_f} \right) - E \left(\varphi_B; \frac{D_{II}}{R_f} \right) \right] + \\
 &+ \frac{2R_f^3}{9} \left(1 - \frac{D_{II}^2}{R_f^2} \right) \left[F \left(\kappa_C; \frac{D_{II}}{R_f} \right) - F \left(\varphi_B; \frac{D_{II}}{R_f} \right) \right]; \quad (14)
 \end{aligned}$$

при $\sqrt{D_{II}^2 + H_{к.з.}^2} < R_f \leq z$ поверхность фронту полум'я та об'єм продуктів згорання визначається

$$F_f = 2R_f^2 \left[\frac{\pi}{2} - E \left(\frac{D_{II}}{R_f} \right) \right]; \quad (15)$$

$$\begin{aligned}
 V_b &= \frac{\pi R_f^3}{3} - \frac{\pi D_{II}^2 H_{к.з.}}{8} - \frac{2R_f^3}{3} \times \\
 &\times \left[\frac{2}{3} \left(2 - \frac{D_{II}^2}{R_f^2} \right) E \left(\frac{D_{II}}{R_f} \right) - \frac{1}{3} \left(1 - \frac{D_{II}^2}{R_f^2} \right) F \left(\frac{D_{II}}{R_f} \right) \right]; \quad (16)
 \end{aligned}$$

при $R_f > \sqrt{D_{II}^2 + H_{к.з.}^2}$ і $R_f > z$ поверхня фронту полум'я та об'єм продуктів згорання відповідно визначаються таким чином:

$$\begin{aligned}
 F_f &= 2R_f^2 \left[\frac{z}{R_f} \left(\frac{\pi}{2} - \varphi_B \right) - \right. \\
 &- E \left(\frac{D_{II}}{R_f} \right) + E \left. \left(\varphi_B; \frac{D_{II}}{R_f} \right) \right]; \quad (17)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_b &= \frac{zD_{II}^2}{2} \left(\varphi_B - \frac{\sin 2\varphi_B}{2} \right) + \left(zR_f^2 - \frac{z^3}{3} \right) \times \\
 &\times \left(\frac{\pi}{2} - \varphi_B \right) + \frac{R_f D_{II}^2}{9} \sin 2\varphi_C \sqrt{1 - \frac{R_f^2}{D_{II}^2} \sin^2 \varphi_C} - \\
 &- \frac{\pi D_{II}^2 H_{к.з.}}{8} - \frac{4R_f^3}{9} \left(2 - \frac{D_{II}^2}{R_f^2} \right) \times \\
 &\times \left[E \left(\frac{D_{II}}{R_f} \right) - E \left(\varphi_B; \frac{D_{II}}{R_f} \right) \right] + \frac{2R_f^3}{9} \times \\
 &\times \left(1 - \frac{D_{II}^2}{R_f^2} \right) \left[F \left(\frac{D_{II}}{R_f} \right) - F \left(\varphi_B; \frac{D_{II}}{R_f} \right) \right]. \quad (18)
 \end{aligned}$$

У рівняннях (3) – (18) неповний і повний еліптичні інтеграли 1-го роду в нормальній формі Лежандра [10] відповідно

$$F \left(\varphi_C; \frac{D_{II}}{R_f} \right) = \int_0^{\varphi_C} \frac{d\varphi}{\sqrt{1 - \left(\frac{R_f}{D_{II}} \right)^2 \sin^2 \varphi}};$$

$$E \left(\frac{D_{II}}{R_f} \right) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\varphi}{\sqrt{1 - \left(\frac{R_f}{D_{II}} \right)^2 \sin^2 \varphi}} -$$

неповний і повний еліптичні інтеграли 2-го роду в нормальній формі Лежандра [10] відповідно

$$E \left(\varphi_C; \frac{D_{II}}{R_f} \right) = \int_0^{\varphi_C} \sqrt{1 - \left(\frac{R_f}{D_{II}} \right)^2 \sin^2 \varphi} d\varphi;$$

$$E \left(\frac{D_{II}}{R_f} \right) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - \left(\frac{R_f}{D_{II}} \right)^2 \sin^2 \varphi} d\varphi,$$

де в рівняннях (3) – (10)

$$\varphi_C = \arcsin \left(\frac{R_f}{D_{II}} \right); \quad \varphi_B = \arcsin \left(\frac{\sqrt{R_f^2 - z^2}}{D_{II}} \right),$$

а в рівняннях (11) – (28)

$$\begin{aligned}
 \varphi_C &= \arcsin \left[\sqrt{\left(\frac{D_{II}^2}{2H_{к.з.}^2} \right)^2 + \frac{R_f^2}{H_{к.з.}^2} - \frac{D_{II}^2}{2H_{к.з.}^2}} \right]; \\
 \varphi_B &= \arcsin \left(\frac{\sqrt{R_f^2 - z^2}}{D_{II}} \right).
 \end{aligned}$$

Отримана система рівнянь дає змогу розрахувати вигорілий об'єм паливоповітряної суміші в залежності від геометричних особливостей камери згорання та встановити зв'язок між складом синтез-

газу і швидкістю тепловиділення.

Для оцінки адекватності модифікованої математичної моделі робочого циклу двигуна, що працює на синтез-газі, виконане порівняння розрахункових і експериментальних значень тиску газів у циліндрі двигуна 1С 8,5 / 8,8 [11] (див. рис. 1).

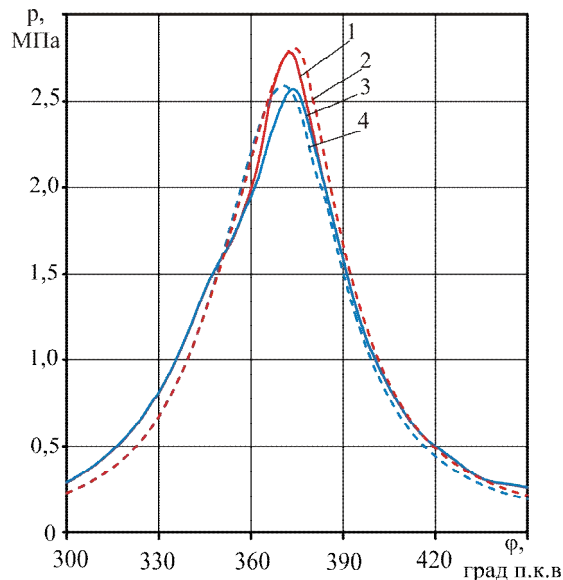


Рис. 1. Залежність зміни тиску p у циліндрі двигуна від кута повороту колінчастого вала:

- 1, 2 – результати моделювання та експеримент відповідно при 90 % H_2 та 10 % CO ;
- 3, 4 – результати моделювання та експеримент відповідно при 80 % H_2 та 20 % CO

При цьому розглядалися два склади синтез-газу: 90% H_2 і 10% CO та 80% H_2 і 20% CO .

Як видно з наведених даних, максимальна середньоквадратична похибка розрахункових даних, отриманих на основі модифікованої моделі, для випадку складу синтез-газу – 90% H_2 та 10% CO не перевищує 6%. Змінюючи склад синтез-газу до 80% H_2 , 20% CO та кут випередження запалення, максимальна середньоквадратична похибка розрахункових даних становить 7,8%.

При об'ємі вибірки – 100 середнє квадратичне відхилення становить 0,0095 МПа для складу синтез-газу – 90% H_2 та 10% CO й 0,0108 МПа для складу 80% H_2 , 20% CO .

Для оцінки розрахункового значення індикаторного тиску встановлюється довірчі інтервали та границі при вибраній довірчій вірогідності. Довірчі інтервали визначається відповідно до

$$I_p = (p_i - t_p \sigma_X; p_i + t_p \sigma_X).$$

Зафіксувавши довірчу вірогідність $P = 0,95$, ступінь вільності $k = n - 1$ за таблицею розподілів Стьюдента визначаємо $t_p = 1,984$. Тоді для складу синтез-газу – 80% H_2 , 20% CO дійсне значення інди-

каторного тиску з ймовірністю 0,95 знаходиться між довірчими границями $p_i \pm 0,021$ МПа.

Висновки

1. Удосконалена математична модель робочого циклу ДВЗ з іскровим запаленням, відмінною особливістю якої є врахування швидкості розповсюдження фронту полум'я в залежності від складу синтез-газу, а також геометрії камери згоряння та розташування джерела запалення.

2. Результати оцінки адекватності моделі показали задовільне узгодження отриманих результатів з даними інших авторів (максимальна середньоквадратична похибка розрахункових даних, отриманих на основі моделі, знаходиться у межах 6,0...7,8%). Однак ці порівняння є недостатньо коректними, оскільки відсутня достовірна інформація про умови експериментів. Для підвищення точності та надійності запропонованої математичної моделі потрібні подальші теоретичні та експериментальні дослідження.

Література

1. Fiveland S.B. Development of a two-zone HCCI combustion model accounting for boundary layer effects / S.B. Fiveland, D.N. Assanis // *SAE International*. – 2001. – № 1. – P. 51-66.
2. Hosseini S.A developed quasi-dimensional combustion model in spark-ignition engines / S. Hosseini, R. Abdolah, A. Khani // *Materials of the World Congress on Engineering*, 2-4 July [2008]. – London, 2008. – P. 158-163.
3. Investigating cycle to cycle variations in an SI engine through experiments and a new computational model / J. Etheridge, S. Mosbach, M. Kraft, H. Wu, N. Collings. – Cambridge: Department of Chemical Engineering University of Cambridge, 2008. – 32 p.
4. Lindström F. Empirical combustion modeling in SI engines / F. Lindström. – Stockholm: Department of Machine Design Royal Institute of Technology, 2005. – 72 p.
5. Ramachandran S. Rapid thermodynamic simulation model of an internal combustion engine on alternate fuels / S. Ramachandran // *Proceedings of the International Multi Conference of Engineers and Computer Scientists*, 18-20 March [2009]. – Hong Kong, 2009. – Vol II. – P. 203-209.
6. Элементы системы автоматизированного проектирования ДВС: Алгоритмы прикладных программ : учеб. пособие для студентов вузов по специальности «Двигатели внутреннего сгорания» / Р.М. Петриченко, С.А. Батурич, Ю.Н. Исаков и др.; под ред. Р. М. Петриченко. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1990. – 328 с.
7. An empirical SI combustion model using laminar burning velocity correlations / F. Lindström,

Н.-Е. Ångström, G. Kalghatgi, C. E. Möller // SAE International. – 2005. – № 1. – P. 91-98.

8. Hermanns R.T.E. Laminar burning velocities of methane-hydrogen-air mixtures / R.T.E. Hermanns. – Veenendaal: Universal Press, 2007. – 144 p.

9. Иссерлин А.С. Основы сжигания газового топлива : справочное пособие / А.С. Иссерлин. – Л.: Недра, 1980. – 271 с.

10. Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и математическими таблицами: пер. с англ. / Под ред. М. Абрамовица, И. Стиган. – М.: Наука, 1979. – 832 с.

11. Shudo T. Combustion characteristics of H_2 -CO-CO₂ mixture in an IC engine / T. Shudo, K. Tsuga, Y. Nakajima // SAE Technical Paper Series. – 2001. – 5–8 March. – P. 105-115.

Надійшла до редакції 30.03. 2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.І. Сербін, Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, Миколаїв, Україна.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СГОРАНИЯ СИНТЕЗ-ГАЗА В ЦИЛИНДРЕ ДВС

Б.Г. Тимошевский, М.Р. Ткач, А.С. Митрофанов

Представлена математическая модель процесса сгорания синтез-газа в поршневых двигателях с искровым зажиганием. Отличительной особенностью модели является учет скорости распространения фронта пламени в цилиндре в зависимости от состава синтез-газа. Подробно описан способ определения площади фронта пламени, а также объема выгоревшего синтез-газа в зависимости от геометрических особенностей камеры сгорания и скорости выгорания синтез-газа. Установлена адекватность этой модели путем сравнения результатов математического моделирования и известных экспериментальных данных. Расхождение этих результатов не превышает 8%, что является достаточно приемлемым при моделировании рабочих процессов ДВС.

Ключевые слова: синтез-газ, альтернативное топливо, фронт пламени, скорость сгорания, паровая конверсия, параметры рабочего процесса.

MATHEMATICAL MODELING OF COMBUSTION PROCESS OF SYNTHESIS GAS IN THE CYLINDER ICE

B.G. Timoshevsky, M.R. Tkach, A.S. Mitrofanov

The mathematical model of synthesis gas combustion of in piston engines with spark ignition is presented. A distinctive feature of the model is the account of the propagation velocity of the flame front in the cylinder depending on the composition of synthesis gas. In detail describes how to determine the area of the flame front, as well as the volume of burnt synthesis-gas, depending on the geometric characteristics of the combustion chamber and the speed of combustion synthesis-gas. The adequacy of this model by comparing of mathematical modeling results and available experimental data is established. The discrepancy between these results does not exceed 8%, which is quite acceptable for modeling of ICE operation processes.

Key words: synthesis gas, alternative fuel, the flame front, the rate of combustion, steam-conversion, the parameters of the working process.

Тимошевський Борис Георгійович – д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри двигунів внутрішнього згорання Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова, Миколаїв, Україна, e-mail: btym@mksat.net.

Ткач Михайло Романович – д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри теоретичної механіки Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова, Миколаїв, Україна, e-mail: tkach@mksat.net.

Митрофанов Олександр Сергійович – аспірант кафедри двигунів внутрішнього згорання Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова, Миколаїв, e-mail: m.aleksandr.s@mail.ru.