

УДК 621.438

О. С. МИТРОФАНОВ, А. Ю. ПРОСКУРИН, А. С. ПОЗНАНСЬКИЙ

*Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова***ЭФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕРМОХИМИЧЕСКОГО ПЕРЕТВОРЕНИЯ ЭТАНОЛА В ЭНЕРГЕТИЧНОЙ УСТАНОВКЕ НА БАЗЕ ДВИГУНА 1Ч 6,8/5,4**

*У статті представлені результати досліджень енергетичної установки на базі двигуна з іскровим запалюванням 1Ч 6,8/5,4, що працює на етанолі з термохімічною утилізацією теплоти відпрацьованих газів. Визначено, що при використанні добавок синтез-газу до етанолу (2,0...3,5%) в двигуні спостерігається стабільне бездетонаційне згорання з незначним збільшенням максимального тиску згорання при потужності двигуна 2,6 кВт і частоті обертання колінчастого вала 3000 хв<sup>-1</sup> та збільшення всіх ефективних показників роботи двигуна. Зниження питомої ефективної витрати палива складає 2,5...12,4%.*

**Ключові слова:** *етанол, синтез-газ, добавка, відпрацьовані гази, термохімічний реактор, утилізація*

**Вступ**

На поточний момент близько 80% загального споживання нафтових палив йде на потреби транспортних засобів самого різного призначення. Крім того, транспорт дає 40% загальних шкідливих викидів у атмосферу. Передбачуване скорочення запасів нафтових енергоносіїв, прагнення до енергобезпеки країн-імпортерів паливних ресурсів змушує приділяти пильну увагу енерго- і ресурсозбереженню і перебувати в постійному пошуку нових видів палив [1].

Використання паливного етилового спирту (етанолу) є величезним потенціалом зниження споживання світлих нафтопродуктів, захисту навколишнього середовища, підйому сільськогосподарського виробництва та створення робочих місць. Поряд з перевагами (висока антидетонаційна стійкість, широка сировинна база, висока екологічна ефективність) етанол має низку недоліків, в основному пов'язаних з відмінностями у фізико-хімічних властивостях з традиційними паливами (скорочення ресурсу двигуна і елементів енергетичної системи, пов'язаних з корозією, погіршенням умов змащення вузлів тертя, істотне обводнення палива), які стримують його широке поширення в енергетичних установках на базі поршневих ДВЗ [2].

**1. Постановка задачі**

Одним з перспективних способів застосування етанолу в поршневих ДВЗ, який може усунути більшість недоліків, є використання етанолу у вигляді синтез-газу отриманого термохімічним перетворенням за рахунок утилізації теплоти відпрацьованих

газів (ТХУ). ТХУ являє собою сукупність процесів, спрямованих на використання теплової енергії відпрацьованих газів (ВГ) для здійснення ендотермічної реакції хімічного перетворення (конверсії) вихідного палива в суміш горючих газів (CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> та ін. - синтез-газ). В результаті конверсії хімічна енергія отриманого синтез-газу перевищує енергію вихідного палива на величину утилізованої енергії ВГ, яка таким чином повторно бере участь в організації робочого циклу [3, 4].

Первинна оцінка ефективності термохімічного перетворення палива встановлюється шляхом порівняння теплоти згорання вихідного палива та отриманого з нього синтез-газу.

Залежно від типу реакції конверсії і наявності додаткових реагентів, теплота згорання 1 кг етанолу, може бути збільшена в діапазоні 6...25%, тобто при здійсненні реакції конверсії для отримання синтез-газу можливе зниження витрати вихідного етанолу при отриманні теплової енергії [5].

Дана технологія дозволить підвищити економічність установок, що працюють на етанолі, а також дозволить використовувати паливний етанол в ДВЗ, де його застосування в рідкому вигляді важко здійснити (суднові і стаціонарні ДВЗ).

Мета даної роботи полягає в дослідженні основних параметрів роботи двигуна при використанні термохімічного перетворення етанолу за рахунок утилізації теплоти відпрацьованих газів.

**2. Виклад основного матеріалу**

Для вирішення поставлених завдань в лабораторії перспективних енергетичних технологій Національного університету кораблебудування імені

адм. Макарова була створена експериментальна установка на базі чотиритактного двигуна з примусовим запалюванням 1Ч 6,8/5,4 (ТЕ 200) та термохімічним реактором утилізації теплоти ВГ. Схема експериментальної установки представлена на рис. 1. Основні параметри двигуна 1Ч 6,8/ 5,4 приведені в таблиці 1.

Таблиця 1  
Параметри двигуна 1Ч 6,8/5,4

| № п.п | Параметр                        | Од. виміру       | Знач. |
|-------|---------------------------------|------------------|-------|
| 1     | Кількість циліндрів             | шт               | 1     |
| 2     | Робочий об'єм                   | м <sup>3</sup>   | 196   |
| 3     | Діаметр циліндра                | мм               | 68    |
| 4     | Хід поршня                      | мм               | 54    |
| 5     | Ступінь стиснення               | —                | 8,5   |
| 6     | Частота обертання к.в.          | хв <sup>-1</sup> | 3000  |
| 7     | Ефективна потужність            | кВт              | 4,8   |
| 8     | Питома ефективна витрата палива | кг/(кВт×год)     | 0,412 |

Двигун 1Ч 6,8/5,4 може працювати як на чистому етанолі, так і на газоподібній суміші етанолу і синтез-газу, отриманого в результаті термохімічного перетворення за рахунок утилізації теплоти відпрацьованих газів. Залежно від навантаження двигуна і

кількості утилізованого тепла ВГ добавка синтез-газу до етанолу різна.

Для вимірювання змінного тиску в циліндрі двигуна використовувався датчик тиску Kistler 7613С (рис. 1, поз. 10). Для того щоб отримати достовірну індикаторну діаграму, чутливий елемент датчика Kistler 7613С був максимально наближений до камери згоряння, при цьому ступінь стиснення залишилися практично без зміни.

В якості утилізуючого пристрою використовується термохімічний реактор ідеального витіснення (рис. 2), що представляє собою теплообмінник типу «труба в трубі». Етанол перебуває всередині мідної трубки (загальна довжина - 4,5 м, внутрішній діаметр - 4 мм, зовнішній діаметр - 6 мм), яка омивається через спеціальні канали відпрацьованими газами двигуна.

У термохімічній реакторі синтез-газ отримується шляхом реакції розкладання етанолу. Склад синтез-газу визначався хімічним аналізом за допомогою хроматографа NeoCHROM Class B, який проходив попереднє тарирування за допомогою зразкових сумішей по ТУ-6-16-2956-87. Основними компонентами синтез-газу (об. %) є Н<sub>2</sub> (43%), СО (34%) і СН<sub>4</sub> (23%). Розрахункова питома теплота згоряння синтез-газу склала 28,79 МДж/кг, а густина - 0,63 кг/м<sup>3</sup>.

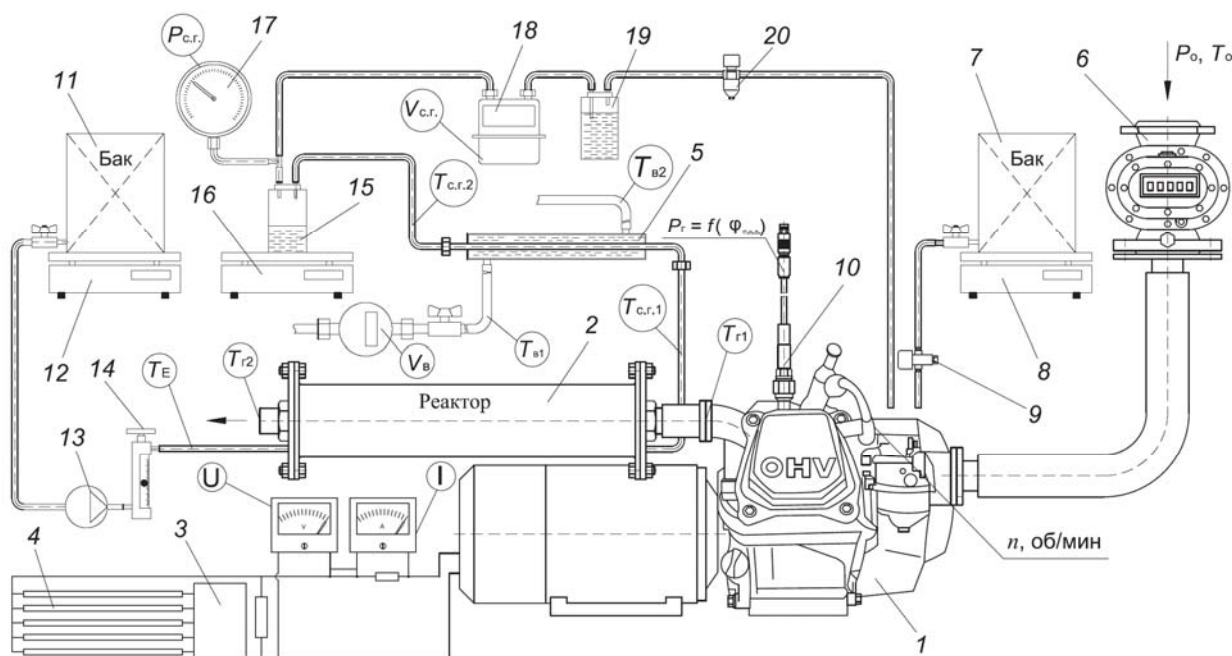


Рис. 1. Експериментальна установка на базі двигуна з примусовим запалюванням 1Ч 6,8/5,4:

- 1 – двигун з примусовим запалюванням 1Ч 6,8/5,4; 2 – термохімічний реактор; 3 – система управління навантаженням; 4 – блок ТЕНів; 5 – теплообмінник типу «труба в трубі»; 6 – газовий лічильник РГ-40; 7, 11 – бак з етанолом; 8, 12, 16 – ваги; 9 – електромагнітний клапан; 10 – датчик тиску; 13 – насос подачі етанолу в реактор; 14 – ротор; 15 – реторта збору конденсату; 17 – манометр; 18 – газовий лічильник; 19 – водяний затвор; 20 – електромагнітний газовий клапан з фільтром



Рис. 2. Термохімічний реактор

На рис. 3 представлені результати експериментальних досліджень основних параметрів роботи двигуна 1Ч 6,8 / 5,4 по навантажувальній характеристиці при роботі на чистому етанолі і з добавкою синтез-газу 2,0 ... 3,5% по масі.

Залежно від добавки синтез-газу зниження питомої ефективної витрати палива складає 2,5...12,4% (див. рис. 3, а) при цьому також спостерігається і зростання ефективного ККД циклу (див. Рис. 3, б). Зниження ефективної витрати палива і збільшення ефективного ККД пов'язані, перш за все, зі збільшенням теплоти згорання, а також поліпшенням якості згорання.

На рис. 4 представлений ряд індикаторних діаграм, знятих при різних добавках синтез-газу за масою до етанолу. При цьому коефіцієнт надлишку повітря становив  $\alpha = 1,1$ , а частота обертання колінчастого вала - 3000 хв<sup>-1</sup>.

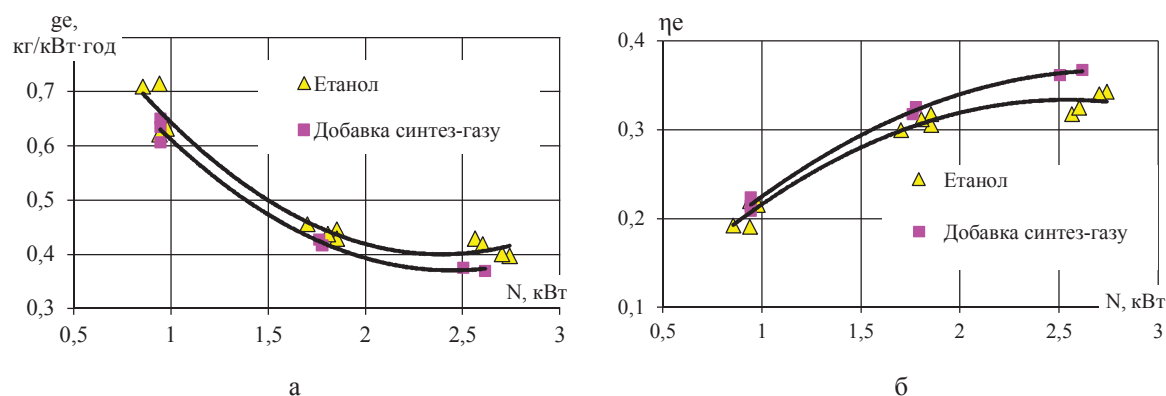


Рис. 3. Основні параметри двигуна при роботі по навантажувальній характеристиці на чистому етанолі і з добавкою синтез-газу:

а – питома ефективна витрата палива; б – ефективний ККД

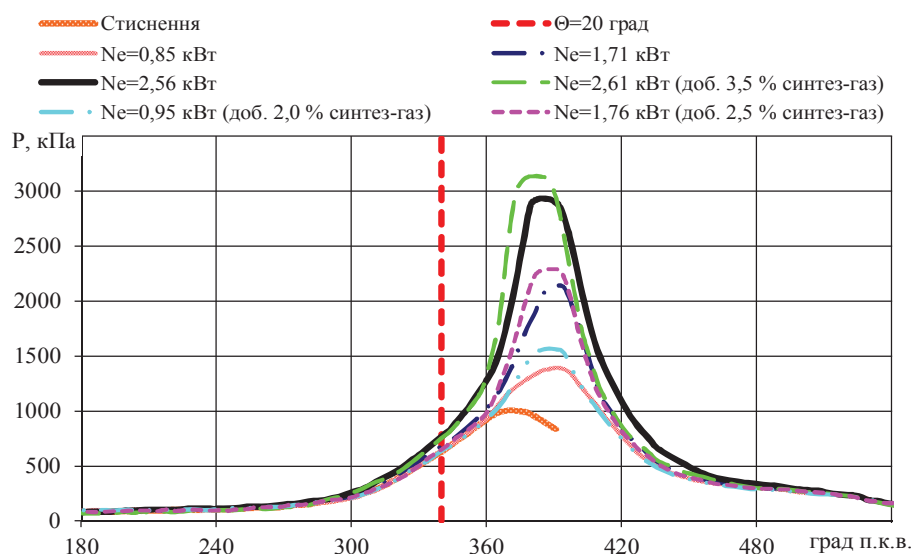


Рис. 4. Порівняння експериментальних індикаторних діаграм двигуна 1Ч 6,8/5,4 при роботі на чистому етанолі і з добавками синтез-газу

В результаті здійснення циклу теплової енергії, яка виділяється при згорянні суміші синтез-газу і етанолу, перетворюється в корисну роботу. При цьому, значення корисної роботи циклу зі збільшенням добавки синтез-газу зростає, що досить чітко простежується з індикаторних діаграм. Аналіз індикаторних діаграм (рис. 4) також показав, що наявність синтез-газу в паливо-повітряній суміші призводить до збільшення максимального тиску згоряння до 200 кПа і зміщення його в бік верхньої мертвої точки ВМТ до 7° п.к.в. Зсув максимуму згоряння в сторону ВМТ і збільшення максимального тиску згоряння не призводять до більш жорсткої роботи двигуна, так як не перевищують динамічних навантажень на деталі кривошипно-шатунного механізму.

Подальше збільшення добавки синтез-газу до етанолу (більше 3,5%) без коригування коефіцієнта надлишку повітря і кута випередження запалювання може негативно позначитися на роботі двигуна. Жорстка робота двигуна, що супроводжується високими значеннями максимального тиску згоряння, не припустима при експлуатації ДВЗ, оскільки призводить до збільшення динамічного навантаження на деталі кривошипно-шатунного механізму, а також руйнування підшипників. Крім того при добавках синтез-газу позитивний вплив на робочий цикл надає врахування ступеня стиснення, коефіцієнта наповнення циліндра, фаз газорозподілу, способу сумішоутворення.

### Висновок

При використанні добавок синтез-газу до етанолу (2,0...3,5%) в двигуні спостерігається стабільне бездетонаційне згоряння з незначним збільшенням максимального тиску згоряння при потужності двигуна 2,6 кВт і частотою обертання колінчастого вала 3000 хв<sup>-1</sup> та збільшення всіх ефективних показників роботи двигуна. Так, наприклад, зниження питомої ефективної витрати палива складає 2,5...12,4%. Тривалість згоряння зменшується і збільшується максимальний тиск згоряння на 6,5%, при цьому максимум тиску згоряння зміщується в бік ВМТ до 7° п.к.в. При значних добавках синтез-газу до етанолу (більше 3,5%) зниження жорсткості роботи двигуна і забезпечення стабільного бездетонаційного згоряння можна домогтися шляхом збільшення коефіцієнта надлишку повітря до 1,1...1,5, а також зменшення кута випередження запалювання.

Збільшення  $\alpha$  (більше 1,0) при використанні добавок синтез-газу призводить до деякого зниження температури ВГ, що, в свою чергу, також позитивно впливає на екологічні показники ДВЗ. Значення температури відпрацьованих газів при цьому знаходяться в межах, здатних забезпечити проходження

реакції конверсії вуглеводнів для отримання синтез-газу.

### Література

1. Внукова, В. Н. Альтернативне паливо як основа ресурсозбереження і еко-безпеки автотранспорту [Текст] / В. Н. Внукова, М. В. Барун // *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит.* – 2011. – № 9 (91). – С. 45–55.

2. Карпов, С. А. Автомобильные топлива с биоэтанолом [Текст] / С. А. Карпов, В. М. Капустин, А. К. Старков. – М.: КолосС, 2007. – 216 с.

3. Кириллов, В. А. Термохимическое преобразование топлив в водородсодержащий газ за счет рекуперированного тепла двигателей внутреннего сгорания [Текст] / В. А. Кириллов, А. Б. Шигаров, Н. А. Кузин // *Теоретические основы химической технологии.* – 2013. – № 5 (47). – С. 503–517.

4. Ипатов А. А. Разработка и исследования транспортных средств с различными типами водородных и комбинированных энергоустановок [Текст] / А. А. Ипатов, В. Ф. Каменев, Н. А. Хрипач // *Журнал автомобильных инженеров.* – 2015. – № 5 (46). – С. 18–25.

5. Тимошевский, Б. Г. Эффективность термохимической конверсии углеводородных топлив применяемых в ДВС [Текст] / Б. Г. Тимошевский, М. Р. Ткач, А. Ю. Проскурин // *Вісник НУК.* – 2011. – № 3. – С. 36–42.

### References

1. Vnukova, V. N., Barun, M. V. Al'ternatyvne palyvo yak osnova resursozberezhennya i eko-bezpeky avtotransportu [Alternative fuel as a basis of resource conservation and eco-safety of vehicles]. *Energosberezhenie. Energetika. Energoaudit*, 2011, no. 9 (91), pp. 45–55.

2. Karpov, S. A., Kapustin, V. M., Starkov, A. K. *Avtomobil'nye topliva s bioetanолом* [Automotive fuels with bioethanol]. Moscow, KolosS Publ., 2007. 216 p.

3. Kirillov, V. A., Shigarov, A. B., Kuzin, N. A. Termokhimicheskoe preobrazovanie topliv v vodorodsoderzhashchiy gaz za schet rekuperirovannogo tepla dvigateley vnutrennego sgoraniya [Thermo-chemical transformation of fuels into hydrogen-containing gas at the expense of recovered heat of internal combustion engines]. *Teoreticheskie osnovy khimicheskoy tekhnologii*, 2013, no. 5 (47), pp. 503–517.

4. Ipatov, A. A., Kamenev, V. F., Khripach, N. A. Razrabotka i issledovaniya transportnykh sredstv s razlichnymi tipami vodorodnykh i kombinirovannykh energoustanovok [Development and research of vehicles with various types of hydrogen and combined power plants]. *Zhurnal avtomobil'nykh inzhenerov*, 2015, no. 5 (46), pp. 18–25.

5. Timoshevskiy, B. G., Tkach, M. R., Proskurin, A. Yu. Effektivnost' termokhimicheskoy konversii

uglevodorodnykh topliv primenyaemykh v DVS [Efficiency of thermochemical conversion of hydrocarbon

fuels used in ICE]. *Visnyk NUK*, 2011, vol. 3, pp. 36-42.

*Надійшла до редакції 06.04.2017, розглянута на редколегії 9.06.2017*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри двигунів внутрішнього згоряння Б. Г. Тимошевський, Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, Миколаїв.

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕРМОХИМИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭТАНОЛА В ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКЕ НА БАЗЕ ДВИГАТЕЛЯ 1Ч 6,8/5,4

*А. С. Митрофанов, А. Ю. Прокурин, А. С. Познанский*

В статье представлены результаты исследований энергетической установки на базе двигателя с искровым зажиганием 1Ч 6,8/5,4, работающего на этаноле с термохимической утилизацией теплоты отходящих газов. Определено, что при использовании добавок синтез-газа к этанолу (2,0...3,5%) в двигателе наблюдается стабильное бездетонационное сгорание с незначительным увеличением максимального давления сгорания при мощности двигателя 2,6 кВт и частоте вращения коленчатого вала 3000 мин<sup>-1</sup> и увеличение всех эффективных показателей работы двигателя. Снижение удельного эффективного расхода топлива составляет 2,5... 2,4%.

**Ключевые слова:** этанол, синтез-газ, добавка, отходящие газы, термохимический реактор, утилизация.

## EFFICIENCY OF ETHANOL THERMOCHEMICAL TRANSFORMATION IN POWER PLANT WITH 1 CYLINDER 4-STROKE ENGINE 6,8/5,4

*O. S. Mytrofanov, A. Y. Proskurin, A. S. Poznanskyi*

The article presents the results of research on a power plant based on 1 cylinder 4-stroke engine 6,8/5,4 with a spark ignition, operating on ethanol with thermochemical utilization of the exhaust gases heat. It is determined that when using synthesis gas additives to ethanol (2.0...3.5%), stable non-knocking combustion is observed in the engine with an insignificant increase in the maximum combustion pressure at a motor power of 2.6 kW and a rotational speed of the cranked shaft 3000 min<sup>-1</sup> and an increase in all effective performance of the engine. Reducing the specific effective fuel consumption is 2.5...12.4%.

**Keywords:** ethanol, synthesis gas, additive, exhaust gases, thermochemical reactor, utilization.

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

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

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

**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.

**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.

**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.