

УДК 621.438

**М. Р. ТКАЧ, Б. Г. ТИМОШЕВСЬКИЙ, О. С. МИТРОФАНОВ,
А. С. ПОЗНАНСЬКИЙ, А. Ю. ПРОСКУРИН**

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

ОСОБЛИВОСТИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЗГОРЯННЯ ПОРШНЕВИХ ДВИГУНІВ ПРАЦЮЮЧИХ З ДОБАВКАМИ СИНТЕЗ-ГАЗУ

Представлені результати досліджень роботи двигуна 2Ч 7,2/6 з іскровим запалюванням і зовнішнім сумішоутворенням при роботі на бензині з добавками синтез-газу. Отримано індикаторні діаграми і характеристики тепловиділення при роботі по навантажувальній характеристиці при добавках синтез-газу – 25...64%. Запропоновано універсальне рівняння для визначення швидкості тепловиділення при згорянні воденьмістких палив, що враховує змінний характер показника m при коефіцієнті надлишку повітря $1,1...1,22$. Визначено, що в залежності від величини добавки синтез-газу тривалість згоряння φ_z лежить в діапазоні $40...66^\circ$, а показник $m = 2,4...4,53$.

Ключові слова: синтез-газ, добавка, характеристики тепловиділення, коефіцієнті надлишку повітря, згоряння, індикаторна діаграма

Вступ

У сучасному двигунобудуванні однією з важливих проблем є вивчення способів ефективного використання альтернативних видів палив, а також заміщення традиційних палив альтернативними з метою підвищення ефективності енергетичної установки.

Одним з перспективних видів палив для ДВЗ, отриманих з відновлюваних джерел сировини, є синтез-газ [1, 2]. Переважно основними компонентами синтез-газу є водень (H_2) і монооксид вуглецю (CO), проте в залежності від вихідної сировини і способів отримання, до складу також можуть входити - метан (CH_4), етилен (C_2H_4), етан (C_2H_6) та інші компоненти. Завдяки наявності в складі синтез-газу водню значно поліпшуються екологічні показники роботи двигуна. Однак є й істотний недолік, який стримує широке використання синтез-газу в якості самостійного палива в ДВЗ. Це знижена питома теплота згоряння синтез-газу в порівнянні з традиційними паливами (25...30 МДж/кг), що призводить до зниження потужності двигуна. Одним з можливих рішень проблеми, пов'язаної з втратою потужності, при роботі ДВЗ на синтез-газі є використання синтез-газу в якості добавки до основного палива.

Чисельне моделювання робочого процесу двигуна з іскровим запалюванням, який працює на водні і синтез-газі різного складу, дозволяє встановити нові закономірності, уточнити механізм впливу водню і складу синтез-газу на основні параметри робочого циклу, а також оцінити раціональні межі зміни параметрів ДВЗ. Аналіз результатів моделювання дозволяє визначити подальші шляхи підвищення паливної ефективності, потужності і екологічності двигунів.

Для двигунів з іскровим запалюванням при математичному моделюванні для опису закону тепловиділення найбільш поширеним є використання напівемпіричного рівняння професора І.І. Вібе, яке досить адекватно працює для двигунів, що працюють на звичайному паливі, оскільки містить в собі значну кількість оброблених експериментальних даних різних двигунів. Для підвищення точності і достовірності математичної моделі робочого циклу ДВЗ, що працює на воденьмістких паливах, в рівняння тепловиділення, ґрунтуючись на експериментальних роботах, необхідно ввести ряд уточнень у зв'язку з фізико-хімічними особливостями згоряння водню [3-5].

Мета даної роботи полягає в дослідженні особливостей процесу згоряння в ДВЗ при роботі на бензині з добавками синтез-газу.

1. Постановка задачі

Основними методами дослідження є фізичне і математичне моделювання. Математичне моделювання дозволяє значно знизити матеріальні витрати на дослідження і отримати достовірні результати.

2. Виклад основного матеріалу

У наш час найбільш поширеною математичною моделлю процесу згоряння є однозонна. Перш за все це пов'язано з тим, що на відміну від двох і багатозонних моделей, в яких потрібно ставити велику

кількість граничних умов і необхідні значні витрати машинного часу при розрахунках, однозонна модель є більш простою і досить придатною для попереднього розрахунку процесу згоряння.

Визначення швидкості зміни тиску за кутом повороту колінчастого вала при згорянні і розширенні безпосередньо залежить від відносної швидкості тепловиділення $dx/d\varphi$. У двигунах із зовнішнім сумішоутворенням відбувається згорання заздалегідь підготовленої паливоповітряної суміші і виділення теплоти визначається швидкістю поширення фронту полум'я.

Швидкість тепловиділення може задаватися різними способами для різного типу двигунів як за допомогою напівемпіричних рівнянь тепловиділення, так і рівняннями, заснованими на нормальній і турбулентній швидкостях згоряння паливоповітряної суміші. Зокрема можуть застосовуватися емпіричні і напівемпіричні залежності: наприклад, рівняння Вібе, Пугачова, Гончара, Кошкіна, Генкіна, Іноземцева та ін. Для дизельних двигунів процес тепловиділення краще описує модель професора Разлейцева.

Для вирішення поставленого завдання методом математичного моделювання, за основу була взята модель робочого циклу, розроблена на кафедрі ДВЗ Національного університету кораблебудування. Основою для розрахунку служить рівняння першого закону термодинаміки для відкритої системи, представлено в диференціальній формі [6]:

$$dQ \pm \sum_{j=1}^n i_j dM_j = d(Mu) + p dV, \quad (1)$$

де dQ – елементарна кількість теплоти, підведеної до робочого тіла;

$\sum i_j dM_j$ – потік ентальпії, внесеної (+) або винесеної (–) з елементарними масами dM_j по відношенню до об'єму V ;

M – маса робочого тіла в циліндрі;

u – питома внутрішня енергія робочого тіла;

p – тиск в циліндрі.

З огляду на те, що процеси видимого згоряння керуються не хімічними, а фізичними законами, модель процесу згоряння, запропонована професором І. І. Вібе та реалізована в математичній моделі, розробленої на кафедрі ДВЗ НУК, певною мірою відображає фізичну сутність процесу згоряння і тому може бути використана для розрахунку швидкості тепловиділення в двигуні, що працює на синтез-газі.

Загальний вигляд напівемпіричного рівняння частки вигорілого палива запропонованого І. І. Вібе представлений нижче [6]:

$$x = 1 - \exp \left[\ln(1 - x_z) \left(\frac{t}{t_z} \right)^{m+1} \right], \quad (2)$$

де x_z – коефіцієнт тепловиділення в момент завершення процесу згоряння;

t/t_z – відносний час з моменту початку згоряння, рівний безрозмірному куту повороту колінчастого вала двигуна φ/φ_z при постійній кутовій швидкості;

t_z – загальна тривалість згоряння;

m – емпіричний коефіцієнт характеру згоряння.

Гарний збіг результатів розрахунку з експериментальними даними спостерігається при $x_z = 0,95$. Тоді вираз $\ln(1 - x_z)$ – величина постійна, відповідно взявши $\ln(1 - x_z) = C = -2,9957$.

Швидкість тепловиділення при згорянні, яка необхідна для підстановки в диференціальне рівняння моделі процесу згоряння-розширення, отримана шляхом диференціювання рівняння (2). В результаті маємо рівняння

$$\frac{dx}{d(t/t_z)} = -C(m+1) \left(\frac{t}{t_z} \right)^m \exp \left[C \left(\frac{t}{t_z} \right)^{m+1} \right]. \quad (3)$$

У дизельних двигунах максимум тепловиділення розташований ближче до початку згоряння, ніж в двигунах з примусовим запалюванням. Це впливає на коефіцієнт m , значення якого для бензинових двигунів знаходиться в межах 3...4, а для дизельних – 0,3...0,7.

На характер згоряння синтез-газу в двигунах з примусовим запалюванням великий вплив має наявність водню, згоряння якого супроводжується різким наростанням тиску. У зв'язку з цим в двигунах, що працюють на синтез-газі, m , Θ і φ_z встановлюються індивідуально для кожного складу суміші. Тому використання напівемпіричних рівнянь І. І. Вібе вимагає наявності експериментальних даних згоряння синтез-газу різного складу в робочому циліндрі ДВЗ. Виходячи з цього необхідно для підвищення точності математичної моделі на базі значної кількості експериментальних даних ввести корективи в математичний опис процесу згоряння синтез-газу.

Експериментальні індикаторні діаграми при роботі двигуна 2Ч 7,2/6 по навантажувальній характеристиці з добавками синтез-газу представлені на рис. 1. Потужність двигуна складала 3 кВт, частота обертання колінчастого вала – 3000 об/хв. При добавках синтез-газу до бензину коефіцієнт надлишку повітря α лежав в межах 1,1...1,22.

На основі аналізу і обробки експериментальних індикаторних діаграм отримані характеристики тепловиділення для двигуна 2Ч 7,2/6 при використанні масової добавки синтез-газу до бензину в діапазоні 25...65 %.

Відносна швидкість тепловиділення при цьому на 7...16 % вище в порівнянні з роботою двигуна на бензині, причому зростання величини добавки син-

тез-газу призводить до зростання відносної швидкості тепловиділення (рис. 2).

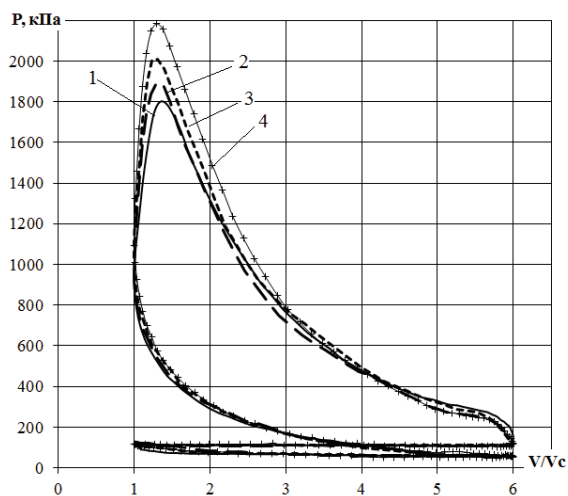


Рис. 1. Індикаторна діаграма двигуна 2С 7,2/6 при різних добавках синтез-газу до бензину: 1 – бензин; 2, 3, 4 – добавка синтез-газу 28%, 32% і 64% відповідно



Рис. 2. Розрахункові і експериментальні характеристики тепловиділення при роботі двигуна 2С 7,2/6 на бензині з добавками синтез-газу

Аналізуючи експериментальні і теоретичні характеристики відносної швидкості тепловиділення можна зробити висновок, що в залежності від величини добавки синтез-газу, показник характеру згоряння m лежить в діапазоні 2,4...4,53, а тривалість згоряння φ_z – 40...66°.

Частка вигорілого палива по куту повороту колінчастого вала представлені на рис. 3.

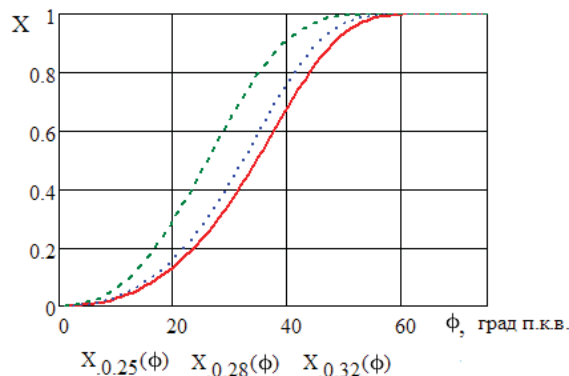


Рис. 3. Частка вигорілого палива в залежності від величини добавки синтез-газу до бензину

На основі аналізу і обробки експериментальних індикаторних діаграм двигуна 2С 7,2/6, що працює на бензині з добавками синтез-газу, запропоновано для знаходження змінного значення m використовувати рівняння прямої [7]:

$$m_i = a \cdot \varphi_i \cdot \frac{\varphi_z'}{\varphi_z} + b, \quad (4)$$

$$a = -0,1681 \cdot C_{CG}^3 + 0,284 \cdot C_{CG}^2 - 0,1148 \cdot C_{CG} + 0,0281, \\ b = 10,317 \cdot C_{CG}^3 - 14,877 \cdot C_{CG}^2 + 5,6164 \cdot C_{CG} + 2,5967,$$

де m_i – поточне значення показника згоряння по куту повороту;

φ_i – поточне значення кута періоду згоряння;

C_{CG} – добавка синтез-газу, %.

Для визначення тривалості згоряння φ_z на основі експериментальних даних для різних значень концентрації водню було запропоновано наступне рівняння:

$$\varphi_z = \varphi_z' + \Delta\varphi, \quad (5)$$

$$\varphi_z' = -16,315 \cdot C_{CG}^2 - 2,239 \cdot C_{CG} + 68,045,$$

$$\Delta\varphi = -46,321 \cdot C_{H_2}^2 + 17,329 \cdot C_{H_2} + 1,234,$$

де C_{H_2} – концентрація водню в складі синтез-газу.

Швидкість тепловиділення при згорянні, яка необхідна для підстановки в диференціальне рівняння моделі процесу згоряння-розширення, отримана шляхом диференціювання рівняння (2) з урахуванням зміни показника згоряння m від кута повороту колінчастого вала. В результаті маємо уні-

версальне рівняння для визначення швидкості тепловиділення при згорянні воденьмістких палив:

$$\frac{dx}{d\varphi} = -\frac{C}{\varphi_z} \left(\frac{\varphi_i}{\varphi_z} \right)^{a\varphi_i+b} \cdot \exp C \left(\frac{\varphi_i}{\varphi_z} \right)^{a\varphi_i+b+1} \times \left(a\varphi_i \ln \left(\frac{\varphi_i}{\varphi_z} \right) + a\varphi_i + b + 1 \right). \quad (6)$$

Висновок

1. Встановлено, що відносна швидкість тепловиділення вище в порівнянні з роботою двигуна на бензині на 7...16%, причому зростання величини добавки синтез-газу з 25 до 64% призводить до зростання відносної швидкості тепловиділення.

2. Запропоновано універсальне рівняння для визначення швидкості тепловиділення при згорянні воденьмістких палив, яке враховує змінний характер показника m при коефіцієнті надлишку повітря $1,1...1,22$.

3. Отримані експериментальні характеристики тепловиділення при роботі двигуна 2Ч 7,2/6 на бензині з добавками синтез-газу, які досить чітко збігаються з розрахунковими.

4. Добавка синтез-газу до бензину зменшує тривалість згоряння. Так в залежності від величини добавки синтез-газу тривалість згоряння φ_z лежить в діапазоні 40...66°, а показник $m = 2,4...4,53$.

Література

1. Данилов, А. М. *Альтернативные топлива: достоинства и недостатки. Проблемы применения* [Текст] / А. М. Данилов, Э. Ф. Каминский, В. А. Хавкин // *Российский химический журнал*. – 2003. – Т. 47, № 6. – С. 4-11.
2. Шкалова, В. П. *Применение нетрадиционных топлив в дизелях* [Текст] / В. П. Шкалова. – М. : НИИД, 1986. – 85 с.
3. *Анализ работы поршневого двигателя на водороде* [Текст] / И. Л. Варшавский, А. И. Мищенко, А. А. Макаров и др. // *Изв. вузов. Машиностроение*. – 1977. – № 10. – С. 110-114.
4. *Експериментальне дослідження параметрів поршневого ДВЗ із системою термoxiмічної конверсії біоетанолу* [Текст] / Б. Г. Тимошевський, М. Р. Ткач, О. С. Митрофанов и др. // *Двигатели внутреннего сгорания*. – 2011. – № 2. – С. 3-8.
5. Verhelst, S. *A study of the combustion in hydrogen-fuelled internal combustion engines* [Text] / S. Verhelst / Department of Flow, Heat and Combustion Me-

chanics, Ghent University.–Belgium : Ghent University, 2005. – 222 p.

6. *Двигатели внутреннего сгорания : Теория поршневых и комбинированных двигателей* [Текст] : учеб. для вузов / Д. Н. Вырубов, Н. А. Иващенко, В. И. Ивин и др. ; под ред. А. С. Орлина, М. Г. Круглова ; 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1983. – 372 с.

7. *Характеристики процесса сгорания ДВС 2Ч 7,2/6 с добавками до 65 % синтез-газа к бензину* [Текст] / Б. Г. Тимошевский, М. Р. Ткач, А. С. Познанский и др. // *Двигатели внутреннего сгорания*. – 2015. – № 1. – С. 33-37.

References

1. Danilov, A. M., Kaminskij, Je. F., Havkin, V. A. *Al'ternativnye topliva : dostoinstva i nedostatki. Problemy primeneniya* [Alternative fuels: advantages and disadvantages. Problems of application]. Ros. khim. zh. (Zh. Ros. khim. ob-va im. D. I. Mendeleeva), 2003, vol. 47, no. 91, pp. 4-11.
2. Shkalova, V. P. *Primenenie netraditsionnykh topliv v dizelyakh* [Application of non-traditional fuels in diesel engines]. Moscow, NIAD, 1986. 86 p.
3. Varshavskiy, I. L., Mishchenko, A. I., Makarov, A. A., Talda, G. B. *Analiz raboty porshneвого dvigatelya na vodorode* [Analysis of the work of the reciprocating engine on hydrogen]. Izv. vuzov. Mashinostroenie, 1977, no. 10, pp. 110-114.
4. Ty'moshevs'ky'j, B. G., Tkach, M. R., My'trofanov, O. S., Poznans'ky'j, A. S., Proskurin, A. Yu. *Ekspery'mental'ne doslidzhennya parametriv porshneвого DVZ iz sy'stemoyu termoximichnoyi konversiyi bioetanolu* [Experimental research of parameters piston ICE with bioethanol conversion thermochemical system]. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya*, 2011, no. 12, pp. 3-8.
5. Verhelst, S. *A study of the combustion in hydrogen-fuelled internal combustion engines*. Department of Flow, Heat and Combustion Mechanics, Ghent University.–Belgium : Ghent University, 2005. – 222 p.
6. Vyrubov, D. N., Ivashchenko, N. A., Ivin, V. I. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya: Teoriya porshnevyykh i kombinirovannykh dvigateley* [Internal combustion engines: Theory of reciprocating and combined engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1983. 372 p.
7. Timoshevskiy, B. G., Tkach, M. R., Poznanskiy, A. S., Mitrofanov, A. S., Proskurin, A. Yu. *Kharakteristiki protsessa sgoraniya DVS 2Ch 7,2/6 s dobavkami do 65 % sintez-gaza k benzinu* [Characteristics of the 2 cylinder 4-stroke engine 7,2/6 with additives to 65% of synthesis gas to gasoline]. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya*, 2015, no. 1, pp. 33-37.

Надійшла до редакції 06.04.2017, розглянута на редколегії 12.06.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф., заслужений діяч науки і техніки України, завідувач кафедри проектування авіаційних двигунів С. В. Єпіфанов, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ», Харків.

ОСОБЕННОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА СГОРАНИЯ ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ РАБОТАЮЩИХ С ДОБАВКАМИ СИНТЕЗ-ГАЗА

М. Р. Ткач, Б. Г. Тимошевский, А. С. Митрофанов, А. С. Познанский, А. Ю. Проскурин

Представлены результаты исследований работы двигателя 2Ч 7,2/6 с искровым зажиганием и внешним смесеобразованием при работе на бензине с добавками синтез-газа. Получены индикаторные диаграммы и характеристики тепловыделения при работе по нагрузочной характеристике при добавках синтез-газа - 25...64%. Предложено универсальное уравнение для определения скорости тепловыделения при сгорании водородосодержащих топлив, которое учитывает переменный характер показателя m при коэффициенте избытка воздуха 1,1...1,22. Определено, что в зависимости от величины добавки синтез-газа продолжительность сгорания φ_z лежит в диапазоне 40...66°, а показатель $m = 2,4...4,53$.

Ключевые слова: синтез-газ, добавка, характеристики тепловыделения, коэффициент избытка воздуха, сгорание, индикаторная диаграмма.

PECULIARITIES OF COMBUSTION PROCESS MATHEMATICAL MODELING OF PISTON-ENGINES WORKING WITH SYNTHESIS GAS ADDITIVES

M. R. Tkach, B. G. Tymoshevskiy, O. S. Mytrofanov, A. S. Poznanskyi, A. Y. Proskurin

Presented are the results of studies of the engine operation 2H 7.2/6 with spark ignition and external mixture formation when working on gasoline with synthesis gas additives. Indicator diagrams and heat dissipation characteristics are obtained for work on the load characteristic with additions of synthesis gas - 25...64%. A universal equation is proposed for determining the rate of heat release during the combustion of hydrogen-containing fuels, which takes into account the variable nature of the exponent m with an air excess ratio of 1.1...1.22. It is determined that, depending on the amount of the synthesis gas addition, the combustion time φ_z lies in the range 40...66°, and the exponent $m = 2.4...4.53$.

Keywords: synthesis gas, additive, heat dissipation characteristics, air excess ratio, combustion, indicator diagram.

Ткач Михайло Романович – д-р техн. наук, проф., зав. каф. інженерної механіки та технології машинобудування, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна, e-mail: mykhaylo.tkach@nuos.edu.ua.

Тимошевський Борис Георгійович – д-р техн. наук, проф., зав. каф. двигунів внутрішнього згорання, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна, e-mail: btym@mksat.net.

Митрофанов Олександр Сергійович – канд. техн. наук, доц. каф. двигунів внутрішнього згорання, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна, e-mail: m.aleksandr.s@mail.ru.

Познанський Андрій Станіславович – викл. каф. інженерної механіки та технології машинобудування, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна, e-mail: andreypoznansky@gmail.com.

Проскурін Аркадій Юрійович – канд. техн. наук, доц. каф. двигунів внутрішнього згорання, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна, e-mail: arkadii.proskurin@nuos.edu.ua.

Tkach Mykhaylo Romanovych – Doctor of Technical Science, Professor, Head of Dept. of Mechanical Engineering and Manufacturing Engineering, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: mykhaylo.tkach@nuos.edu.ua.

Tymoshevskiy Boris Georgievych – Doctor of Technical Science, Professor, Head of Dept. of Internal Combustion Engines, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: btym@mksat.net.

Mytrofanov Oleksandr Sergijovych – Candidate of Technical Science, Assistant Professor of Dept. of Internal Combustion Engines, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: m.aleksandr.s@mail.ru.

Poznanskyi Andrii Stanislavovych – Lecturer of Dep. of Mechanical Engineering and Manufacturing Engineering, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: andreypoznansky@gmail.com.

Proskurin Arkadii Yuriyovych – Candidate of Technical Science, Assistant Professor of Dept. of Internal Combustion Engines, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: arkadii.proskurin@nuos.edu.ua.