

УДК 621.438

DOI [https://doi.org/10.15589/znpp2026.1\(503\).1.13](https://doi.org/10.15589/znpp2026.1(503).1.13)

INVESTIGATION OF HEAT RECOVERY PROCESSES FROM INTERNAL COMBUSTION ENGINE EXHAUST GASES USING THERMOCHEMICAL FUEL CONVERSION

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ УТИЛІЗАЦІЇ ТЕПЛОТИ ВІДПРАЦЬОВАНИХ ГАЗІВ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕРМОХІМІЧНОЇ КОНВЕРСІЇ ПАЛИВА

Oleksandr S. Mytrofanov
oleksandr.mytrofanov@nuos.edu.ua
ORCID: 0000-0003-3460-5369

Oleksandr V. Nester
anester95@gmail.com
ORCID: 0009-0003-3447-2858

О. С. Митрофанов,
докт. техн. наук, професор

О. В. Нестер,
аспірант

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

Abstract. Purpose. To study the processes of waste heat recovery from exhaust gases of a spark-ignition internal combustion engine through the thermochemical conversion of ethanol into hydrogen-containing gas and to assess the impact of the produced gas on engine performance parameters.

Methodology. Experimental studies were conducted on a 1Ch 6.8/5.4 engine equipped with a thermochemical reactor for ethanol conversion. Measurements of working fluid temperatures in the reactor, exhaust gas thermal power, conversion degree, and indicator diagram recording were performed using specialized sensors (Kistler 7613C), a gas meter, and a microprocessor-based data acquisition system. The data processing included the determination of engine indicator and effective performance parameters.

Results. The temperature operating conditions of the reactor and the dependencies of ethanol conversion degree on reaction temperature (complete conversion achieved at 685 °C) and reagent mass flow rate were established. The composition of the hydrogen-containing gas (hydrogen 43%, carbon monoxide 34%, methane 23%) and the energy consumption for its production (4.0 MJ/kg) were determined. It is shown that using hydrogen-containing gas additives to ethanol reduces the specific effective fuel consumption by 2.5–12.4% depending on the load. The fraction of exhaust gas heat utilized in the reactor amounts to 50–65%, allowing 4–6% of energy to be returned to the cycle.

Scientific novelty. For the first time, experimental data on the comprehensive influence of hydrogen-containing gas additives, obtained by thermochemical conversion of ethanol, on the indicator performance parameters of a spark-ignition engine operating cycle, particularly on indicator work, pressure, and efficiency, have been obtained. A non-monotonic nature of the indicator work change with an increase in the additive fraction was revealed.

Practical significance. The obtained results can be used to improve waste heat recovery systems for internal combustion engines, enhance their fuel efficiency, and reduce ethanol consumption. The proposed approach allows for partially solving the problem of low ethanol evaporation and improving the combustion process at partial loads.

Key words: thermochemical fuel conversion; ethanol; hydrogen-containing gas; exhaust gases; internal combustion engine; indicator parameters; heat recovery.

Анотація. Мета – дослідження процесів термохімічної утилізації теплоти відпрацьованих газів двигуна внутрішнього згоряння з іскровим запалюванням шляхом конверсії етанолу у водневмісний газ та оцінка впливу отриманого газу на параметри роботи двигуна.

Методика. Експериментальні дослідження проведено на двигуні типу 1Ч 6,8/5,4, обладнаному термохімічним реактором для конверсії етанолу. Вимірювання температури робочих тіл у реакторі, теплової потужності відпрацьованих газів, ступеня конверсії, а також реєстрація індикаторних діаграм здійснювалися за допомогою спеціалізованих датчиків (Kistler 7613C), газового лічильника та мікропроцесорної системи обробки даних. Обробка результатів включала визначення індикаторних та ефективних показників двигуна.

Результати. Встановлено температурні режими роботи реактора та залежності ступеня конверсії етанолу від температури реакції (повна конверсія досягається за 685 °C) та масової витрати реагенту. Визначено склад вод-

невмісного газу (водень 43%, оксид вуглецю 34%, метан 23%) та енерговитрати на його отримання (4,0 МДж/кг). Показано, що використання добавок водневмісного газу до етанолу знижує питому ефективну витрату палива на 2,5–12,4% залежно від навантаження. Частка теплоти відпрацьованих газів, використана в реакторі, становить 50–65%, що дозволяє повернути в цикл 4–6% енергії.

Наукова новизна. Вперше отримано експериментальні дані щодо комплексного впливу добавок водневмісного газу, отриманого термохімічною конверсією етанолу, на індикаторні показники робочого циклу двигуна з іскровим запалюванням, зокрема на індикаторну роботу, тиск та коефіцієнт корисної дії. Виявлено немонотонний характер зміни індикаторної роботи при збільшенні частки добавки.

Практична значимість. Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення систем утилізації теплоти відпрацьованих газів двигунів внутрішнього згоряння, підвищення їх паливної ефективності та зниження витрати етанолу. Запропонований підхід дозволяє частково вирішити проблему низької випаровуваності етанолу та покращити процес згоряння на часткових навантаженнях.

Ключові слова: термохімічна конверсія палива; етанол; водневмісний газ; відпрацьовані гази; двигун внутрішнього згоряння; індикаторні показники; утилізація теплоти.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Сучасний транспортний сектор, який споживає близько 80% світових нафтопродуктів, стикається з комплексною проблемою, що поєднує вичерпання вуглеводневих ресурсів, посилення екологічних вимог щодо викидів парникових газів та необхідність забезпечення енергетичної незалежності. У цих умовах критично важливим завданням є підвищення ефективності двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ), які залишаються основою енергетичних установок транспорту. Одним із найбільш перспективних напрямів вирішення цього завдання є глибока утилізація теплоти відпрацьованих газів, що несуть значну частку енергії палива, яка втрачається безповоротно.

Традиційні системи рекуперації низькопотенційної теплоти, такі як цикли Ренкіна або Стирлінга, характеризуються складністю конструкції, низькою питомою потужністю та недостатньою ефективністю на змінних режимах роботи двигуна, що обмежує їх практичне впровадження. Альтернативним підходом є термохімічна утилізація, за якої теплота відпрацьованих газів використовується для попередньої конверсії палива у водневмісний газ безпосередньо перед подачею в циліндри. Це дозволяє не лише повернути частину скиданої теплоти в робочий цикл, але й покращити характеристики згоряння завдяки підвищеній швидкості поширення полум'я та розширенню меж займання.

Етанол, як відновлюване та екологічно прийнятне паливо, має значний потенціал для застосування в ДВЗ. Однак його використання ускладнюється низькою випаровуваністю при холодному пуску, меншою теплою згоряння порівняно з бензином, гігроскопічністю та корозійною активністю. Перетворення етанолу на водневмісний газ шляхом термохімічної конверсії дозволяє усунути більшість зазначених недоліків, проте використання такого газу як самостійного палива призводить до зниження потужності через нижчу теплоту згоряння. Раціональним компромісом є застосування водневмісного газу як добавки до основного палива, особливо на часткових навантаженнях.

Аналіз літературних джерел свідчить, що більшість досліджень зосереджена або на екологічних аспектах застосування водневмісного газу, або на особливостях його отримання. Вплив добавок такого газу на індикаторні показники робочого циклу, зокрема на індикаторну роботу, тиск та коефіцієнт корисної дії, залишається недостатньо вивченим. Відсутні системні експериментальні дані щодо взаємозв'язку параметрів роботи термохімічного реактора, складу отриманого газу та показників двигуна на різних режимах навантаження. Це унеможливило створення ефективних енергетичних установок з термохімічною утилізацією теплоти відпрацьованих газів.

Таким чином, актуальною науково-прикладною задачею є дослідження процесів термохімічної конверсії етанолу у водневмісний газ з використанням теплоти відпрацьованих газів двигуна внутрішнього згоряння та встановлення закономірностей впливу добавок отриманого газу на індикаторні та ефективні показники роботи двигуна.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Етанол розглядається як перспективне паливо для транспортних двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) завдяки нижчій токсичності порівняно з бензином, здатності до біологічного розкладання та відновлюваній природі. Він також сприяє покращенню екологічних показників двигуна. Однак широке впровадження етанолу стримується низькою недоліків, зумовлених відмінністю його фізико-хімічних властивостей від традиційних нафтових палив [1; 2].

По-перше, використання етанолу вимагає суттєвої модернізації конструкції двигуна. Як показано в роботі [3], застосування бензоетанольних сумішей з високим вмістом спирту потребує впровадження механізмів зміни фаз газорозподілу, передпускових підігрівачів, коригування ступеня стиску та доопрацювання випускної системи. По-друге, через високу теплоту випаровування виникає проблема холодного пуску: за температури нижче +15 °С випаровуваність етанолу стає недостатньою для формування

горючої суміші. По-третє, нижча теплота згоряння етанолу (21,3 МДж/л) є значно меншою, ніж у бензині (32 МДж/л), що для збереження теплової ефективності змушує збільшувати циклову подачу палива. Додатковими викликами є гігроскопічність етанолу та його корозійний вплив на елементи паливної системи, детально описаний у дослідженнях [4; 5].

Одним зі шляхів подолання зазначених недоліків є попереднє термохімічне перетворення рідкого етанолу на водневмісний газ. Отримана газова суміш (H_2 , CO , CH_4 та інші компоненти) має кращі згоряльні характеристики. Однак використання водневмісного газу як самостійного палива призводить до зниження потужності двигуна через його нижчу питому теплоту згоряння (25–30 МДж/кг). Раціональним компромісом є застосування водневмісного газу як добавки до основного палива (етанолу), особливо на часткових навантаженнях [6].

Аналіз сучасних досліджень свідчить про зростаючий інтерес до термохімічної рекуперації теплоти відпрацьованих газів. Так, у роботах [7; 8] детально описано процес згоряння дизельного палива з мікродобавками водневмісного газу, однак вплив таких добавок на індикаторні та ефективні показники залишився поза увагою авторів. Дослідження [9] містить експериментальні індикаторні діаграми та характеристики тепловиділення для двигуна, що працює на газі, отриманому з метанолу, проте відсутній аналіз змін потужності. У роботах [10; 11] основний акцент зроблено на екологічних показниках, тоді як параметри робочого циклу та їхній вплив на ефективність не розглядалися.

Особливий інтерес становлять результати, отримані для систем з паровою конверсією метанолу під високим тиском [12; 13]. Вони демонструють потенційне підвищення ефективності двигуна на 18–39% та суттєве зниження викидів шкідливих речовин. Розвиток цього напрямку представлено в роботі [14], де виконано термодинамічний аналіз парового реформування етанолу для дизельних двигунів з використанням теплоти відпрацьованих газів. Авторами встановлено, що енергетичний надлишок реформованого газу може сягати 19%, а частка утилізованої теплоти ВГ становить від 20% до 75% залежно від конфігурації системи.

Паралельно з термохімічними методами досліджуються й інші шляхи утилізації теплоти ВГ. Зокрема, у роботі [15] розглянуто застосування двоконтурного органічного циклу Ренкіна для утилізації теплоти відпрацьованих газів та проміжного охолоджувача турбодизеля, що працює на сумішах дизельного палива з етанолом. Отримано зниження викидів NO_x та CO до 15%, що підтверджує перспективність використання спиртових палив у комбінації з системами утилізації.

Новітні підходи до підвищення ефективності енергетичних установок з ДВЗ запропоновано

в дослідженні [16], де інтегровано твердооксидний паливний елемент у систему з термохімічною утилізацією теплоти відпрацьованих газів двигуна на біоетанолі. Визначено, що така конфігурація дозволяє підвищити загальну потужність системи на 6,5%, що відкриває нові можливості для глибокої утилізації теплоти.

Таким чином, незважаючи на значний обсяг досліджень у напрямку утилізації теплоти відпрацьованих газів та появи нових гібридних схем, на сьогодні відсутні системні експериментальні дані щодо особливостей формування робочого циклу двигунів з іскровим запалюванням, які працюють на етанолі з добавками водневмісного газу. Зокрема, недостатньо вивченими залишаються закономірності впливу складу та величини добавки на основні індикаторні показники, енергетичну ефективність установки в цілому та взаємодію двигуна з реактором конверсії палива, що й зумовлює актуальність представленого дослідження.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Проведений аналіз літературних джерел засвідчив, що, незважаючи на активні дослідження в галузі термохімічної утилізації теплоти відпрацьованих газів та застосування водневмісних добавок у двигунах внутрішнього згоряння, низка важливих питань залишається нерозв'язаною:

- відсутні системні експериментальні дані щодо впливу добавок водневмісного газу, отриманого з етанолу, на індикаторні показники робочого циклу (індикаторна робота, середній індикаторний тиск, індикаторний ККД) двигунів з іскровим запалюванням;
- не встановлено кількісних залежностей між параметрами роботи термохімічного реактора (температура, витрата етанолу, ступінь конверсії) та зміною ефективних показників двигуна на різних режимах навантаження;
- недостатньо вивчено взаємний вплив частки добавки водневмісного газу та коефіцієнта надлишку повітря на характеристики згоряння, зокрема на максимальний тиск і швидкість тепловиділення;
- відсутні обґрунтовані рекомендації щодо вибору раціональної величини добавки для різних навантажувальних режимів з урахуванням енергетичних витрат на конверсію палива;
- не визначено частку теплоти відпрацьованих газів, яку доцільно використовувати в реакторі для досягнення максимальної ефективності енергетичної установки в цілому.

Таким чином, розв'язання зазначених питань становить наукове завдання, на вирішення якого спрямоване представлене дослідження.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою роботи є дослідження процесів термохімічної утилізації теплоти відпрацьованих газів

двигуна з іскровим запалюванням шляхом конверсії етанолу у водневмісний газ та оцінка впливу отриманого водневмісного газу на параметри роботи двигуна й особливості процесу згоряння. Встановлення робочих характеристик реактора конверсії палива як елемента системи утилізації, визначення його енергетичної ефективності та аналіз зміни індикаторних і ефективних показників двигуна при використанні добавок водневмісного газу до етанолу.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ

ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єктом дослідження є процеси термохімічної утилізації теплоти відпрацьованих газів двигуна внутрішнього згоряння з іскровим запалюванням.

Предметом дослідження є закономірності впливу добавок водневмісного газу, отриманого шляхом конверсії етанолу, на індикаторні та ефективні показники роботи двигуна, а також характеристики роботи термохімічного реактора.

Методи дослідження. Робота виконана із застосуванням експериментального методу, який дозволяє отримати достовірні дані про реальні процеси в двигуні та реакторі. Експериментальні дослідження проведено на спеціалізованому стенді, створеному на базі одноциліндрового чотиритактного двигуна з іскровим запалюванням типу 1Ч 6,8/5,4, що працює у складі електрогенераторної установки. Двигун обладнано термохімічним реактором конверсії палива, який використовує теплоту відпрацьованих газів для перетворення рідкого етанолу у водневмісний газ.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Реальні процеси робочого циклу ДВЗ, а особливо процес згоряння, залежать від багатьох факторів, зокрема хімічної кінетики вигорання палива, термодинаміки та газодинаміки, процесів тепло- і масообміну тощо. Особливо складним є процес згоряння водневмісного газу, що насамперед зумовлено наявністю в його складі кількох компонентів, кожен з яких по-різному впливає на перебіг процесу згоряння.

За допомогою математичного моделювання на основі класичних диференціальних рівнянь не завжди можливо адекватно описати реальні процеси, що відбуваються в робочому циліндрі, елементах газовипускного тракту та енергетичній установці загалом. У зв'язку з цим математичні моделі потребують використання певних припущень, емпіричних залежностей і констант, отриманих експериментальним шляхом. Експериментальний метод дає змогу підтвердити коректність прийнятих допущень, доповнити математичну модель емпіричними коефіцієнтами та залежностями для кожного окремого випадку, а також оцінити її адекватність і визначити межі застосування.

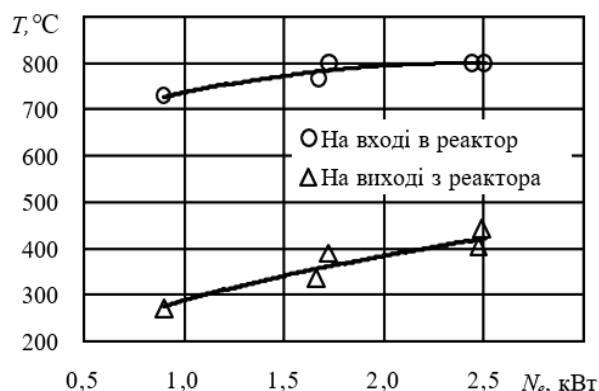
Для проведення експериментальних досліджень робочого циклу ДВЗ, що працює на етанолі з добавками водневмісного газу, було використано експериментальний стенд на базі двигуна із зовнішнім сумішоутворенням типу 1Ч 6,8/5,4 (рис. 1). Це чотиритактний бензиновий двигун, який працює в складі електрогенераторної установки. Двигун 1Ч 6,8/5,4 має можливість роботи як на чистому етанолі, так і на суміші етанолу з водневмісним газом, отриманим у результаті термохімічної утилізації теплоти відпрацьованих газів.

Залежно від навантаження двигуна та кількості утилізованої теплоти відпрацьованих газів, величина добавки водневмісного газу до етанолу може змінюватися в заданих межах, що дає змогу дослідити її вплив на індикаторні, теплові та ефективні показники роботи двигуна.



Рис. 1. Загальний вигляд експериментального стенда на базі двигуна з іскровим запалюванням 1Ч 6,8/5,4

На рис. 2 наведено результати експериментальних вимірювань зміни температури відпрацьованих газів, рідкого етанолу та водневмісного газу на вході та виході з реактора залежно від навантаження двигуна.



а



б

Рис. 2. Температура робочих тіл в реакторі:
а – відпрацьовані гази; б – етанол

Після обробки результатів прямих вимірювань отримано залежність ступеня конверсії від температури реакції (температури водневмісного газу на виході з реактора) (рис. 3), а також залежність ступеня конверсії від масової витрати етанолу через реактор (рис. 4).

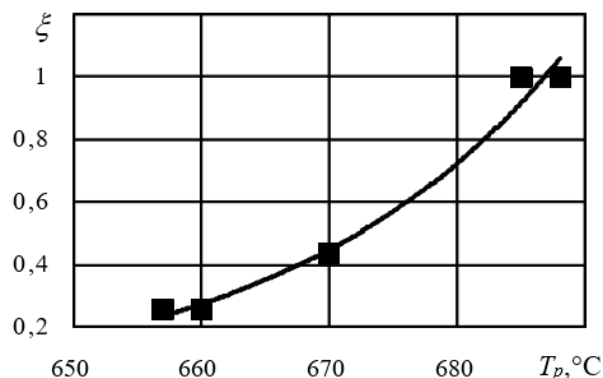


Рис. 3. Залежність ступеня конверсії етанолу від температури реакції

Повної конверсії етанолу було досягнуто за температури 685 °C і вище. За умов повної конверсії для отримання 1 кг водневмісного газу витрачається 1 кг етанолу, тобто весь рідкий етанол, що надходив у реактор, повністю перетворювався на газоподібне паливо.

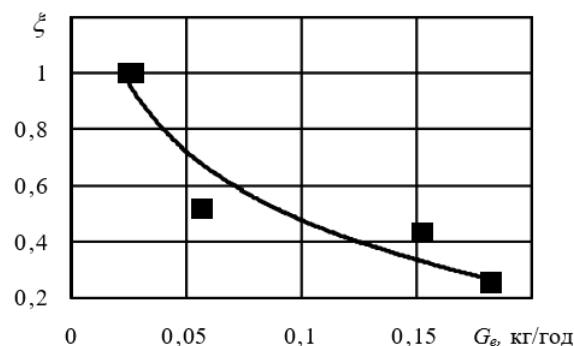


Рис. 4. Залежність ступеня конверсії від масової витрати етанолу через реактор

Для ефективної реалізації термохімічної утилізації (ТХУ) теплоти відпрацьованих газів у поршневих двигунах внутрішнього згорання необхідно, щоб температурно-енергетичний потенціал відпрацьованих газів був достатнім для одержання водневмісного газу з етанолу у необхідній кількості та складу. Кількість енергії, необхідної для отримання водневмісного газу, визначається як:

$$Q_{с.г}^{необ} = Q_{наг} + Q_{вип} + Q_{пер} + Q_{х.р} + Q_{тв}, \quad (1)$$

де $Q_{наг}$ – кількість енергії, що витрачається на нагрівання етанолу до температури кипіння; $Q_{вип}$ – кількість енергії, що витрачається на випаровування етанолу; $Q_{пер}$ – кількість енергії, що витрачається на перегрів газоподібного етанолу до температури конверсії; $Q_{х.р}$ – кількість енергії, що витрачається на подолання ендотермічного ефекту реакції хімічного перетворення етанолу в водневмісний газ; $Q_{тв}$ – кількість енергії, що враховує неминучі теплові втрати в навколишнє середовище через реактор.

Кількість енергії, що витрачається на нагрівання етанолу до температури кипіння:

$$Q_{наг} = G \times C_p' \times (T_1' - T_0), \quad (2)$$

де G – масова витрата етанолу через реактор для отримання необхідної кількості водневмісного газу у відповідному режимі роботи двигуна; C_p' – середня ізобарна теплоємність етанолу в інтервалі температур T_0 і T_1' ; T_1' – температура кипіння етанолу (78 °C); T_0 – температура рідкого компонента на вході в реактор.

Кількість енергії, яка витрачається на випаровування етанолу:

$$Q_{вг} = G \times r, \quad (3)$$

де r – питома теплота випаровування етанолу (958 кДж/кг). Кількість енергії, яка витрачається на перегрів газоподібного етанолу до температури конверсії:

$$Q_{\text{пер}} = G \times C_p'' \times (T_2 - T_1''), \quad (4)$$

де C_p'' – середня ізобарна теплоємність етанолу в інтервалі температур T_2 і T_1'' ; T_2 – кінцева температура конверсії (температура водневмісного газу на виході з реактора); T_1'' – температура газоподібного етанолу, яка відповідає T_1' .

Кількість енергії, яка витрачається на подолання ендотермічного ефекту реакції хімічного перетворення етанолу в водневмісний газ:

$$Q_{\text{х.р}} = G \times q_{\text{х.р}}, \quad (5)$$

де $q_{\text{х.р}}$ – питома теплота хімічної реакції (визначається експериментально і залежить від ступеня конверсії, способу конверсії, а також термодинамічних і термохімічних властивостей етанолу).

Кількість енергії, яка враховує неминучі теплові втрати в навколишнє середовище $Q_{\text{те}}$ через реактор залежить від конструкції, матеріалу, а також режиму роботи реактора. Теплота згоряння, яка відводиться від двигуна визначається:

$$Q_{\text{вс}} = G_{\text{вс}} \times C_p'' \times (T_{\text{вих}} - T_{\text{н}}), \quad (6)$$

де $G_{\text{вс}}$ – масова витрата відпрацьованих газів; C_p'' – середня ізобарна теплоємність відпрацьованих газів в інтервалі температур $T_{\text{н}}$ і $T_{\text{вих}}$; $T_{\text{н}}$ – температура навколишнього середовища; $T_{\text{вих}}$ – температура відхідних газів на виході з двигуна (на вході в реактор).

На рис. 5 представлені результати експериментальних вимірювань теплової потужності відпрацьованих газів на виході з двигуна і потужності, яка була використана в реакторі при різному навантаженні двигуна.



Рис. 5. Теплова потужність відпрацьованих газів

На рис. 6 представлені результати експериментальних вимірювань кількості енергії, яка витрачається в реакторі ТХУ для отримання водневмісного газу.

Так, енергія ВГ витрачається на нагрів етанолу до температури кипіння, випаровування, перегрів до температури конверсії та на подолання ендотермічного ефекту реакції хімічного перетворення етанолу в водневмісний газ.

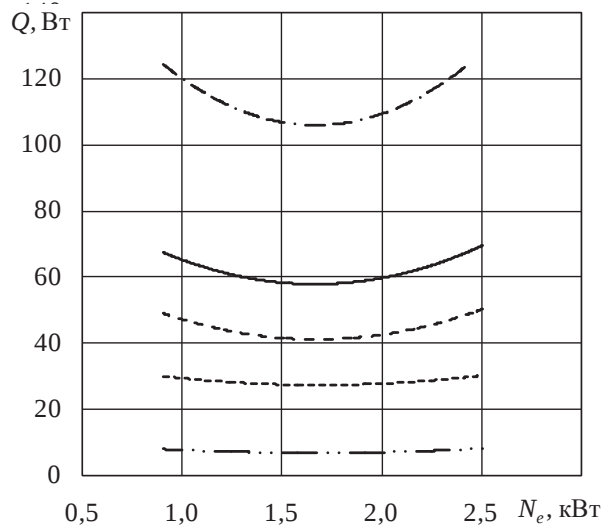


Рис. 6. Енергія, яка витрачається для отримання водневмісного газу: — · — · — нагрів етанолу до температури кипіння; — — — випаровування етанолу; — — — — — перегрів газоподібного етанолу до температури конверсії; — — — — — подолання ендотермічного ефекту реакції хімічного перетворення етанолу в водневмісний газ; — · — · — кількість енергії, яка необхідна для отримання водневмісного газу

На рис. 7 наведено оброблену розгорнуту індикаторні діаграми для різних режимів роботи двигуна, кут випередження запалювання $\Theta = 20^\circ$ п.к.в., коефіцієнт надлишку повітря $\alpha = 0,98 \dots 1,04$, а частота обертання колінчастого вала двигуна $n = 3000$ об/хв.

На рис. 8 наведено оброблену розгорнуту індикаторна діаграма різних режимів роботи двигуна, кут випередження запалювання $\Theta = 20^\circ$ п.к.в., коефіцієнт надлишку повітря $\alpha = 1,05 \dots 1,18$, а частота обертання колінчастого вала двигуна $n = 3000$ об/хв.

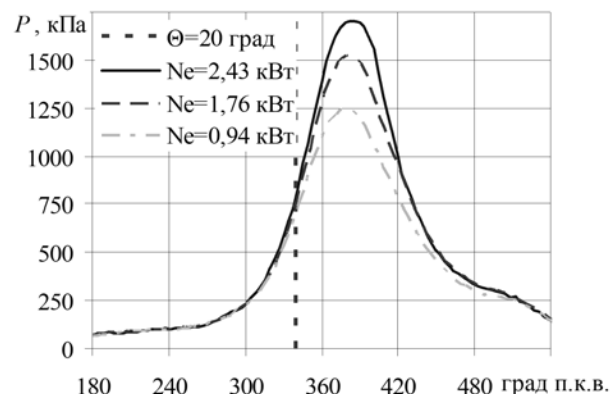


Рис. 7. Розгорнута індикаторна діаграма при роботі на етанолі

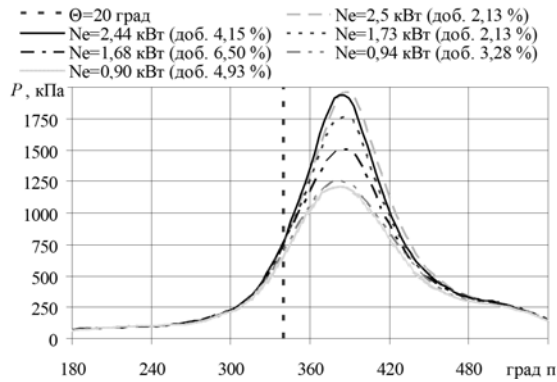


Рис. 8. Розгорнута індикаторна діаграма при роботі двигуна на етанолі з добавками водневмісного газу 2,1...6,5% за масою

Показники роботи двигуна поділяються на індикаторні (внутрішні) та ефективні (зовнішні). Індикаторні показники характеризують досконалість робочого циклу та враховують лише теплові втрати безпосередньо в циліндрі. Ефективні показники, окрім теплових, враховують також механічні втрати, що виникають під час передавання енергії розширення газів через поршень і кривошипно-шатунний механізм на колінчастий вал двигуна. Обробка індикаторних діаграм, наведених на рис. 8, дає змогу отримати дані щодо перебігу робочого процесу ДВЗ та його основних показників.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ

Для оцінки ефективності застосування лише ТХУ ВГ двигуна 1Ч 6,8/5,4, порівнювалися питома ефективна витрата палива при роботі двигуна на етанолі та витрата етанолу при роботі з добавками водневмісного газу (рис. 9). При використанні добавок водневмісного газу, отриманого за рахунок ТХУ ВГ, питома ефективна витрата етанолу на 1Ч 6,8/5,4 знизилася до 12,4%.

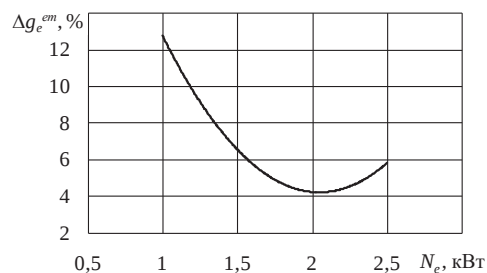


Рис. 9. Оцінка ефективності застосування ТХУ ВГ двигуна 1Ч 6,8/5,4

Згідно з результатами дослідження, при досягненні повної конверсії для отримання 1 кг водневмісного газу витрачається 4,0 МДж теплової енергії що відображено на рис. 10. Тобто, для отримання водневмісного газу в енергетичній установці на базі двигуна з іскровим запалюванням 1Ч 6,8/5,4 необхідно

використовувати 50...65% теплової енергії відпрацьованих газів. В результаті утилізується 4...6% теплоти, яка повторно бере участь в організації робочого циклу двигуна.

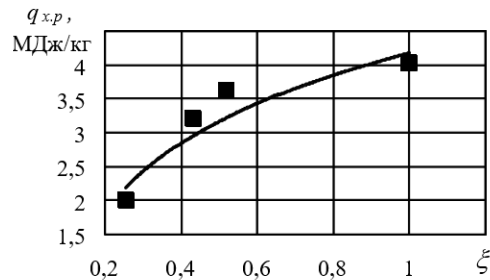


Рис. 10. Залежність питомої теплоти хімічної реакції від ступеня конверсії

Аналіз індикаторних діаграм показав, що наявність водневмісного газу в паливоповітряній суміші призводить до збільшення максимального тиску згоряння до 12% та зміщення його у бік верхньої мертвої точки (ВМТ) на 7° повороту колінчастого вала. Зазначені чинники не спричиняють жорсткішої роботи двигуна, оскільки не призводять до перевищення динамічних навантажень на деталі кривошипно-шатунного механізму. Подальше збільшення частки водневмісного газу в етанолі (понад 10%) без коригування коефіцієнта надлишку повітря у бік збільшення та кута випередження запалювання у бік зменшення може негативно впливати на роботу двигуна.

У результаті обробки індикаторних діаграм отримано залежності зміни індикаторних показників робочого циклу двигуна від частки добавки водневмісного газу (рис. 11).

На рис. 12 наведено залежності зміни питомої ефективної витрати етанолу на різних режимах роботи двигуна залежно від величини добавки водневмісного газу. Унаслідок значного вмісту водню у складі газу істотно поліпшується процес згоряння, що досить чітко проявляється у зростанні індикаторного коефіцієнта корисної дії двигуна та зниженні ефективної витрати палива. Залежно від частки добавки водневмісного газу зниження питомої ефективної витрати палива спостерігається на всіх режимах роботи двигуна і становить 2,5...12,4%.

Додатково на підвищення ККД двигуна впливає розширення меж займання паливоповітряної суміші. Збільшення ККД робочого циклу за зростання коефіцієнта надлишку повітря α пов'язане, насамперед, зі зменшенням теплоємності та тепловмісту продуктів згоряння, що, у свою чергу, призводить до зниження частки термодинамічних втрат.

Отримані експериментальні дані також дають змогу визначити низку не менш важливих показників, що характеризують окремі стадії робочого процесу

двигуна. Зокрема, за поглибленого аналізу робочого циклу за окремими процесами можна визначити коефіцієнт наповнення η_v та коефіцієнт залишкових газів γ_p , середній тиск під час насосних ходів $p_{\text{нх}}$, показники політропи стискання n_1 і розширення n_2 тощо.

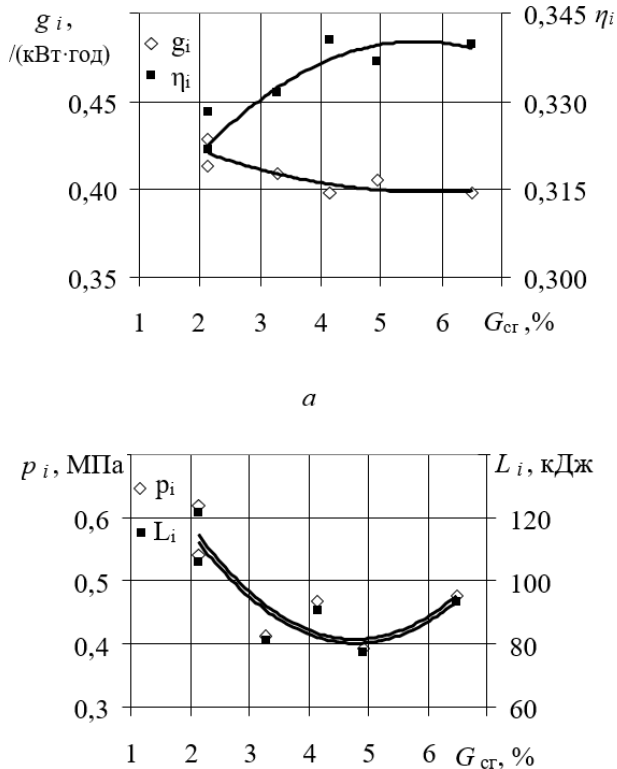


Рис. 11. Індикаторні показники роботи двигуна 1Ч 6,8/5,4 на етанолі з додаванням водневмісного газу: а – індикаторна витрата палива та індикаторний ККД; б – середній індикаторний тиск та індикаторна робота циклу

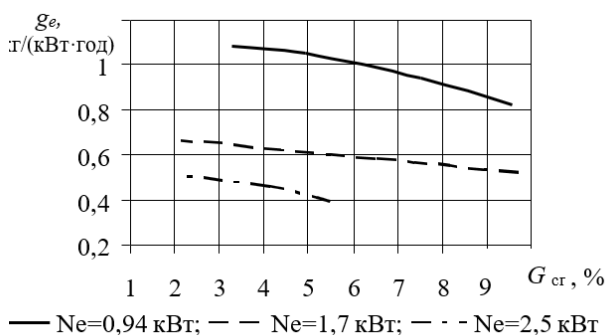


Рис. 12. Зміна питомої ефективної витрати етанолу на різних режимах роботи двигуна залежно від додавання водневмісного газу

Отримані експериментальні результати з достатньо високим ступенем точності можна вважати коректними для двигунів з іскровим запалюванням з робочим об'ємом циліндра 190...250 см^3 . Як свідчить

загальноприйнята практика, поширення отриманих результатів на двигуни з більшим робочим об'ємом циліндра є можливим, однак перспективним напрямом є проведення аналогічних досліджень і для двигунів більшої літражності.

Експериментальні дослідження виконувалися на двигуні з зовнішнім сумішоутворенням, що, у свою чергу, зумовлювало певне зниження ефективної потужності двигуна. Проте в подальшій перспективі це питання може бути відносно легко вирішене шляхом застосування внутрішнього сумішоутворення, зокрема впорскування стисненого водневмісного газу безпосередньо в циліндр двигуна за зачинених впускних і випускних клапанів.

На ефективні показники роботи двигуна також істотно впливають кут випередження запалювання, ступінь стискання, коефіцієнт надлишку повітря та фази газорозподілу. Дослідження впливу зазначених параметрів на роботу двигуна є перспективним напрямом подальших наукових робіт і може суттєво доповнити вже отримані результати.

Отримані результати підтверджують перспективність термохімічної утилізації теплоти відпрацьованих газів для підвищення паливної ефективності двигунів внутрішнього згорання та часткового вирішення проблеми низької випаровуваності етанолу. Подальші дослідження доцільно спрямувати на оптимізацію параметрів роботи реактора, вивчення впливу добавок водневмісного газу на екологічні показники двигуна та розробку систем керування подачею газу в перехідних режимах роботи.

ВИСНОВКИ

1. Застосування реактора конверсії палива дозволяє повернути назад у цикл до 4–6% теплоти від загального обсягу відпрацьованих газів. При цьому необхідна кількість теплової енергії для реалізації конверсії вихідного палива становить 50–65%.

2. Установлено, що при досягненні повної конверсії за реакцією термічного розкладу весь рідкий етанол, який надійшов у термохімічний реактор, повністю перетворюється на горючий водневмісний газ. Основними компонентами водневмісного газу є водень (43%), оксид вуглецю (34%) і метан (23%). Розрахункова питома нижча теплота згорання водневмісного газу становить 28,79 МДж/кг. При цьому для отримання 1 кг водневмісного газу витрачається 4,0 МДж теплової енергії.

3. При використанні реактора конверсії палива питома ефективна витрата етанолу, залежно від режиму роботи двигуна, знижується до 12%.

4. Встановлено, що для двигунів з іскровим запалюванням, які працюють на етанолі з добавками водневмісного газу до 10%, спостерігається зниження індикаторної роботи циклу, при цьому також зменшується питома індикаторна витрата палива. Зниження

індикаторної роботи двигуна може бути компенсоване шляхом варіювання подачі водневмісного газу на різних режимах роботи, а саме: застосуванням малих добавок водневмісного газу за великих навантажень і максимальних добавок – за малих навантажень.

5. За значних добавок водневмісного газу до етанолу відбувається збільшення максимального тиску згоряння до 12% та його зміщення у бік верхньої

мертвої точки на 7° п.к.в. При цьому коефіцієнт надлишку повітря становить 1,05–1,18. Збільшення добавки водневмісного газу до етанолу понад 10% потребує коригування коефіцієнта надлишку повітря у бік збільшення та кута випередження запалювання у бік зменшення. За умови використання добавок водневмісного газу до етанолу питома ефективна витрата палива зменшується на 2,5–12,4%.

REFERENCES

- [1] Hilbert, D. (2011). A study of the effects of running gasoline with 15% ethanol concentration in current production outboard four-stroke engines and conventional two-stroke outboard marine engines. *National Renewable Energy Laboratory*. URL: <https://www.nrel.gov/docs/fy12osti/52909.pdf>
- [2] Azimov, U., Tomita, E., & Kawahara, N. (2013). Combustion and exhaust emission characteristics of diesel micro-pilot ignited dual-fuel engine. In B. Saiful (Ed.), *Diesel engine – combustion, emissions and condition monitoring* (Chap. 2). InTech.
- [3] Shudo, T. (2008). Influence of gas composition on the combustion and efficiency of a homogeneous charge compression ignition engine system fuelled with methanol reformed gases. *International Journal of Engine Research*, 9, 399–408. DOI: <https://doi.org/10.1243/14680874JER01608>
- [4] Duraid, F. M., & Prabhakaran, P. (2011). An experimental investigation on performance and emissions of a multi-cylinder diesel engine fueled with hydrogen–diesel blends. *Sustainable Transport*, 3557–3564.
- [5] Chatterjee, A., Dutta, S., & Mandal, B. K. (2014). Combustion performance and emission characteristics of hydrogen as an internal combustion engine fuel. *Journal of Aeronautical and Automotive Engineering*, 1(1), 1–6.
- [6] Véleza, F., Segovia, J. J., Martín, M. C., Antolín, G., Chejne, F., & Quijano, A. (2012). A technical, economical and market review of organic Rankine cycles for the conversion of low-grade heat for power generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6), 4175–4189. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.022>
- [7] Wang, E., Zhang, H., Fan, B., & Wu, Y. (2012). Optimized performances comparison of organic Rankine cycles for low-grade waste heat recovery. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 26(8), 2301–2312. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12206-012-0603-4>
- [8] Poran, A., & Tartakovsky, L. (2017). Performance and emissions of a direct injection internal combustion engine devised for joint operation with a high-pressure thermochemical recuperation system. *Energy*, 124, 214–226. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.02.074>
- [9] Babu, M. K. G., & Subramanian, K. A. (2013). *Alternative transportation fuels: Utilisation in combustion engines*. CRC Press.
- [10] Shudo, T., Tsuga, K., & Nakajima, Y. (2001). Combustion characteristics of H₂–CO–CO₂ mixture in an IC engine. *SAE Technical Paper Series*, 2001-01-0502, 105–115. DOI: <https://doi.org/10.4271/2001-01-0502>
- [11] Vizcaíno, A. J., Carrero, A., Calles, J. A., & García-Moreno, L. (2008). Ethanol steam reforming on Ni/Al₂O₃ catalysts: Effect of Mg addition. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33, 3489–3492. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.12.040>
- [12] Mytrofanov, O. S. (2010). Efficiency of an internal combustion engine 4Ch 8.2/7.0 operating on synthesis gas. *Collection of Scientific Works of the National University of Shipbuilding*, 3(432), 122–126. [in Ukrainian]
- [13] Mytrofanov, O. S., Proskurin, A. Y., & Poznanskyi, A. S. (2018). Analysis of the piston engine operation on ethanol with the synthesis-gas additives. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(1), 14–19. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.136380>
- [14] Pacheco, A. F., Martins, M. E., & Pereira, F. M. (2025). Thermodynamic assessment of on-board steam reforming of light alcohols for cleaner CI engines. *Results in Engineering*, 25, 104318. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.104318
- [15] Mohammadi, A., Khoshbakhti Saray, R., & Sedighi, K. (2024). Thermodynamic and Environmental Analysis of a Dual-Pressure Organic Rankine Cycle for Waste Heat Recovery from a Turbocharged Diesel Engine Fueled with Ethanol and Methanol Blends. *AUT Journal of Mechanical Engineering*, 8(3). DOI: 10.22060/ajme.2024.22866.6105
- [16] Mytrofanov, O., Proskurin, A., & Kong, W. (2025). Improving the Efficiency of an Energy System with an Internal Combustion Engine Using a Solid Oxide Fuel Cell. *Problems of the Regional Energetics*, 66(2), 1–9. DOI: 10.52254/1857-0070.2025.2-66.01

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Hilbert, D. (2011). A study of the effects of running gasoline with 15% ethanol concentration in current production outboard four-stroke engines and conventional two-stroke outboard marine engines. *National Renewable Energy Laboratory*. URL: <https://www.nrel.gov/docs/fy12osti/52909.pdf>
- [2] Azimov, U., Tomita, E., & Kawahara, N. (2013). Combustion and exhaust emission characteristics of diesel micro-pilot ignited dual-fuel engine. In B. Saiful (Ed.), *Diesel engine – combustion, emissions and condition monitoring* (Chap. 2). InTech.

- [3] Shudo, T. (2008). Influence of gas composition on the combustion and efficiency of a homogeneous charge compression ignition engine system fuelled with methanol reformed gases. *International Journal of Engine Research*, 9, 399–408. DOI: <https://doi.org/10.1243/14680874JER01608>
- [4] Duraid, F. M., & Prabhakaran, P. (2011). An experimental investigation on performance and emissions of a multi-cylinder diesel engine fueled with hydrogen–diesel blends. *Sustainable Transport*, 3557–3564.
- [5] Chatterjee, A., Dutta, S., & Mandal, B. K. (2014). Combustion performance and emission characteristics of hydrogen as an internal combustion engine fuel. *Journal of Aeronautical and Automotive Engineering*, 1(1), 1–6.
- [6] Véleza, F., Segovia, J. J., Martín, M. C., Antolín, G., Chejne, F., & Quijano, A. (2012). A technical, economical and market review of organic Rankine cycles for the conversion of low-grade heat for power generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6), 4175–4189. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.022>
- [7] Wang, E., Zhang, H., Fan, B., & Wu, Y. (2012). Optimized performances comparison of organic Rankine cycles for low-grade waste heat recovery. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 26(8), 2301–2312. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12206-012-0603-4>
- [8] Poran, A., & Tartakovsky, L. (2017). Performance and emissions of a direct injection internal combustion engine devised for joint operation with a high-pressure thermochemical recuperation system. *Energy*, 124, 214–226. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.02.074>
- [9] Babu, M. K. G., & Subramanian, K. A. (2013). *Alternative transportation fuels: Utilisation in combustion engines*. CRC Press.
- [10] Shudo, T., Tsuga, K., & Nakajima, Y. (2001). Combustion characteristics of H₂–CO–CO₂ mixture in an IC engine. *SAE Technical Paper Series*, 2001-01-0502, 105–115. DOI: <https://doi.org/10.4271/2001-01-0502>
- [11] Vizcaino, A. J., Carrero, A., Calles, J. A., & García-Moreno, L. (2008). Ethanol steam reforming on Ni/Al₂O₃ catalysts: Effect of Mg addition. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33, 3489–3492. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.12.040>
- [12] Митрофанов, О. С. (2010). Ефективність двигуна внутрішнього згорання 4Ч 8,2/7,0, що працює на синтез-газі. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування*, 3(432), 122–126.
- [13] Mytrofanov, O. S., Proskurin, A. Y., & Poznanskyi, A. S. (2018). Analysis of the piston engine operation on ethanol with the synthesis-gas additives. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(1), 14–19. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.136380>
- [14] Pacheco, A. F., Martins, M. E., & Pereira, F. M. (2025). Thermodynamic assessment of on-board steam reforming of light alcohols for cleaner CI engines. *Results in Engineering*, 25, 104318. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.104318
- [15] Mohammadi, A., Khoshbakhti Saray, R., & Sedighi, K. (2024). Thermodynamic and Environmental Analysis of a Dual-Pressure Organic Rankine Cycle for Waste Heat Recovery from a Turbocharged Diesel Engine Fueled with Ethanol and Methanol Blends. *AUT Journal of Mechanical Engineering*, 8(3). DOI: 10.22060/ajme.2024.22866.6105
- [16] Mytrofanov, O., Proskurin, A., & Kong, W. (2025). Improving the Efficiency of an Energy System with an Internal Combustion Engine Using a Solid Oxide Fuel Cell. *Problems of the Regional Energetics*, 66(2), 1–9. DOI: 10.52254/1857-0070.2025.2-66.01

© Митрофанов О. С., Нестер О. В.

Дата першого надходження статті до видання: 19.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 16.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 22.05.2026



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