

УДК 621.431
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2026.2\(505\).9](https://doi.org/10.15589/znp2026.2(505).9)

CURRENT RELEVANCE AND PROSPECTS FOR THE USE OF SYNGAS IN INTERNAL COMBUSTION ENGINES

АКТУАЛЬНІСТЬ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ СИНТЕЗ-ГАЗУ В ДВЗ

Dmytro M. Melekh
dmelekh94@gmail.com
ORCID: 0009-0008-4475-3465

Д. М. Мелех,
аспірант

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

Abstract. Purpose. To investigate the relevance and prospects of using syngas as an alternative fuel for internal combustion engines, taking into account its influence on the energy, economic, and environmental performance of the engine, as well as to determine the most appropriate directions for its practical application.

Method. To achieve this goal, methods of analytical review, systematization, generalization, and comparative analysis of modern experimental, computational, and review studies devoted to the use of syngas in spark-ignition engines, compression-ignition engines, and dual-fuel systems were applied. Particular attention was paid to comparing the influence of syngas composition, excess air ratio, ignition parameters, and mixture formation conditions on the performance of the working process.

Results. Modern scientific approaches to the use of syngas in internal combustion engines were generalized. It was shown that the use of syngas can intensify combustion, improve fuel efficiency, and reduce certain harmful emissions; however, an excessive share of gaseous additive may lead to a decrease in power output and an increase in the severity of the working process. The decisive influence of H_2 , CO, CO_2 , and N_2 content, as well as the fuel supply method and ignition parameters, on engine efficiency and environmental performance was established.

Scientific novelty. The results of modern studies on the use of syngas in gasoline, dual-fuel, and marine engines were systematized and generalized, which made it possible to identify the main patterns of its influence on working process indicators, fuel efficiency, and exhaust gas toxicity.

Practical importance. The obtained results can be used to substantiate the feasibility of applying syngas in mixed and dual-fuel schemes, as well as for further optimization of fuel mixture composition, ignition parameters, and operating modes of internal combustion engines.

Key words: syngas; internal combustion engine; dual-fuel; alternative fuel; gasification; environmental performance; fuel efficiency.

Анотація. Мета. Дослідити актуальність та перспективи використання синтез-газу як альтернативного палива для двигунів внутрішнього згоряння з урахуванням його впливу на енергетичні, економічні та екологічні показники двигуна, а також визначити найбільш доцільні напрями його практичного застосування.

Методика. Для досягнення поставленої мети використано методи аналітичного огляду, систематизації, узагальнення та порівняльного аналізу сучасних експериментальних, розрахункових і оглядових досліджень, присвячених застосуванню синтез-газу в двигунах з іскровим запалюванням, двигунах із запалюванням від стиснення та у двопаливних схемах. Особливу увагу приділено порівнянню впливу складу синтез-газу, коефіцієнта надлишку повітря, параметрів запалювання та умов сумішоутворення на показники робочого процесу.

Результати. Узагальнено сучасні наукові підходи до використання синтез-газу в ДВЗ. Показано, що застосування синтез-газу може забезпечувати інтенсифікацію згоряння, покращення паливної економічності та зниження окремих шкідливих викидів, однак за надмірної частки газової добавки можливі зниження потужності та зростання жорсткості робочого процесу. Встановлено визначальний вплив вмісту H_2 , CO, CO_2 та N_2 , а також способу подачі палива і параметрів займання на ефективність та екологічні показники двигуна.

Наукова новизна. Проведено систематизацію та узагальнення результатів сучасних досліджень щодо використання синтез-газу в бензинових, двопаливних і судових двигунах, що дало змогу виявити основні закономірності його впливу на показники робочого процесу, паливну економічність та токсичність відпрацьованих газів.

Практична значимість. Отримані результати можуть бути використані для обґрунтування доцільності засто-

сування синтез-газу у змішаних і двопаливних схемах, а також для подальшої оптимізації складу паливної суміші, параметрів запалювання та режимів роботи двигунів внутрішнього згоряння.

Ключові слова: синтез-газ; двигун внутрішнього згоряння; dual-fuel; альтернативне паливо; газифікація; екологічність; паливна ефективність.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Сучасна енергетика та транспорт перебувають у стані інтенсивного переходу до більш екологічно сталих технологій. Одним із ключових факторів цього переходу є необхідність скорочення викидів парникових газів, оксидів азоту, твердих частинок та інших шкідливих компонентів, що утворюються при використанні традиційних викопних палив. Особливо гостро ця проблема проявляється у сфері морського транспорту, де поряд із високими вимогами до надійності та енергоефективності суднових енергетичних установок посилюються міжнародні екологічні обмеження. Саме тому актуальним є пошук альтернативних палив, які можна інтегрувати в існуючі двигунні системи без повної відмови від наявної технічної бази.

Одним із перспективних напрямів є використання синтез-газу як моторного палива для двигунів внутрішнього згоряння. Синтез-газ являє собою суміш горючих і баластних компонентів, яка може утворюватися при газифікації біомаси, твердих побутових відходів, органічних залишків або інших вуглецевмісних матеріалів. Основними його складовими є H_2 , CO , CH_4 , CO_2 та N_2 , а співвідношення між ними суттєво залежить від вихідної сировини, типу газифікатора, умов процесу та ступеня очищення газу. Така паливна гнучкість робить синтез-газ привабливим з точки зору ресурсної бази, однак водночас ускладнює його використання у ДВЗ через мінливість фізико-хімічних характеристик.

Синтез-газ має нижчу теплоту згоряння порівняно з природним газом, бензином і дизельним паливом, що часто призводить до зниження літрової потужності двигуна. Крім того, на характер його згоряння істотно впливають вміст водню, оксиду та діоксиду вуглецю, коефіцієнт надлишку повітря, спосіб подачі палива й режим займання. У зв'язку з цим виникає необхідність не лише оцінки загальної доцільності використання синтез-газу, а й систематизації сучасних наукових підходів до підвищення ефективності його застосування в двигунах різних типів.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Глобальний попит на енергію продовжує зростати, водночас викопне паливо й надалі забезпечує понад 80 % первинної енергії [1]. Разом із тим потужності відновлюваної енергетики швидко збільшуються завдяки зниженню витрат, інвестиціям і технологічним досягненням. У 2024 році відновлювані джерела енергії додали 585 ГВт, що становило 92,5 % усіх нових потужностей електроенергетики, закріпивши

за собою провідне місце у глобальному енергетичному розвитку. Серед них термохімічна конверсія біомаси залишається критично важливою для промислового застосування, забезпечуючи майже 89 % споживання відновлюваного тепла у 2022 році та підкреслюючи свою важливість не лише для виробництва електроенергії [2].

Після відповідного очищення та підготовки синтез-газ може використовуватися в двигунах внутрішнього згоряння для вироблення електроенергії. Порівняно з іншими видами палива, отримуваними з біомаси, синтез-газ забезпечує чисте згоряння та відносно просту інтеграцію в ДВЗ. У двигунах з іскровим запалюванням (SI) потрібні лише незначні модифікації, такі як налаштування впускного колектора або дросельної заслінки, тоді як у двигунах із запалюванням від стиснення його висока температура самозаймання зазвичай вимагає роботи за газо-дизельним циклом з використанням запальної дози дизельного палива. Експериментальні та теоретичні дослідження показали суттєві переваги стратегій використання синтез-газу та дизельного палива, зокрема зниження викидів NO_x і твердих частинок, хоча інколи це супроводжується збільшенням викидів CO , сумарних вуглеводнів або зниженням гальмівної потужності [3].

За таких умов зростає потреба у підвищенні ефективності двигунів внутрішнього згоряння та контролю викидів. Синтез-газ є перспективним рішенням для скорочення викидів парникових газів за умови використання наявної інфраструктури ДВЗ і дає змогу застосовувати гібридні або двопаливні стратегії [4].

Останні досягнення поглибили розуміння використання синтез-газу. Моделювальні системи дедалі частіше інтегрують машинне навчання з обчислювальною гідродинамікою для прогнозування продуктивності газифікатора та виходу синтез-газу в різних конфігураціях. Розробка каталізаторів, таких як стабільні системи Ni/Ca_3AlO , продемонструвала поліпшене виробництво багатого на водень синтез-газу та його довговічність в умовах парової газифікації [5].

Нещодавні дослідження розширили наше розуміння роботи двигуна завдяки використанню моделювання повного циклу двигуна з реалістичним складом синтез-газу, отриманого внаслідок газифікації біомаси, який зазвичай містить до 50 % водню. В роботі M. Costa, M. V. Prati, L. De Simio, S. Iannaccone, D. Piazzullo [6] застосували тривимірну обчислювальну гідродинаміку до мікро-комбінованого двигуна внутрішнього згоряння з іскровим запалюванням (SI), що працює на біомасі. Їхні результати

показали, що використання інертних газів для розбавлення, таких як CO_2 і N_2 , знижує нижчу теплотворну здатність і температуру в циліндрі. Водночас помірна концентрація водню (20–30 об.%) допомагає підтримувати ефективність.

В дослідженнях N. Jamsran, H. Park, J. Lee, S. Oh, C. Kim, Y. Lee, K. Kang [7; 8] вказують, що повна заміна традиційних видів палива синтетичним газом у двигунах внутрішнього згоряння технічно можлива, однак пряма робота двигуна внутрішнього згоряння з природним всмоктуванням на синтетичному газі зазвичай призводить до втрати потужності на 20–30 % через його нижчу теплотворну здатність порівняно з природним газом (~37 МДж/кг). Для пом'якшення цього обмеження широко досліджується змішування синтетичного газу з паливом із високою теплотворною здатністю (наприклад, бензином, природним газом, воднем).

В роботі J. R. C. Rey, A. Longo, B. Rijo, C. Mateos-Pedrero, P. Brito, C. Nobre [9] визначено, що основним обмеженням синтез-газу в двигунах внутрішнього згоряння є його низька енергетична щільність, що безпосередньо призводить до зниження потужності при використанні як єдиного палива. Склади синтез-газу, збагачені воднем, допомагають частково компенсувати цей недолік, покращуючи стабільність згоряння на збіднених сумішах, надійність займання та термічний ККД, однак вони не здатні повністю усунути втрату потужності.

На практиці змішування синтез-газу з високотеплотворними видами палива, такими як бензин, природний газ або водень, виявляється найефективнішою стратегією для досягнення балансу між підвищенням ефективності та прийнятними рівнями викидів. Важливо зазначити, що регулювання ступеня стиску, моменту запалювання та наддуву може додатково оптимізувати характеристики, але вплив цих параметрів суттєво залежить від конкретного двигуна. У перспективі гібридні стратегії подачі палива та удосконалене керування згорянням, підтримані прогнозними CFD- та AI-моделями, пропонують перспективні шляхи для розкриття потенціалу синтез-газу в ДВЗ за одночасної мінімізації притаманних йому втрат потужності.

В дослідженнях M. Costa, M. La Villetta, N. Massarotti, D. Piazzullo, V. Rocco, R. Karthikeyan, S. Srinivasan, S. Shanmugam, M. Mohanraj [10; 11] стверджують, що дизельні двигуни добре підходять для використання синтез-газу завдяки їхній високій ефективності та надійності. Однак через високу температуру самозаймання синтез-газу робота зазвичай здійснюється в режимі DF (dual-fuel), де дизельне паливо слугує запальником для займання (10–20 об.% від загальної кількості палива).

В дослідженнях O. Bongomin, C. Nzila, J. I. Mwasiagi, O. Maube, M. Talibi, P. Hellier,

N. Ladommatis [5; 12] показано, що синтез-газ із вищою часткою H_2 підвищує ефективність згоряння та зменшує викиди CO і HC , хоча й ціною збільшення викидів NO_x . Натомість синтез-газ, збагачений CO (>34 %), знижує ефективність і підвищує рівень викидів. Також продемонстрували, що розбавлення синтез-газу CO_2 істотно знижує температуру згоряння, що призводить до зменшення викидів NO_x , але збільшення викидів CO . Дослідження з використанням моделювання та експериментальні роботи підтверджують, що оптимізовані стратегії пілотного впорскування мають вирішальне значення для досягнення балансу між ефективністю та викидами.

В роботі D. S. Pérez Gordillo, J. M. Mantilla González [13] зазначається, що застосування синтез-газу в двигунах внутрішнього згоряння демонструє як потенціал, так і обмеження. У дослідженнях двигунів із іскровим запалюванням поширеною є думка, що помірні частки водню (15–35 об.%) покращують стабільність займання та поширення полум'я, тоді як розбавлення CO_2 і N_2 знижує викиди NO_x за рахунок зменшення температури полум'я. Водночас зберігаються суперечності щодо сумарного впливу збагачення воднем на викиди. Деякі CFD-дослідження повідомляють про зростання викидів NO_x за вищого вмісту H_2 через вищі пікові температури, тоді як інші спостерігають зниження NO_x в умовах збідненої суміші, де швидше згоряння скорочує час перебування за підвищених температур. Ці розбіжності підкреслюють сильну залежність результатів від коефіцієнта еквівалентності, робочого навантаження та рівня розбавлення.

У конфігураціях CI та DF синтез-газ часто відзначають за зниження викидів NO_x при частковому заміщенні дизельного пілотного палива, однак низка досліджень вказує на зниження ефективності та зростання викидів CO або незгорілих вуглеводнів, особливо за високих рівнів заміщення [14]. Це свідчить про те, що робота на двох видах палива забезпечує екологічні переваги, але потребує оптимізації моменту впорскування та коефіцієнтів заміщення для мінімізації недоліків.

Більш широкою методологічною проблемою в дослідженнях двигунів є часте використання синтетичних сумішей синтез-газу з вмістом водню, що суттєво перевищує той, який зазвичай отримують під час газифікації біомаси (>50 об.%) [15]. Такі склади дають оптимістичні прогнози продуктивності, але мають обмежену практичну значущість. Ця невідповідність підкреслює потребу в майбутніх дослідженнях із використанням реалістичних складів синтез-газу, отриманих у результаті газифікації, та у систематичному порівнянні результатів для двигунів SI, CI та DF.

В роботі [9] стверджують, що більшість досліджень синтез-газу зосереджені на двигунах із іскровим запалюванням, тоді як застосування в CI та

двопаливних (DF) схемах вивчене значно слабше. CFD-роботи показують, що безпосереднє впорскування синтез-газу в CI може забезпечити високу ефективність за нижчих NO_x , а DF-підходи перспективні для підвищення ефективності та зниження NO_x , але компроміси з викидами CO/HC поки недостатньо кількісно оцінені. Додатково бракує інтеграції між дослідженнями газифікації (яка визначає мінливість складу синтез-газу) і моделюванням двигунів; потрібні перевірені кінетичні механізми в умовах, характерних для ДВЗ, використання реалістичних «біомасних» складів синтез-газу (без надмірно водневих сумішей), а також більше CFD-досліджень для CI/DF систематичних порівнянь і метааналізів, щоб узгодити суперечливі результати (зокрема щодо впливу H_2 і CO на NO_x) та отримати повну картину «від сировини до характеристик двигуна».

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Попри значну кількість досліджень, пов'язаних із використанням синтез-газу в ДВЗ, низка важливих аспектів залишається недостатньо опрацьованою. Передусім це стосується мінливості складу синтез-газу, яка в реальних умовах визначається не лише видом сировини, а й режимами газифікації, ступенем очищення та особливостями логістики палива. Багато експериментальних і чисельних робіт базуються на умовно стабільних або надмірно збагачених воднем сумішах, що обмежує практичну цінність отриманих результатів для реальних енергетичних установок.

Недостатньо повно досліджено компроміс між зниженням NO_x та погіршенням повноти згоряння. З одного боку, збільшення частки інертних компонентів і збіднення суміші сприяють зменшенню пікових температур і викидів оксидів азоту. З іншого – це може викликати зростання CO, HC, пропуски займання та падіння потужності. Для різних типів двигунів, особливо CI і DF, ці взаємозв'язки залишаються неоднозначними і потребують системного узагальнення.

Окремою невирішеною проблемою є інтеграція результатів досліджень газифікації та досліджень робочого процесу ДВЗ. У багатьох випадках розглядаються або властивості синтез-газу як продукту термохімічної конверсії, або поведінка двигуна на штучно заданих газових сумішах. Проте для практичного застосування необхідний підхід, який поєднує джерело сировини, параметри одержання синтез-газу, його очищення, склад, подачу до двигуна та кінцеві енергетичні й екологічні показники установки.

Метою дослідження є узагальнення сучасних наукових підходів та оцінка актуальності і перспектив використання синтез-газу в двигунах внутрішнього згоряння з урахуванням енергетичних, екологічних і конструктивно-експлуатаційних особливостей, а також визначення найбільш доцільних напрямів його застосування.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Методичною основою роботи є аналітичний огляд, порівняльний аналіз, систематизація та узагальнення результатів сучасних експериментальних, розрахункових і оглядових досліджень, присвячених використанню синтез-газу в двигунах внутрішнього згоряння. У роботі використано підхід, що поєднує аналіз фізико-хімічних властивостей синтез-газу, особливостей його згоряння в SI, CI та dual-fuel системах.

Об'єктом дослідження є робочий процес двигунів внутрішнього згоряння, які працюють на синтез-газі або на його сумішах із традиційними паливами.

Предметом дослідження є вплив складу синтез-газу, способу його подачі, умов займання, коефіцієнта надлишку повітря, параметрів наддуву й керування згорянням на ефективність, потужність та екологічні показники двигунів внутрішнього згоряння.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

В дослідженні G. Fan, Z. Zheng, Z. Zhu [16] розглянуто вплив домішування синтез-газу до бензину на характеристики згоряння та утворення викидів у бензиновому двигуні з безпосереднім впорскуванням. Автори показали, що використання синтез-газу в складі двопаливної суміші може бути ефективним способом інтенсифікації згоряння та зниження окремих шкідливих викидів за умови раціонального вибору частки газової добавки (рис. 1).

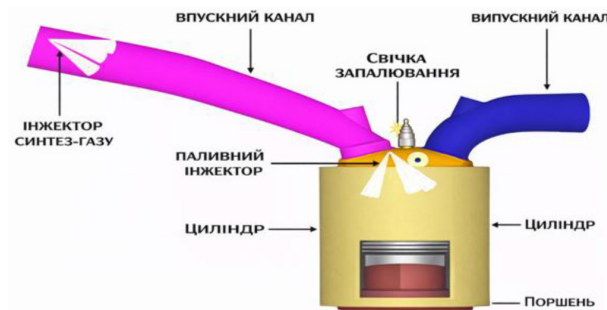


Рис. 1. Концептуальна модель камери згоряння двигуна з подвійним живленням [16]

Дослідження виконано методом чисельного моделювання для режиму 2000 об/хв із варіюванням масової частки синтез-газу в паливній суміші від 0 до 20 %. Такий підхід дав змогу оцінити зміну тиску й температури в циліндрі, інтенсивність тепловиділення та формування основних компонентів викидів залежно від складу палива (рис. 2).

Ключовим результатом дослідження є встановлення нелінійного впливу частки синтез-газу на перебіг робочого процесу. Показано, що зі збільшенням його вмісту середні значення тиску і температури в циліндрі спочатку зростають, а після досягнення певної межі починають зменшуватися. Максимальне підвищення тиску становило 27,5 %, температури – 2,97 %, а

Таблиця 1. Обсяги впорскування палив 1–5 [16]

Паливо	Кількість синтез-газу (кг)	Кількість бензину (кг)	Частка синтез-газу (α_{sm})
Паливо 1	0	$6.5026 \cdot 10^{-5}$	0
Паливо 2	$3.2827 \cdot 10^{-6}$	$6.2372 \cdot 10^{-5}$	5 %
Паливо 3	$6.6297 \cdot 10^{-6}$	$5.9667 \cdot 10^{-5}$	10 %
Паливо 4	$1.0043 \cdot 10^{-5}$	$5.6909 \cdot 10^{-5}$	15 %
Паливо 5	$1.3524 \cdot 10^{-5}$	$5.4096 \cdot 10^{-5}$	20 %

а пікова миттєва швидкість тепловиділення зросла на 32,1 %. Найкращі результати в межах дослідження отримано для режиму Fuel 3, що відповідає 10 % синтез-газу в суміші. Саме за цих умов процес тепловиділення був найінтенсивнішим, а його тривалість – найменшою, що свідчить про вищу термічну ефективність робочого циклу. Відповідні зміни середнього тиску і температури в циліндрі наведено на рис. 2 [16].

Щодо екологічних показників, показано, що зі зростанням частки синтез-газу в паливній суміші викиди NO_x поступово зменшуються, а максимальне зниження досягає 27,4 %. Викиди незгорілих вуглеводнів змінюються немонотонно: спочатку зменшуються, а потім знову зростають, при цьому найбільше зниження становило 7,6 %. Для CO_2 встановлено негативну кореляцію з часткою синтез-газу. Крім того, автори відзначають, що підвищення вмісту H_2 у синтез-газі сприяє істотному зниженню викидів CO – до 65 %, тоді як вплив співвідношення H_2/CO на викиди УНС виявився незначним.

Результати дослідження підтверджують, що домішування синтез-газу до бензину може покращувати

інтенсивність згоряння і сприяти зниженню частини шкідливих викидів, однак цей ефект є не лінійним і суттєво залежить як від частки синтез-газу, так і від його компонентного складу. Це дає підстави стверджувати, що для практичного використання синтез-газу в бензинових двигунах найбільш доцільним є не максимальне заміщення традиційного палива, а підбір оптимальної частки газової добавки з відповідним налаштуванням параметрів робочого процесу. Повний перехід на синтез-газ без адаптації системи живлення і керування може супроводжуватися зниженням питомої потужності двигуна, тому найбільш перспективними є саме змішані паливні стратегії.

В статті Б. Г. Тимошевський, М. Р. Ткач, А. С. Познанський, А. С. Митрофанов, А. О. Проскурін [17] досліджено вплив добавки синтез-газу до бензину на перебіг згоряння в двигуні 2Ч 7,2/5, зокрема на швидкість наростання тиску в циліндрі, яка характеризує жорсткість робочого процесу. Автори виходять із того, що використання синтез-газу як добавки до традиційного палива є одним із практичних шляхів адаптації ДВЗ до альтернативних палив без повного переходу на нову паливну систему. Для оцінки цього впливу застосовано фізичне моделювання робочого процесу на експериментальній установці з реєстрацією індикаторних діаграм (рис. 3).

Додавання синтез-газу до бензину супроводжується підвищенням максимального тиску згоряння та зміщенням його положення ближче до верхньої мертвої точки. При використанні добавок синтез-газу в межах 28...64 % максимальний тиск зростав до 211 кПа, а його максимум зміщувався на 7° повороту

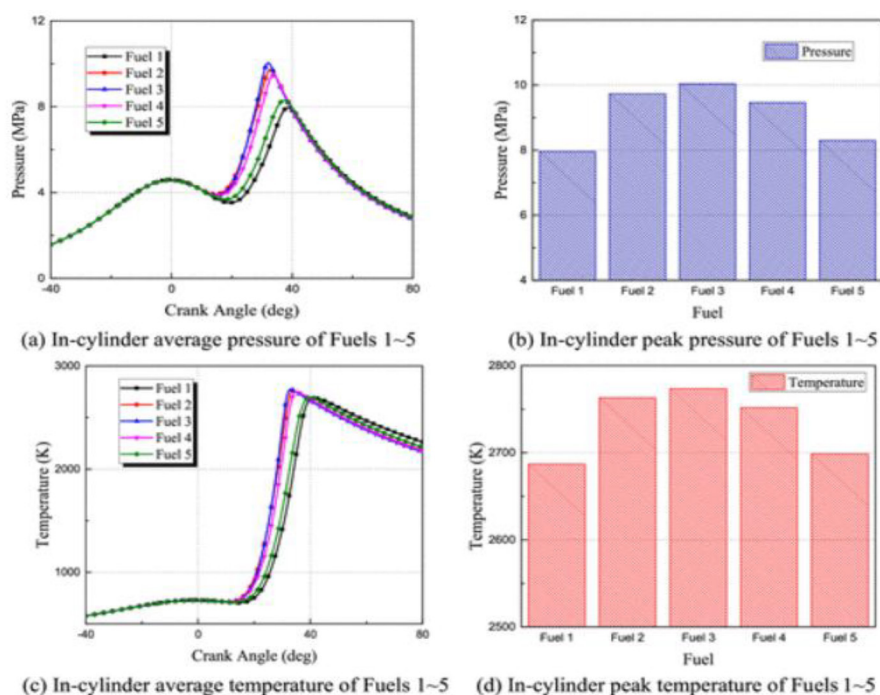


Рис. 2. Середній тиск і температура в циліндрі з паливом 1–5 [16]

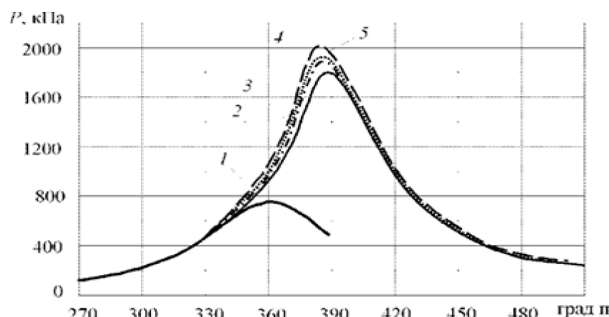


Рис. 3. Індикаторні діаграми для роботи двигуна 2Ч 7,2/5 при різних добавках синтез-газу до бензина: 1 – лінія стиснення без згоряння; 2 – бензин; 3, 4, 5 – добавка синтез-газу 28, 32, 64 % відповідно [17]

колінчастого вала. Така зміна свідчить про інтенсифікацію процесу згоряння, але одночасно вказує на підвищення жорсткості роботи двигуна. У цьому контексті важливо не лише констатувати збільшення тиску, а й оцінювати, наскільки воно є допустимим з точки зору надійності й плавності роботи двигуна.

Більш наочно вплив синтез-газу на характер згоряння проявляється через зміну швидкості наростання тиску $dp/d\phi$ яку наведено на рис. 4. Саме цей параметр найбільш чутливо відображає жорсткість робочого процесу та дозволяє оцінити, наскільки добавка синтез-газу змінює динаміку тепловиділення в циліндрі.

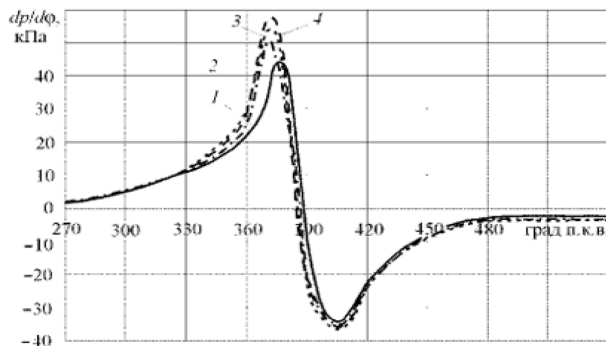


Рис. 4. Зміна швидкості наростання тиску в залежності від різних добавок синтез-газу: 1 – бензин; 2, 3, 4 – добавка синтез-газу 28, 32, 64 % відповідно [17]

Також показано, що зі збільшенням частки синтез-газу швидкість наростання тиску зростає, а це означає більш жорсткий перебіг згоряння. Разом із тим автори встановили і позитивний ефект таких добавок: середній індикаторний тиск підвищувався на 5,16 %, а питомі індикаторні витрати палива зменшувалися на 3...17 %. Крім того, скорочувалася загальна тривалість згоряння суміші. Зокрема, тривалість першої фази становила близько 12° п.к.в., другої – 28° п.к.в., а третьої – 8° п.к.в. Це дає підстави вважати, що домішування синтез-газу до бензину може позитивно впливати на індикаторні показники двигуна, однак

такий ефект супроводжується підвищенням вимог до оптимізації параметрів робочого процесу.

У статті М. Р. Ткач, Б. Г. Тимошевський, О. С. Митрофанов, А. Ю. Проскурін, А. С. Познанський [18] розглянуто особливості математичного моделювання процесу згоряння синтез-газу в поршневих ДВЗ та показано, що для коректного опису робочого процесу при роботі на синтез-газі потрібно враховувати специфіку складу палива і режим сумішотворення. Автори відзначають, що процес згоряння синтез-газу (суміш H_2 , CO , CO_2 , CH_4) та вплив коефіцієнта надлишку повітря α на характеристики тепловиділення в двигунах з іскровим запалюванням розкриті недостатньо, а наявні дані можуть використовуватися лише для первинної оцінки при моделюванні циклу ДВЗ. Саме тому метою роботи визначено аналіз динаміки тепловиділення при використанні водневмісного синтез-газу та розробку адекватної математичної моделі, яка враховує особливості цього процесу.

Ключовою відправною точкою є твердження, що для двигунів з іскровим запалюванням, які працюють на синтез-газі, динаміку тепловиділення визначають два основні фактори: коефіцієнт надлишку повітря α та склад газу, передусім вміст водню. Відповідно, при розробці математичної моделі автори наголошують на необхідності обов'язкового врахування впливу цих факторів.

У статті М. Р. Ткач, Б. Г. Тимошевський, О. С. Митрофанов, А. С. Познанський, А. Ю. Проскурін [19] стверджують, що під час використання альтернативних палив у двигунах внутрішнього згоряння насамперед слід враховувати їхні фізико-хімічні характеристики, адже вони істотно змінюють організацію робочого процесу та помітно впливають як на ефективність, так і на екологічні показники двигуна й енергетичної установки загалом. Було розглянуто можливість покращення паливної економічності та показників робочого процесу іскрового поршневого двигуна 4Ч 10,16/9,1 (Volvo Penta) малотоннажного судна шляхом введення до базового палива (етанолу) невеликої частки синтез-газу. Автори виходять із того, що при переході на альтернативні палива визначальне значення мають їхні фізико-хімічні властивості, оскільки саме вони змінюють характер робочого процесу, паливну економічність та екологічні показники двигуна. Як об'єкт дослідження обрано іскровий двигун 4Ч 10,16/9,1 (Volvo Penta).

Вказано, що добавка синтез-газу до етанолу в межах 1–10 % призводить до неоднозначної, але загалом позитивної зміни індикаторних показників двигуна. Зі зростанням частки синтез-газу спостерігається зниження індикаторної потужності з 82,6 до 73,8 кВт, тобто на 10,6 %, однак одночасно зменшується питома індикаторна витрата палива на 11,7 %. Така тенденція свідчить, що введення синтез-газу не забезпечує приросту потужності, проте може

покращувати економічність циклу, що є важливим для енергетичних установок, орієнтованих на зниження паливних витрат.

Для узагальнення результатів розглянутих досліджень і виявлення спільних закономірностей використання синтез-газу в двигунах внутрішнього згоряння доцільно подати їх у систематизованому вигляді. У табл. 2 наведено порівняння умов досліджень, основних позитивних ефектів, обмежень та практичних висновків щодо використання синтез-газу в бензинових, двопаливних та судових двигунах.

На основі систематизації та узагальнення літературних даних складено табл. 2, яка показує, що вплив синтез-газу на основні показники ДВЗ має неоднозначний, але загалом перспективний характер. У більшості розглянутих випадків його використання сприяє інтенсифікації згоряння та покращенню паливної економічності, однак ці переваги часто супроводжуються зростанням жорсткості робочого процесу або зниженням потужності за надмірної частки синтез-газу. Крім того, екологічні показники, зокрема викиди NO_x , CO та UHC , суттєво залежать від компонентного складу газу, коефіцієнта надлишку повітря та температурних умов згоряння. Це свідчить про те, що найбільш доцільним є використання синтез-газу не як повної заміни традиційного палива, а як компонента змішаних або двопаливних схем із раціональним доббором його частки та налаштуванням параметрів робочого процесу.

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Проведений аналіз показує, що використання синтез-газу в двигунах внутрішнього згоряння є перспективним, але має неоднозначний характер. З одного боку, синтез-газ дає змогу покращувати паливну

економічність, інтенсифікувати процес згоряння та знижувати окремі шкідливі викиди. З іншого боку, його застосування ускладнюється низькою теплотою згоряння, мінливістю складу та підвищеними вимогами до організації робочого процесу.

Узагальнення розглянутих досліджень свідчить, що найбільш доцільним є використання синтез-газу не як повної заміни традиційного палива, а у змішаних і двопаливних схемах. Для бензинових двигунів додавання синтез-газу може підвищувати інтенсивність згоряння та покращувати окремі показники економічності, однак за надмірної його частки можливе зростання жорсткості процесу та погіршення потужнісних характеристик. Для судових двигунів невеликі добавки синтез-газу до етанолу є доцільними насамперед з точки зору підвищення індикаторного ККД та зниження питомих витрат палива, хоча при цьому може спостерігатися зменшення індикаторної потужності.

Важливим результатом є також підтвердження того, що ефективність використання синтез-газу істотно залежить від його компонентного складу. Збільшення частки водню сприяє покращенню займання і швидкості згоряння, тоді як підвищення вмісту інертних компонентів знижує температуру процесу, але може погіршувати повноту згоряння. Це підтверджує необхідність урахування реального складу синтез-газу при оцінці його придатності як моторного палива.

Окремої уваги заслуговують результати, пов'язані з математичним моделюванням процесу згоряння синтез-газу. У роботі показано, що традиційні підходи з постійними параметрами моделі не забезпечують достатньої точності для опису робочого процесу на синтез-газі. Урахування змінності показника характеру згоряння, а також впливу коефіцієнта надлишку повітря і вмісту водню дозволяє суттєво підвищити

Таблиця 2. Вплив добавки синтез-газу (1...64 %) до основного палива на параметри роботи двигуна з примусовим запаленням

№ з.п.	Параметр	Загальна тенденція	Значення	Тип двигуна	Примітка
1	Максимальний тиск згоряння	Підвищення	до 27,5 %	Бензиновий двигун з безпосереднім упорскуванням; бензин + синтез-газ; 2000 об/хв; частка синтез-газу	До певної оптимальної частки синтез-газу
2	Максимальна температура згоряння	Підвищення	до 2,97 %		Залежить від складу газу і температури
3	Індикаторний тиск	Підвищення	до 5,16 %		Може знижуватися при надлишковій частці синтез-газу
4	Індикаторна витрата палива	Зниження	3...17 %	Двигун 2Ч 7,2/5; бензин + синтез-газ; добавка 28–64 %	Покращується особливо в змішаних режимах
5	Індикаторний ККД	Підвищення	до 10,5 %		Особливо ефективний при невеликих добавках синтез-газу
6	Екологічні показники	Зниження	NO_x до 27,4 %, UHC до 7,6 %, CO до 65 %	Двигун 4Ч 10,16/9,1 (Volvo Penta); етанол + синтез-газ; добавка 1–10 % Бензиновий двигун з безпосереднім упорскуванням; бензин + синтез-газ; 2000 об/хв; частка синтез-газу 0–20 %	NO_x часто зменшуються; CO/UHC змінюються неоднозначно

точність розрахунку індикаторного тиску. Це підтверджує, що математичне та CFD-моделювання є не лише допоміжним засобом аналізу, а одним із ключових інструментів оптимізації складу паливної суміші та параметрів роботи двигуна.

Результати досліджень підтверджують, що найбільш перспективним напрямом використання синтез-газу в ДВЗ є оптимізовані змішані та двопаливні схеми, а подальше підвищення ефективності пов'язане з точним добором складу паливної суміші, параметрів запалювання та застосуванням математичного моделювання робочого процесу.

ВИСНОВКИ

1. Проведений аналіз наукових джерел дав змогу узагальнити сучасні підходи до використання синтез-газу в двигунах внутрішнього згоряння та встановити, що цей напрям є перспективним у контексті декарбонізації енергетики, зниження екологічного навантаження та часткового заміщення традиційних палив.

2. На основі аналізу досліджень встановлено, що ефективність застосування синтез-газу в ДВЗ визначається його компонентним складом, способом подачі, параметрами займання та режимом роботи двигуна. Найбільший вплив на перебіг робочого процесу мають вміст H_2 , CO , CO_2 та N_2 , оскільки саме ці компоненти визначають інтенсивність

згоряння, паливну економічність та екологічні показники двигуна.

Визначено, що для бензинових двигунів додавання синтез-газу може сприяти інтенсифікації згоряння, підвищенню паливної економічності та зниженню окремих шкідливих викидів, однак за надмірної частки газової добавки можливі погіршення потужнісних показників і зростання жорсткості процесу.

Порівняно з іншими підходами до підвищення ефективності та екологічності ДВЗ, використання синтез-газу є найбільш доцільним не як повна заміна традиційного палива, а як компонент змішаних і двопаливних схем, що дає змогу поєднати переваги альтернативного палива зі збереженням прийнятних експлуатаційних характеристик двигуна.

Визначено, що для суднових двигунів використання невеликих добавок синтез-газу є доцільним насамперед для підвищення паливної економічності та індикаторного ККД, однак таке рішення може супроводжуватися зниженням індикаторної потужності.

Результати проведеного дослідження підтверджують доцільність подальшого розвитку змішаних і двопаливних схем із використанням синтез-газу. Подальші дослідження доцільно зосередити на вивченні впливу реального складу синтез-газу, параметрів запалювання, сумішоутворення та режимів роботи двигуна на його енергетичні, економічні та екологічні показники.

REFERENCES

- [1] Igini, M. Fossil fuels accounted for 82 % of global energy mix in 2023 amid record consumption: Report. *Earth.Org*. 2024. Retrieved from: <https://earth.org/fossil-fuel-accounted-for-82-of-global-energy-mix-in-2023-amid-record-consumption-report/>
- [2] IRENA. Renewable Capacity Statistics 2025. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2025. Retrieved from: <https://www.irena.org/Publications/2025/Mar/Renewable-capacity-statistics-2025>
- [3] Rinaldini, C. A., Allesina, G., Pedrazzi, S., Mattarelli, E., Savioli, T., Morselli, N., Puglia, M., & Tartarini, P. Experimental investigation on a Common Rail Diesel engine partially fuelled by syngas. *Energy Conversion and Management*, vol. 138, pp. 526–537, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.02.034>
- [4] Sharma, P., Sharma, A. K., & Ağbulut, Ü. A comprehensive review on biomass-derived producer gas as an alternative fuel: a waste biomass-to-energy perspective. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 150, 3463–3505, 2025. <https://doi.org/10.1007/s10973-025-14292-8>
- [5] Bongomin, O., Nzila, C., Mwasiagi, J. I., & Maube, O. Exploring insights in biomass and waste gasification via ensemble machine learning models and interpretability techniques. *International Journal of Energy Research*, vol. 2024, Article ID 6087208, 2024. <https://doi.org/10.1155/2024/6087208>
- [6] Costa, M., Prati, M. V., De Simio, L., Iannaccone, S., & Piazzullo, D. CFD study of a CI engine powered in the dual-fuel mode with syngas and waste vegetable oil. *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1868, no. 1, 012014, 2021. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1868/1/012014>
- [7] Jamsran, N., Park, H., Lee, J., Oh, S., Kim, C., Lee, Y., & Kang, K. Influence of syngas composition on combustion and emissions in a homogeneous charge compression ignition engine. *Fuel*, vol. 306, Article 121654, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121654>
- [8] Park, H., Lee, J., Jamsran, N., Oh, S., Kim, C., Lee, Y., & Kang, K. Comparative assessment of stoichiometric and lean combustion modes in boosted spark-ignition engine fueled with syngas. *Energy Conversion and Management*, vol. 239, 114224, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114224>
- [9] Rey, J. R. C., Longo, A., Rijo, B., Mateos-Pedrero, C., Brito, P., & Nobre, C. Modelling syngas combustion from biomass gasification and engine applications: A comprehensive review. *Energies*, vol. 18, no. 19, 5112, 2025. <https://doi.org/10.3390/en18195112>
- [10] Costa, M., La Villetta, M., Massarotti, N., Piazzullo, D., & Rocco, V. Numerical analysis of a compression ignition engine powered in the dual-fuel mode with syngas and biodiesel. *Energy*, vol. 137, pp. 969–979, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.02.160>

- [11] Karthikeyan, R., Srinivasan, S., Shanmugam, S., & Mohanraj, M. A review on the developments and performance evaluation of syngas fueled internal combustion engines. *Energies*, vol. 16, no. 21, 7384, 2023. <https://doi.org/10.3390/en16217384>
- [12] Talibi, M., Hellier, P., & Ladommatos, N. Combustion and exhaust emission characteristics, and in-cylinder gas composition, of hydrogen enriched biogas mixtures in a diesel engine. *Energy*, vol. 124, pp. 397–412, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.02.070>
- [13] Pérez Gordillo, D. S., & Mantilla González, J. M. Computational study of the effects of ignition parameters changes on a spark ignition engine fueled with syngas. *Journal of Energy Resources Technology*, vol. 144, no. 11, 112306, 2022. <https://doi.org/10.1115/1.4054190>
- [14] Kan, X., Zhou, D., Yang, W., Zhai, X., & Wang, C. H. An investigation on utilization of biogas and syngas produced from biomass waste in premixed spark ignition engine. *Applied Energy*, vol. 212, pp. 210–222, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.12.037>
- [15] Saxena, M. R., Ranjane, V., & Maurya, R. K. Crank angle based exergy analysis of syngas fuelled homogeneous charge compression ignition engine. *SAE Technical Papers*, 2022, 2022-01-1037. <https://doi.org/10.4271/2022-01-1037>
- [16] Fan, G., Zheng, Z., & Zhu, Z. Combustion and emission characteristics of gasoline engine blended combustion syngas. *ACS Omega*, vol. 7, no. 30, pp. 26375–26395, 2022. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c02218>
- [17] *Sudnovi enerhetychni systemy: materialy Vseukrainskoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii «Sudnobuduvannia ta sudnovi enerhetychni systemy» [Ship power systems: proceedings of the All-Ukrainian scientific and technical conference “Shipbuilding and ship power systems”].* (2021). Pp. 22–25. Retrieved from: https://nuos.edu.ua/wp-content/uploads/2021/12/Konf_Sudn_Energ_2.pdf [in Ukrainian].
- [18] Tkach, M. R., Tymoshevskiy, B. H., Mytrofanov, O. S., Proskurin, A. Yu., & Poznanskyi, A. S. (2025). Osoblyvosti modeliuvannia protsesu zghoriannia syntez-hazu v porshnevnykh dvyhunakh [Features of modeling the combustion process of synthesis gas in piston engines]. *Dvyhuny vnutrishnoho zghoriannia*, No. 2, pp. 37–42. <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2025.2.05> [in Ukrainian]
- [19] Tkach, M. R., Tymoshevskiy, B. H., Mytrofanov, O. S., Poznanskyi, A. S., & Proskurin, A. Yu. (2018). Pidvyshchennia efektyvnosti DVZ malotonnazhnykh suden iz zastosuvanniam dobavok syntez-hazu [Improving the efficiency of internal combustion engines of small vessels using synthesis gas additives]. *Dvyhuny vnutrishnoho zghoriannia*, No. 2, pp. 3–6. <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2018.2.01> [in Ukrainian].

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Igini, M. Fossil fuels accounted for 82 % of global energy mix in 2023 amid record consumption: Report. *Earth.Org*. 2024. Retrieved from: <https://earth.org/fossil-fuel-accounted-for-82-of-global-energy-mix-in-2023-amid-record-consumption-report/>
- [2] IRENA. Renewable Capacity Statistics 2025. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2025. Retrieved from: <https://www.irena.org/Publications/2025/Mar/Renewable-capacity-statistics-2025>
- [3] Rinaldini, C. A., Allesina, G., Pedrazzi, S., Mattarelli, E., Savioli, T., Morselli, N., Puglia, M., & Tartarini, P. Experimental investigation on a Common Rail Diesel engine partially fuelled by syngas. *Energy Conversion and Management*, vol. 138, pp. 526–537, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.02.034>
- [4] Sharma, P., Sharma, A. K., & Ağbulut, Ü. A comprehensive review on biomass-derived producer gas as an alternative fuel: a waste biomass-to-energy perspective. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 150, 3463–3505, 2025. <https://doi.org/10.1007/s10973-025-14292-8>
- [5] Bongomin, O., Nzila, C., Mwasiagi, J. I., & Maube, O. Exploring insights in biomass and waste gasification via ensemble machine learning models and interpretability techniques. *International Journal of Energy Research*, vol. 2024, Article ID 6087208, 2024. <https://doi.org/10.1155/2024/6087208>
- [6] Costa, M., Prati, M. V., De Simio, L., Iannaccone, S., & Piazzullo, D. CFD study of a CI engine powered in the dual-fuel mode with syngas and waste vegetable oil. *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1868, no. 1, 012014, 2021. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1868/1/012014>
- [7] Jamsran, N., Park, H., Lee, J., Oh, S., Kim, C., Lee, Y., & Kang, K. Influence of syngas composition on combustion and emissions in a homogeneous charge compression ignition engine. *Fuel*, vol. 306, Article 121654, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121654>
- [8] Park, H., Lee, J., Jamsran, N., Oh, S., Kim, C., Lee, Y., & Kang, K. Comparative assessment of stoichiometric and lean combustion modes in boosted spark-ignition engine fueled with syngas. *Energy Conversion and Management*, vol. 239, 114224, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114224>
- [9] Rey, J. R. C., Longo, A., Rijo, B., Mateos-Pedrero, C., Brito, P., & Nobre, C. Modelling syngas combustion from biomass gasification and engine applications: A comprehensive review. *Energies*, vol. 18, no. 19, 5112, 2025. <https://doi.org/10.3390/en18195112>
- [10] Costa, M., La Villetta, M., Massarotti, N., Piazzullo, D., & Rocco, V. Numerical analysis of a compression ignition engine powered in the dual-fuel mode with syngas and biodiesel. *Energy*, vol. 137, pp. 969–979, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.02.160>
- [11] Karthikeyan, R., Srinivasan, S., Shanmugam, S., & Mohanraj, M. A review on the developments and performance evaluation of syngas fueled internal combustion engines. *Energies*, vol. 16, no. 21, 7384, 2023. <https://doi.org/10.3390/en16217384>

- [12] Talibi, M., Hellier, P., & Ladommatos, N. Combustion and exhaust emission characteristics, and in-cylinder gas composition, of hydrogen enriched biogas mixtures in a diesel engine. *Energy*, vol. 124, pp. 397–412, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.02.070>
- [13] Pérez Gordillo, D. S., & Mantilla González, J. M. Computational study of the effects of ignition parameters changes on a spark ignition engine fueled with syngas. *Journal of Energy Resources Technology*, vol. 144, no. 11, 112306, 2022. <https://doi.org/10.1115/1.4054190>
- [14] Kan, X., Zhou, D., Yang, W., Zhai, X., & Wang, C. H. An investigation on utilization of biogas and syngas produced from biomass waste in premixed spark ignition engine. *Applied Energy*, vol. 212, pp. 210–222, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.12.037>
- [15] Saxena, M. R., Ranjane, V., & Maurya, R. K. Crank angle based exergy analysis of syngas fuelled homogeneous charge compression ignition engine. *SAE Technical Papers*, 2022, 2022-01-1037. <https://doi.org/10.4271/2022-01-1037>
- [16] Fan, G., Zheng, Z., & Zhu, Z. Combustion and emission characteristics of gasoline engine blended combustion syngas. *ACS Omega*, vol. 7, no. 30, pp. 26375–26395, 2022. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c02218>
- [17] Суднові енергетичні системи: матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції «Суднобудування та суднові енергетичні системи». (2021). С. 22–25. Retrieved from: https://nuos.edu.ua/wp-content/uploads/2021/12/Konf_Sudn_Energ_2.pdf
- [18] Ткач, М. Р., Тимошевський, Б. Г., Митрофанов, О. С., Проскурін, А. Ю., & Познанський, А. С. (2025). Особливості моделювання процесу згоряння синтез-газу в поршневих двигунах. *Двигуни внутрішнього згоряння*, № 2, С. 37–42. <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2025.2.05>
- [19] Ткач, М. Р., Тимошевський, Б. Г., Митрофанов, О. С., Познанський, А. С., & Проскурін, А. Ю. (2018). Підвищення ефективності ДВЗ малотоннажних суден із застосуванням добавок синтез-газу. *Двигуни внутрішнього згоряння*, № 2, С. 3–6. <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2018.2.01>

© Мелех Д. М.

Дата першого надходження статті до видання: 19.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 15.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)