

Авраменко Андрей Николаевич, канд. техн. наук, и.о. зав. отделом водородной энергетики, Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина, e-mail: an0100@ukr.net, 349-47-54.

ПОРІВНЯЛЬНА РОЗРАХУНКОВА ОЦІНКА ПОКАЗНИКІВ РОБОЧОГО ЦИКЛУ ТЕПЛОВИЗНОГО ДВИГУНА

А.М. Авраменко

Проведено огляд сучасних методів організації робочого процесу дизельних двигунів та методики моделювання показників ДВЗ. Використання сучасних способів організації робочого циклу дозволяє покращити показники паливної економічності ДВЗ і знизити рівень токсичності відпрацьованих газів. В роботі розглянуті результати порівняльного чисельного моделювання робочого циклу тепловизного дизельного двигуна 16 ЧН 26/27 при роботі на характерних експлуатаційних режимах (режим холостого ходу, 30% від режиму номінальної потужності і номінальному режимі). З використанням чисельних методів розглянуті розрахункові варіанти в штатному виконанні (при роботі двигуна за циклом Дизеля) і модернізованому (HCCI двигун). Використання чисельних методів для дослідження робочих процесів ДВЗ дозволяє отримати інформацію про локальні та осередненні характеристики робочого циклу і їх зміну по куту повороту колінчастого валу. В роботі показано, що у HCCI двигуна відзначається зниження рівня викидів оксидів азоту, в середньому на 15-20%, масового викиду сажі (твердих частинок) в середньому на 18-22%, що досягнуто шляхом гомогенізації суміші, зниження максимальних локальних температур полум'я і збільшення повноти згоряння палива.

COMPARATIVE DESIGN ASSESSMENT OF INDICATORS OF WORKING CYCLE DIESEL ENGINE

A. N. Avramenko

The review of modern ways of the organization of the working process of diesel engines and methods for modeling the indicators of ICE. The use of modern methods of organizing the working cycle can improve the fuel economy of ICE and reduce the level of toxicity of exhaust gases. The paper discusses the results of comparative numerical simulation of the duty cycle of diesel engine 16 FT 26/27 when operating at typical operating conditions (idling, 30% of rated power and nominal mode). With the use of numerical methods, considered variants in the standard version (when the engine is running on a Diesel cycle) and upgraded (HCCI engine). The use of numerical methods for studying the ICE work processes allows obtaining information on local and averaged characteristics of the working cycle and their variation in the angle of rotation of the crankshaft. The work shows that the HCCI engine has a decrease in the level of nitrogen oxide emissions, on average by 15-20%, mass emission of soot (solid particles) on average by 18-22%, which is achieved by homogenizing the fuel-air mixture, reducing the maximum local flame temperatures and increasing the completeness of combustion.

УДК 621.43.057.3

А.В. Савченко

DOI: 10.20998/0419-8719.2018.1.04

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ СУМІШОУТВОРЕННЯ ТА ЗГОРЯННЯ В ДИЗЕЛІ НА ВОДОПАЛИВНІЙ ЕМУЛЬСІЇ

Використання водопаливної емульсії (ВПЕ) в якості палива для дизелів дозволяє досягти значного комплексного покращення паливно-екологічних показників двигуна. Проте, процес згоряння ВПЕ помітно відрізняється від згоряння традиційного дизельного палива. Це обумовлює виникнення резервів з покращення дизеля на ВПЕ шляхом вибору оптимальних параметрів. Найбільш раціональним шляхом для вирішення поставленої задачі є використання комплексної математичної моделі дизеля при роботі на ВПЕ. Одним з найбільш важливих складових такої моделі дизеля є математична модель процесів сумішоутворення та згоряння палива в циліндрі. Наведено основні елементи математичної моделі процесів сумішоутворення та згоряння водопаливної емульсії в дизелі. Для ідентифікації математичної моделі було використано результати комплексу експериментальних досліджень дизеля на водопаливній емульсії на найбільш показових режимах роботи дизеля, що відображають вплив кута випередження впорскування палива, та вміст води у водопаливній емульсії. Підвищення точності отриманих даних експериментальних досліджень досягнуто використанням методів обробки даних окремо для кожного робочого циклу дизеля. Наведено результати ідентифікації математичної моделі. Результати математичного моделювання добре узгоджуються із експериментальними даними, характер та ступінь впливу розглянутих факторів на процеси сумішоутворення та згоряння відображений адекватно. Отримані результати є вихідними даними для моделювання процесів утворення сажі та оксидів азоту в циліндрі дизеля. Це дозволить адекватно оцінити вплив кожного з обраних параметрів на показники дизеля та визначити сукупність параметрів, що забезпечать найбільш ефективне використання ВПЕ в дизелі.

Вступ

В наш час значно зростає інтерес світової спільноти до питань, що пов'язані з глобальними еко-

логічними проблемами. Все більш актуальними стають питання зменшення шкідливого впливу діяльності людства на навколишнє середовище. Сто-

совно двигунів внутрішнього згорання це, насамперед, означає зменшення витрати палива нафтового походження та зменшення викидів шкідливих речовин із відпрацьованими газами двигунів.

Одним з ефективних методів досягнення зазначеної мети є використання водопаливної емульсії (ВПЕ) в якості палива для дизеля. До переваг використання такого виду палива можна віднести наступне: відсутність необхідності будь-якої модернізації дизеля для переходу на це альтернативне паливо, значне покращення екологічних показників дизеля, зменшення витрати палива при перерахунку на традиційне дизельне паливо [1-7].

Дослідження і оптимізація процесів сумішоутворення та згорання в дизелі є одним з найбільш ефективних шляхів покращення техніко-економічних та екологічних показників двигуна. Варто відзначити, що на сучасному рівні розвитку двигунобудування досягнуто високий ступінь досконалості в пошуку оптимальних параметрів для кожного окремого виду дизелів і подальших резервів для покращення характеристик дизеля таким шляхом майже не залишилося. Проте, це стосується лише роботи на традиційному дизельному паливі. Якщо ж розглядати роботу дизеля на ВПЕ, то можна стверджувати, що процеси сумішоутворення та згорання помітно відрізняються від таких при використанні традиційного дизельного палива [1,2,4-7]. Оптимальні параметри дизеля для роботи на традиційному дизельному паливі можуть не забезпечити оптимальної його роботи на ВПЕ. А, отже, актуальним є дослідження процесів сумішоутворення та згорання ВПЕ з метою оптимізації дизеля саме для використання цього виду альтернативного палива.

Аналіз літератури

Більшість дослідників дизелів на ВПЕ жодним чином не ставили за мету підвищення техніко-економічних показників дизеля, а лише виявляли характер та ступінь впливу ВПЕ на роботу дизеля. Такий підхід є виправданим, оскільки дозволяє найбільш коректно порівнювати процеси сумішоутворення та згорання цих двох видів палива. На сьогоднішній день дослідниками накопичено багато даних про вплив ВПЕ на процеси сумішоутворення і згорання в дизелі. За результатами багатьох досліджень відзначається збільшення періоду затримки спалахування палива, незначне зменшення температури в циліндрі, значна інтенсифікація періоду «швидкого» згорання та помітне збільшення швидкості дифузійного згорання. Дані про вплив ВПЕ на економічність дизеля та рівень викидів шкідливих речовин за результатами різних досліджень значною мірою відрізняється, що поясню-

ється, головним чином, різними умовами проведення таких досліджень.

В той же самий час вказані особливості перебігу процесів сумішоутворення і згорання ВПЕ можуть обумовити виникнення резервів з оптимізації дизеля на ВПЕ шляхом вибору його оптимальних конструктивних та регулювальних параметрів. В даному напрямку дослідниками проводилися роботи, але більшість з них являли собою експериментальне визначення впливу змін параметрів дизеля в певному діапазоні. Для достовірного визначення таким способом оптимальних параметрів дизеля необхідна величезна кількість експериментальних досліджень, а, отже, і дуже значні затрати часу, сил та засобів. До того ж цінні такі пошукові роботи будуть лише для двигуна, на якому були проведені випробування, а також саме для такого складу палива, яке було використано при дослідженнях.

Набагато більш раціональним шляхом оптимізації є використання математичної моделі дизеля на ВПЕ. Такий підхід дає можливість значно скоротити витрати часу і сил на проведення оптимізації дизеля на ВПЕ. Також це дозволить запропонувати метод оптимізації для будь-якого дизеля та складу палива, що значно підвищує цінність таких робіт.

Математична модель процесу згорання ВПЕ

Для ідентифікації математичної моделі було використано результати експериментального дослідження дизеля 4ЧН12/14 на ВПЕ із масовим вмістом води 16,3%. Для підвищення точності отриманих результатів нами було використано метод обробки експериментальних даних із окремою обробкою кожного робочого циклу, що дозволило уникнути спотворення закономірності зміни тиску в циліндрі. З використанням таких принципів було досліджено особливості перебігу процесу згорання ВПЕ в цілому [7], енергію активації водопаливної емульсії [8], коефіцієнт надлишку повітря в циліндрі дизеля при роботі на ВПЕ [9] та вплив параметрів системи паливоподачі на показники дизеля на ВПЕ [10].

Було прийнято рішення використовувати напівемпіричну математичну модель процесу згорання, що заснована на моделі к.т.н. Філіпковського, з деякими модифікаціями авторів [11]. Додатково вирази, що входять до математичної моделі, були доопрацьовані з метою врахування характерних особливостей процесу згорання ВПЕ в дизелі: досягається відповідне збільшення максимальної швидкості згорання протягом періоду «швидкого» згорання внаслідок явища «мікрровибуху» та незначна інтенсифікація згорання протягом періоду ди-

фузійного згоряння внаслідок каталітичної дії продуктів дисоціації води на процес згоряння [1,2,6,7]. В рамках застосованої моделі прийнято, що початку процесу згоряння передуює період затримки спалахування, який розраховується за формулою Толстова:

$$\tau_i = 3.8 \cdot 10^{-6} \cdot (1 - 1.6 \cdot 10^{-4} \cdot n) \cdot \sqrt{\frac{T_H}{P_H}} \cdot e^{\frac{E_A}{8.314 T_H}}, \quad (1)$$

де E_A – енергія активації водопаливної емульсії, кДж/кмоль; T_H – температура газів в циліндрі в момент початку паливоподачі, К; P_H – тиск газів в циліндрі в момент початку паливоподачі, МПа; n – частота обертання колінчастого валу дизеля, хв⁻¹.

Процес згоряння складається з двох періодів: «швидкого» згоряння та дифузійного згоряння. Швидкість згоряння протягом кожного з цих етапів розраховується окремо за наступними залежностями:

$$\left(\frac{dx}{d\varphi}\right)_I = -A \cdot K_{MKB} \cdot C \cdot \exp(C \cdot \overline{\varphi}_I^{m_I+1}) \cdot \frac{6 \cdot n}{\varphi_{z_I}} \times \left[(m_I + 1) \overline{\varphi}_I^{-m_I} + \overline{\varphi}_I^{m_I+1} \ln \overline{\varphi}_I \frac{d\overline{\varphi}_I}{d\varphi_I} \right], \quad (2)$$

$$\left(\frac{dx}{d\varphi}\right)_{II} = -C \cdot S \cdot \xi_B \cdot \exp(C \cdot \overline{\varphi}_{II}^{m_{II}+1}) \cdot \frac{6n}{\varphi_{z_{II}}} \times \left[(m_{II} + 1) \overline{\varphi}_{II}^{-m_{II}} + \overline{\varphi}_{II}^{m_{II}+1} \ln \overline{\varphi}_{II} \frac{d\overline{\varphi}_{II}}{d\varphi_{II}} \right], \quad (3)$$

де A – коефіцієнт, що враховує вплив частини палива, що випарувалася за період затримки спалахування на інтенсивність швидкого згоряння; K_{MKB} – коефіцієнт, що враховує вплив властивостей водопаливної емульсії на процес згоряння; C – константа, що дорівнює -6,908; φ – поточний час з моменту початку згоряння палива, град. п.к.в.; S – коефіцієнт, що враховує частку палива, яка згоріла протягом періоду швидкого згоряння;

Коефіцієнт K_{MKB} характеризує вплив властивостей ВПЕ на перебіг процесу згоряння, залежить від вмісту води в складі ВПЕ та визначається за наступною формулою:

$$K_{MKB} = 1 + m_{H_2O}^{1.27}, \quad (4)$$

де m_{H_2O} – масовий вміст води у складі ВПЕ.

В наведених формулах індекс I відповідає періоду «швидкого» згоряння, а індекс II – періоду дифузійного згоряння. Особливістю використаної моделі є залежність від кута повороту колінчастого валу показників динаміки згоряння m_I та m_{II} , що визначаються за такими виразами:

$$m_I = 7,5 \cdot \overline{\varphi}_{mI} \cdot \left(1 - \overline{\varphi}_{mI}^{-1}\right); \quad (5)$$

$$m_{II} = 4,7 \cdot \overline{\varphi}_{mII} \cdot \left(1 - \overline{\varphi}_{mII}^{-1}\right). \quad (6)$$

Відносний момент досягнення максимальної швидкості тепловиділення розраховується по наступним формулам:

$$\overline{\varphi}_{mI} = 0,75 + \tau_{zI} + \frac{0,032 \cdot b_u}{6 \cdot n}; \quad (7)$$

$$\overline{\varphi}_{mII} = 0,19 + \tau_{\text{виз}} + \frac{0,028 \cdot b_u \cdot \varphi_{\text{впр}}}{6 \cdot n}, \quad (8)$$

де b_u – відносна константа випаровування; $\tau_{\text{виз}}$ – тривалість процесу вигорання великих крапель палива, с; τ_{zI} – тривалість періоду «швидкого» згоряння, с; $\varphi_{\text{впр}}$ – тривалість процесу впорскування палива, с.

Прийнято, що тривалість періоду «швидкого» згоряння головним чином залежить від кількості палива, що випарувалося протягом періоду затримки спалахування палива:

$$\tau_{zI} = \tau_i \cdot K_\alpha, \quad (9)$$

де K_α – поправна функція для часу вигорання палива.

Тривалість вигорання палива після закінчення процесу впорскування значною мірою визначається тривалістю вигорання великих крапель палива, що надійшли до циліндру наприкінці процесу впорскування під відносно низьким тиском. Саме це викликає збільшення розміру крапель палива, що поряд із зменшенням локальних концентрацій кисню в циліндрі обумовлює зниження ефективності згоряння палива. Проте, при використанні в дизелях ВПЕ середній розмір крапель значно зменшується внаслідок вторинного розпилювання палива, а каталітичний вплив продуктів дисоціації води додатково інтенсифікує процес згоряння на цьому етапі. Тривалість вигорання великих крапель наприкінці процесу дифузійного згоряння розраховується за наступними виразами:

$$\tau_{\text{виз}} = K_\alpha \cdot \frac{\left((1,5 + 0,018 \cdot \exp(\Delta P_{fj}^{0,272})) \cdot d_{32} \right)^2}{K_u}, \quad (10)$$

$$d_{32} = \frac{10^6 \cdot K^{-1,6} \cdot E_{32} \cdot d_c \cdot M^{0,0733}}{(\rho \cdot W_e)^{0,266}}, \quad (11)$$

де K_u – константа випаровування, що розраховується для середнього діаметру крапель; ξ_B ; d_{32} – середній поверхневий діаметр крапель палива; E_{32} – коефіцієнт в формулі для визначення розміру крапель; d_c – діаметр соплових отворів форсунки, м; M – критерій Маха; W_e – критерій Вебера; ΔP_{fj} – середнє значення перепаду тиску при впорскуванні палива, МПа.

Вираз (10) для визначення середнього поверхневого діаметру крапель палива доопрацьовано з

метою відображення впливу механізму «мікробухів» на розмір крапель. Варто відзначити, що величина d_{32} в той чи іншій мірі впливає майже на всі етапи процесу згоряння палива, а отже, є дуже важливою для побудови адекватної математичної моделі.

Ідентифікація математичної моделі проводиться із використанням експериментальних даних,

що були отримані в ході моторних випробувань дизеля 4ЧН12/14. Випробування проводилися на режимах із частотами обертання колінчастого валу, що відповідають номінальній потужності (2000 хв^{-1}) та максимальному крутному моменту (1500 хв^{-1}). Результати ідентифікації математичної моделі процесу згоряння в дизелі на ВПЕ за результатами експериментальних даних наведено на рис. 1.

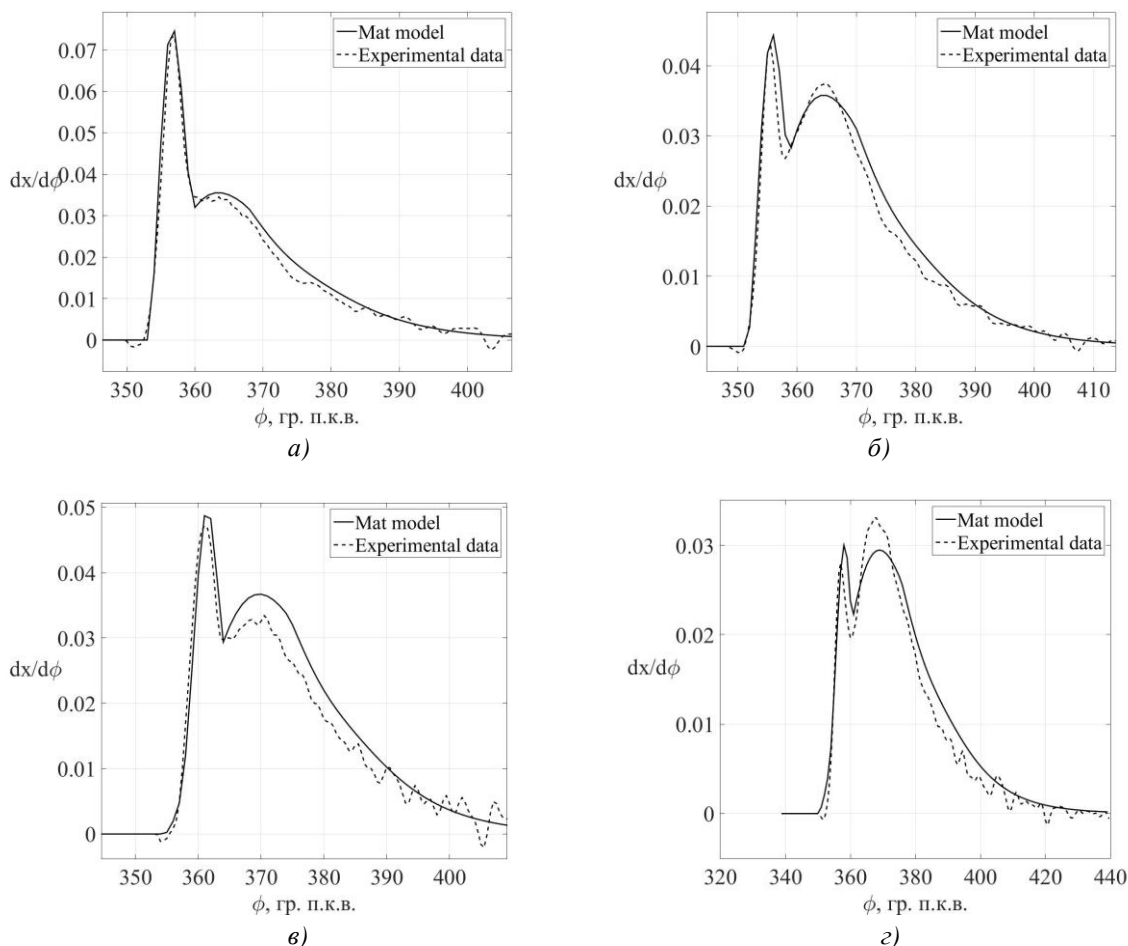


Рис. 1. Залежність диференційного тепловиділення в циліндрі дизеля на водопаливній емульсії:
 а – $n=1500 \text{ хв}^{-1}, N_e=64 \text{ кВт}$; б – $n=1500 \text{ хв}^{-1}, N_e=85 \text{ кВт}$; в – $n=2000 \text{ хв}^{-1}, N_e=73,6 \text{ кВт}$;
 з – $n=2000 \text{ хв}^{-1}, N_e=100 \text{ кВт}$

Видно, що використана математична модель забезпечує задовільну для практичних задач відповідність розрахункових даних експериментальним. Індикаторна діаграма дизеля на ВПЕ за результатами математичного моделювання на вищевказаних режимах роботи наведена на рис. 2. Однією з основних функцій математичної моделі є адекватне

прогнозування впливу зміни параметрів дизеля на його показники. Для верифікації математичної моделі проведені експериментальні дослідження впливу зміни кута випередження впорскування палива форсунок дизеля на ВПЕ на показники його робочого процесу.

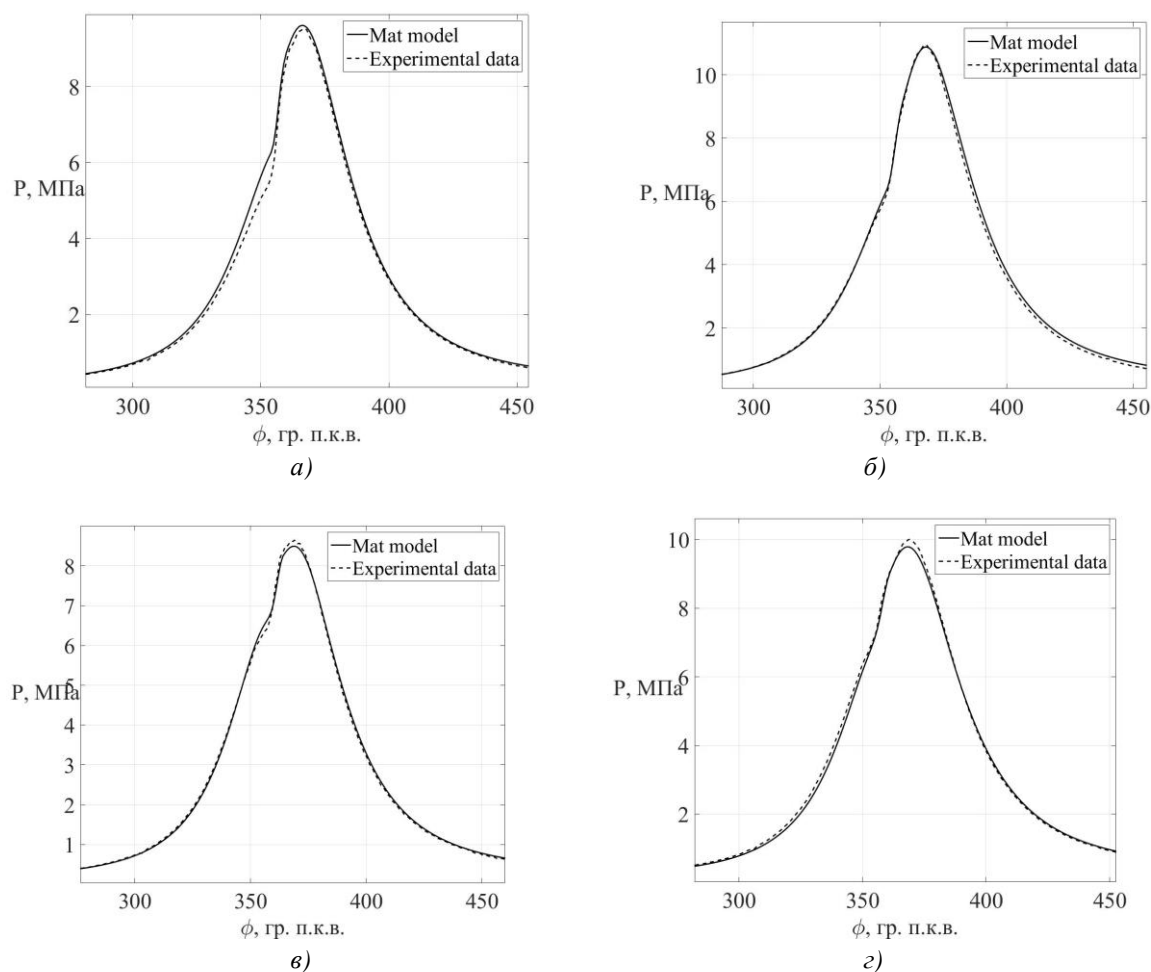


Рис. 2. Индикаторні діаграми дизеля на водопаливній емульсії:
 а – $n=1500 \text{ хв}^{-1}$, $N_e=64 \text{ кВт}$; б – $n=1500 \text{ хв}^{-1}$, $N_e=85 \text{ кВт}$; в – $n=2000 \text{ хв}^{-1}$, $N_e=73,6 \text{ кВт}$;
 г – $n=2000 \text{ хв}^{-1}$, $N_e=100 \text{ кВт}$

В ході цих досліджень використовувалась водопаливна емульсія із вмістом води 12,3% за вагою. Вибір саме кута випередження впорскування палива для варіювання обумовлений відносно легкою його зміною в процесі експлуатації і значним потенціалом з впливу на робочий процес дизеля. Порівняння диференційного тепловиділення в циліндрі дизеля на ВПЕ при різних значеннях кута випередження впорскування палива за експериментальними даними та математичним моделюванням наведено на рис. 3.

З наведених графіків видно, що розраховані дані про характер та ступінь впливу кута випередження впорскування палива на диференційне тепловиділення добре узгоджуються з результатами експериментальних досліджень. В ході цих досліджень використовувалась водопаливна емульсія із вмістом води 12,3% за вагою, а отже вплив вмісту води у ВПЕ на процес згоряння математична

модель відображає адекватно. Це дуже важливо, оскільки при використанні ВПЕ відбувається зміна тривалості періодів згоряння та їх інтенсивності [1,2,5-7], а отже очевидно, що може знадобитися корекція кута випередження впорскування палива для підвищення ефективності використання ВПЕ в дизелі.

Розроблена концепція адаптивної системи керування дизелем, що передбачає корекцію параметрів паливоподачі в залежності від складу водопаливної емульсії, дані про який будуть надходити від спеціального датчика. Таким чином можна реалізувати систему паливоподачі з електронним керуванням, яка забезпечить найбільш ефективне використання ВПЕ будь-якого складу і традиційного дизельного палива.

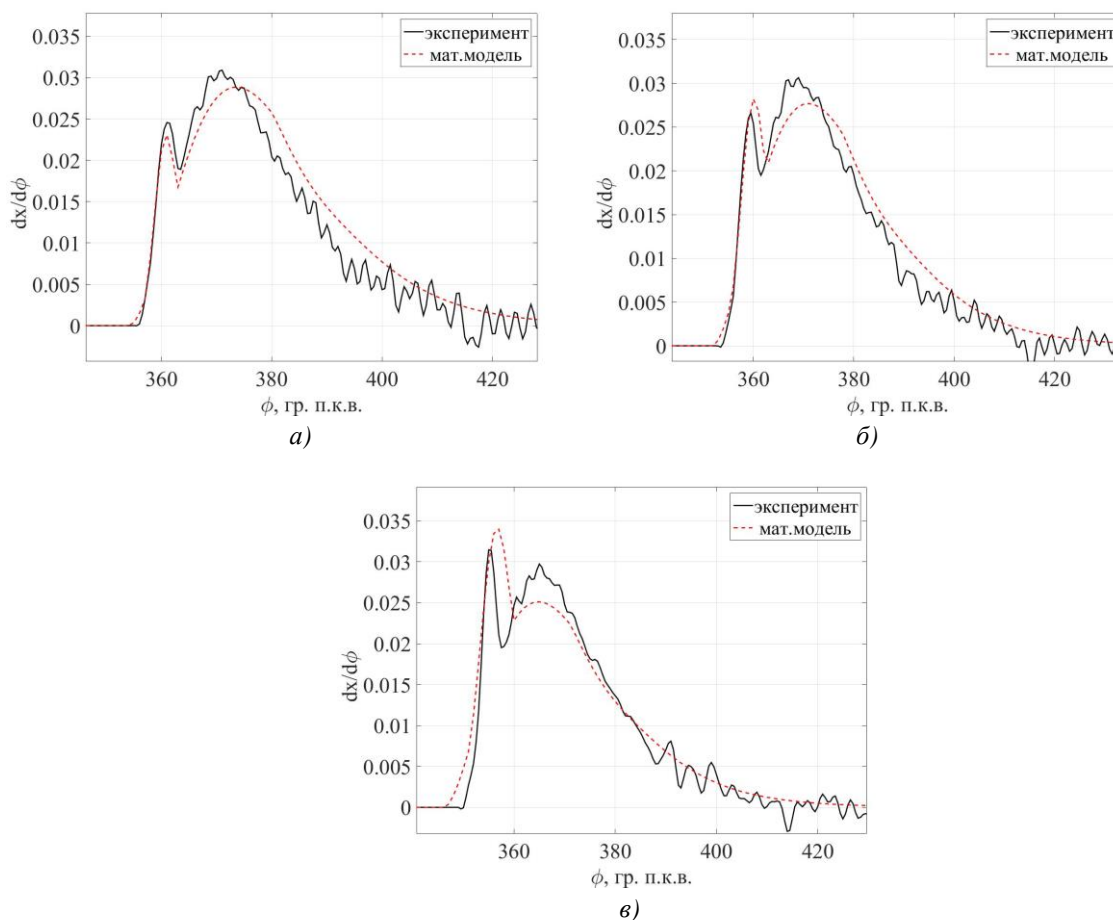


Рис. 3. Диференційне тепловиділення в циліндрі дизеля на ВПЕ ($n=2000 \text{ хв}^{-1}$, $N_e=90 \text{ кВт}$) за результатами експериментального дослідження та математичного моделювання:
 а – 14 град. п.к.в. до ВМТ; б – 18 град. п.к.в. до ВМТ; в – 22 град. п.к.в. до ВМТ

Висновок

Розроблено математичну модель процесів сумішоутворення та згоряння в дизелі на ВПЕ, що може бути використана для дослідження та оптимізації дизелів будь-якого типу, розмірності та призначення. Вирази, що входять до моделі, враховують особливості фізико-хімічних властивостей ВПЕ та їх вплив на перебіг процесів у циліндрі дизеля.

Ідентифікація математичної моделі проводилася із використанням даних експериментальних досліджень дизеля 4СН12/14 на ВПЕ. В ході моторних випробувань на режимі, близькому до номінального, було досліджено вплив кута випередження впорскування палива на показники процесу згоряння в циліндрі дизеля. Дані про такий вплив також були використані при ідентифікації математичної моделі.

Результати розрахунку на всіх вказаних вище режимах гарно узгоджуються із результатами моторних випробувань, що свідчить про адекватність

математичної моделі. Отже, таку математичну модель можна використовувати для досліджень та оптимізації дизеля на ВПЕ, в тому числі і для моделювання процесів утворення шкідливих речовин в циліндрі дизеля. Це набагато більш ефективно, ніж застосовувати моторні випробування, оскільки дозволить значно скоротити витрати сил, часу та матеріальних засобів.

Розроблена математична модель процесів сумішоутворення і згоряння ВПЕ може бути використана при реалізації концепції адаптивної системи керування дизелем, яка забезпечить найбільшу ефективність використання в дизелі ВПЕ будь-якого складу та традиційного дизельного палива.

Список літератури:

1. Gupta R. K. Effects of Water-Diesel Emulsions on the Performance of Single Cylinder Direct Injection Diesel Engine – A Review / R. K. Gupta, K. A. Sankeerth, A. Yetalkar *ma in. // Journal of Basic and Applied Engineering Research*. 2014. – №2. – С. 1810–1814.
2. Zhang W. Influence of water emulsified diesel & oxygen-enriched air on diesel engine

- NO-smoke emissions and combustion characteristics* / W. Zhang, Z. Chen, Y. Shen. // *Energy*. – 2013. – №55. – С. 369–377. 3. Watanabe H. An experimental investigation of the breakup characteristics of secondary atomization of emulsified fuel droplet / H. Watanabe, Y. Suzuki, T. Harada // *Energy*. – 2010. – №35. – С. 806–813. 4. Wang Z. Evaporation and Ignition Characteristics of Water Emulsified Diesel under Conventional and Low Temperature Combustion Conditions / Z. Wang, S. Wu, Y. Huang // *Energies*. – 2017. – №10. – С. 1109. 5. Jankowski A. Influence of chosen parameters of water fuel micro emulsion on combustion processes, emission level of nitrogen oxides and fuel consumption of CI engine / A. Jankowski. // *Journal of KONES Powertrain and Transport*. – 2011. – №18. – С. 593–600. 6. Imazu H. Physical Properties and Combustion Characteristics of Emulsion Fuels of Water/Diesel Fuel and Water/Diesel Fuel/Vegetable Oil Prepared by Ultrasonication / H. Imazu, Y. Kojima. // *Journal of the Japan Petroleum Institute*. – 2013. – №56. – С. 52–57. 7. Марченко А.П. Особливості процесу згорання в дизелі при роботі на водопаливній емульсії / А. П. Марченко, Парсаданов І.В., Прохоренко А.О., Савченко А.В. // *Двигатели внутреннего сгорания*. – 2016. – № 1. – С. 3–10. 8. Марченко А. П. Экспериментальное определение энергии активации водотопливной эмульсии / А. П. Марченко, А. А. Прохоренко, А. В. Савченко. // *Двигатели внутреннего сгорания*. – 2016. – №2. – С. 9–14. 9. Prokhorenko A. Determination of the air excess factor in diesel engine fueled by water fuel emulsion / A. Prokhorenko, D. Samoilenko, D. Meshkov, A. Savchenko. // *Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów*. – 2017. – №5. – С. 35–43. 10. Марченко А.П. Вплив параметрів системи наливоводачі на індикаторні показники дизеля при його роботі на водопаливній емульсії / А. П. Марченко, І. В. Парсаданов, А. В. Савченко, І. М. Карягін. // *Двигуни внутрішнього згорання*. – 2017. – №2. – С. 3–8. 11. Марченко А. П. Математическая модель процесса сгорания топлива в дизеле / А. П. Марченко, А. А. Осетров, О. Ю. Линьков. // *Двигатели внутреннего сгорания*. – 2013. – №1. – С. 3–10. 12. Zhang, W., Chen, Z., Shen, Y. (2013), "Influence of water emulsified diesel & oxygen-enriched air on diesel engine NO-smoke emissions and combustion characteristics", *Energy*, №55, pp. 369–377. DOI: 10.1016/j.energy.2013.03.042. 3. Watanabe, H., Suzuki, Y., Harada, T. (2010), "An experimental investigation of the breakup characteristics of secondary atomization of emulsified fuel droplet", *Energy*, №35, pp. 806–813. doi.org/10.1016/j.energy.2009.08.021. 4. Wang, Z., Wu, S., Huang, Y. (2017), "Evaporation and Ignition Characteristics of Water Emulsified Diesel under Conventional and Low Temperature Combustion Conditions", *Energies*, №10, pp. 1109. DOI: 10.3390/en10081109. 5. Jankowski, A. (2011), "Influence of chosen parameters of water fuel micro emulsion on combustion processes, emission level of nitrogen oxides and fuel consumption of CI engine", *Journal of KONES Powertrain and Transport*, №18, pp. 593–600. 6. Imazu, H., Kojima, Y. (2013), "Physical Properties and Combustion Characteristics of Emulsion Fuels of Water/Diesel Fuel and Water/Diesel Fuel/Vegetable Oil Prepared by Ultrasonication", *Journal of the Japan Petroleum Institute*, №56, pp. 52–57. DOI: 10.1627/jpi.56.52. 7. Marchenko, A.P., Parsadanov, I.V., Prokhorenko, A.O., Savchenko, A.V. (2016), "Features of the combustion process in a diesel engine when working on a water-oil emulsion", *Internal combustion engines* ["Osoblyvosti protsesu zghoriannia v dyzeli pry roboti na vodopalyvni emulsii"], *Dvyhately vnutrenneho shoranyia*, № 1, pp. 3–10. DOI: 10.20998/0419-8719.2016.1.01. 8. Marchenko, A.P., Prokhorenko, A.A., Savchenko, A.V. (2016), "Experimental determination of activation energy of a water-emulsion, *Internal combustion engines*" ["Eksperimentalne opredelenie energii aktivatsii vodotoplivnoy emulsii"], *Dvyhately vnutrenneho shoranyia*, №2, pp. 9–14. DOI: 10.20998/0419-8719.2016.2.02. 9. Prokhorenko, A., Samoilenko, D., Meshkov, D., Savchenko, A. (2017), "Determination of the air excess factor in diesel engine fueled by water fuel emulsion", *Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów*, №5, pp. 35–43. 10. Marchenko, A.P., Parsadanov, I.V., Savchenko, A.V., Kariyahin, I. M. (2017), *Influence of parameters of a fuel supply system on indicator indicators of a diesel engine at its work on a water-oil emulsion* ["Vplyv parametrov systemy palyvopodachi na indykatorni pokaznyky dyzela pry yoho roboti na vodopalyvni emulsii"], *Dvyhately vnutrishnoho zghoriannia*, №2, pp. 3–8. DOI: 10.20998/0419-8719.2017.2.01. 11. Marchenko, A.P., Osetrov, A.A., Lynkov, O.Yu. (2013), "Mathematical model of fuel combustion in a diesel engine, *Internal combustion engines*" ["Matematycheskaia model protsesa shoranyia toplyva v dyzele"], *Dvyhately vnutrenneho shoranyia*, №1, pp. 3–10.

Bibliography (transliterated):

1. Gupta, R. K., Sankeerth, K. A., Yetalkar, A. (2014) "Effects of

Савченко Анатолій Вікторович – мол. наук. співр. кафедри двигунів внутрішнього згорання Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: Savchenko.sci@gmail.com.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СМЕСЕОБРАЗОВАНИЯ И СГОРАНИЯ ВОДОТОПЛИВНОЙ ЭМУЛЬСИИ В ДИЗЕЛЕ

А.В. Савченко

Использование водотопливной эмульсии (ВТЭ) в качестве топлива для дизелей позволяет достичь значительного комплексного улучшения топливно-экологических показателей двигателя. Однако, процесс сгорания ВТЭ заметно отличается от сгорания традиционного дизельного топлива. Это обуславливает возникновение резервов по улучшению дизеля на ВТЭ путем выбора оптимальных параметров. Наиболее рациональным путем для решения поставленной задачи является использование комплексной математической модели дизеля при работе на ВТЭ. Одним из наиболее важных составляющих такой модели дизеля является математическая модель процессов смесеобразования и сгорания топлива в цилиндре. Приведены основные элементы математической модели процессов смесеобразования и сгорания водотопливной эмульсии в дизеле. Для идентификации математической модели были использованы результаты комплекса экспериментальных исследований дизеля на водотопливной эмульсии на наиболее показательных режимах работы дизеля, отражающие влияние угла опережения впрыска топлива, и содержание воды в водотопливной эмульсии. Повышение точности полученных данных экспериментальных исследований достигнуто использованием методов поцикловой обработки данных. Приведены результаты идентификации математической модели. Результаты математического моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными, характер и степень влияния рассмотренных факторов на процессы смесеобразования и сгорания отражены адекватно. Полученные результаты являются исходными данными для моделирования процессов образования сажи и оксидов азота в цилиндре дизеля. Это позволит адекватно оценить влия-

ние каждого из выбранных параметров на показатели дизеля и определить совокупность параметров, обеспечивающих наиболее эффективное использование ВТЭ в дизеле.

MATHEMATICAL MODELING OF MIXTURIZATION AND CONTAINMENT PROCESSES IN DIESEL ON WATER-FLOOD EMULSION

A.V. Savchenko

The use of water-fuel emulsion (VFE) as a fuel for diesel engines allows to achieve a significant comprehensive improvement of the fuel and environmental performance of the engine. However, the combustion process of VFE emulsion differs markedly from the combustion of conventional diesel fuel. This causes the emergence of reserves to improve the diesel engine at VFE by choosing the optimal parameters. The most rational way to solve this problem is to use the complex mathematical model of a diesel engine when operating on a VFE. One of the most important components of such a diesel model is the mathematical model of the processes of fuel formation and combustion in a cylinder. The article presents the main elements of the mathematical model of processes of mixing and combustion of a water-fuel emulsion in a diesel engine. To identify the mathematical model, the results of a complex of experimental studies of a diesel engine on the water-oil emulsion were used on the most representative operating modes of the diesel engine, reflecting the influence of the fuel intake ahead of the fuel angle, and the water content in the water-oil emulsion. Improved accuracy of data obtained from experimental studies has been achieved using cyclic data processing methods. The results of identification of a mathematical model are presented. The results of mathematical modeling are in good agreement with the experimental data, the nature and degree of influence of the considered factors on the processes of mixing and combustion are reflected adequately. The obtained results are the initial data for modeling the processes of soot and nitrogen oxides formation in a diesel cylinder. This will allow to adequately assess the effect of each of the selected parameters on the diesel performance and determine the set of parameters that ensure the most efficient use of VFE in diesel.

УДК 536.463

DOI: 10.20998/0419-8719.2018.1.05

В.В. Калинин, Т.А. Фудулей, А.К. Копейка, Ю.А. Олифиренко, Д.С. Дараков

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПЛАМЕНИ ПО СТРУЕ КАПЕЛЬ ЖИДКИХ ТОПЛИВ

Принимая во внимание значительные объемы потребления жидких топлив в мировом топливном балансе, одной из актуальных задач современности является снижение антропогенного влияния на биосферу путем полной или частичной замены минеральных топлив на их возобновляемые аналоги растительного происхождения. В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований процесса распространения пламени по одномерной совокупности капель этанола с добавкой воды до 50% по объему. В отличие от исследований процессов, сопровождающих горение одиночной капли жидких топлив, горение их совокупности, в виде струи, изучено в меньшей степени. Предложенная схема струйного генератора с вибрирующей иглой, позволяет получить достаточно устойчивую во времени (на протяжении 10 мин.), цепочку монодисперсных капель исследуемого топлива диаметром $d=490\pm 5$ мкм, с возможностью варьирования межкапельного расстояния. В качестве управляющих параметров для изменения этого расстояния использовались частота колебаний мембраны и величина постоянного давления на резервуар с жидкостью. С использованием разработанной методики проведения эксперимента были получены зависимости относительного расстояния между каплями, от величины постоянного давления на резервуар с жидким топливом, при различных частотах колебаний иглы генератора. Весь процесс распространения фронта пламени по цепочке монодисперсных капель фиксировался на видеосъемку с частотой 300 кадров/сек. Анализ результатов видеосъемки процесса распространения пламени позволил определить зависимость скорости распространения пламени от расстояния между каплями. Анализ качественной картины процесса показал, что с увеличением межкапельного расстояния, скорость распространения пламени падала. Экспериментально определено критическое расстояние между каплями, на порядок превышающее размер капли в условиях эксперимента, при котором прекращалось распространение пламени. Полученные результаты с достаточной степенью достоверности объясняются в рамках предложенного распространения пламени по одномерной системе монодисперсных капель.

Введение

В настоящее время негативное влияние антропогенного фактора на окружающую среду является одной из главных проблем человечества. Одним из способов решения этой проблемы является замена ископаемых топлив на их возобновляемые аналоги [1]. На сегодняшний день, применительно к двигателям внутреннего сгорания, в качестве альтернативы жидким моторным топливам (продуктам нефтепереработки), хорошо зарекомендовали себя биотоплива второго и третьего поколения (гомоло-

ги ряда низших спиртов, метиловые и этиловые эфиры жирных кислот, а также их смеси с бензином и дизельным топливом). Из-за сложности, одновременно протекающих в условиях камеры сгорания физико – химических процессов, очевидно, что простая замена традиционных топлив, на их биологические аналоги, не может выступать в качестве оптимального решения данной задачи, принимая во внимание отличие теплофизических свойств биотоплив и особенности поведения последних в условиях камеры сгорания ДВС. В отли-

© В.В. Калинин, Т.А. Фудулей, А.К. Копейка, Ю.А. Олифиренко, Д.С. Дараков, 2018