

М.Р. Ткач, Б.Г. Тимошевський, О.С. Митрофанов, А.С. Познанський, А.Ю. Проскурін

## ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ДВЗ МАЛОТОННАЖНИХ СУДЕН ЗАСТОСУВАННЯМ ДОБАВОК СИНТЕЗ-ГАЗУ

При використанні альтернативних палив у ДВЗ, в першу чергу необхідно враховувати їх фізико-хімічні властивості, які вносять значні корективи в спосіб організації робочого процесу і суттєво впливають на ефективні та екологічні показники двигуна й всієї енергетичної установки в цілому. Представлені результати досліджень роботи двигуна 4С 10,16/9,1 з іскровим запалюванням і зовнішнім сумішоутворенням при роботі на етанолі з добавками синтез-газу. Отримано індикаторні діаграми й діаграми зміни температури газів у циліндрі двигуна при роботі на етанолі та з добавкою синтез-газу. Встановлено, що зростання індикаторного ККД двигуна з іскровим запалюванням на 10,5% досягається при величині масової добавки синтез-газу до етанолу 1...10% за рахунок підвищення коефіцієнта надлишку повітря а до 0,98...1,2 при згорянні суміші етанолу та синтез-газу (для етанолу – 0,85...0,95), що приводить до зменшення теплових втрат, зниження температури відпрацьованих газів і скорочення викидів токсичних речовин, при цьому зростання величини добавки синтез-газу призводить до зростання індикаторного ККД двигуна. Досліджено, що добавка синтез-газу до етанолу зменшує загальну тривалість згорання суміші на 45% і покращує екологічні показники роботи двигуна.

### Вступ

У ДВЗ різного призначення все частіше використовують альтернативні палива. Практика застосування альтернативних палив вказує на те, що їх фізико-хімічні властивості вносять значні корективи в спосіб організації робочого процесу ДВЗ і досить суттєво впливають на ефективні та екологічні показники двигуна й всієї енергетичної установки в цілому.

Одним з перспективних альтернативних палив, являється синтез-газ, який в основному складається з водню, оксиду вуглецю, метану, етилену й діоксиду вуглецю. Однак об'ємні частки компонентів можуть бути різними в залежності від ступеня конверсії, вихідного палива, способу отримання (реакції утворення) та ін. [1-7]. Основним завданням проектування енергетичної установки з ДВЗ, що працює на синтез-газі, є забезпечення необхідної потужності, мінімальної витрати палива на різних режимах роботи, а також мінімальних викидів шкідливих речовин у навколишнє середовище в залежності від складу синтез-газу. Однак, нижча питома теплота згорання синтез-газу в порівнянні з традиційними паливами (25...30 МДж/кг), призводить до зниження потужності двигуна. Саме цей фактор і обумовлює використання синтез-газу в якості добавки до традиційного палива.

### Постановка задачі

Дослідження параметрів роботи енергетичних установок малотоннажних суден при використанні спиртових палив за допомогою чисельного моделювання параметрів та характеристик робочого процесу поршневого двигуна з примусовим запалюванням, що працює на етанолі при використанні термохімічної утилізації теплоти відпрацьованих газів, дозволяє встановити нові закономірності, уточнити механізм впливу параметрів конверсії

етанолу в синтез-газ на паливну економічність ДВЗ, а також оцінити раціональні межі використання системи утилізації. Аналіз результатів моделювання дозволяє визначити подальші шляхи підвищення паливної ефективності, потужності та екологічності двигуна, працюючого на етанолі з примусовим запалюванням.

Крім того, математичне моделювання дозволяє значно знизити матеріальні витрати на дослідження та отримати достовірні результати.

Мета даної роботи полягає в: підвищенні ефективності енергетичних установок малотоннажних суден при використанні спиртових палив; встановленні впливу складу синтез-газу на основні параметри роботи двигуна; визначенні раціонального співвідношення параметрів робочого процесу ДВЗ та параметрів роботи системи термохімічної утилізації теплоти, що забезпечать прийнятні питомі витрати палива, потужність двигуна та його екологічність при заданих умовах експлуатації.

### Виклад основного матеріалу

Для дослідження зміни індикаторних показників роботи двигуна в залежності від добавки синтез-газу до етанолу за основу було вибрано двигун 4С 10,16/9,1 (Volvo Penta) [8], який широко застосовується в малотоннажному суднобудуванні.

Діапазон величини добавки синтез-газу до етанолу при дослідженні складає 1...10% від маси етанолу. Основними компонентами синтез-газу є  $H_2$  (43%),  $CO$  (34%) і  $CH_4$  (23%). Розрахункова питома теплота згорання синтез-газу складає – 28,79 МДж/кг, густина – 0,63 кг/м<sup>3</sup>. Значення коефіцієнта надлишку повітря лежить в межах 0,98...1,2. Основні параметри двигуна 4С 10,16/9,1 приведені в таблиці 1.

Таблица 1. Основные параметры двигателя 4Ч 10,16/9,1

№ з.п.	Параметр	Единица измерения	Значения
1	Тип	—	Рядный
2	Рабочий объём	см <sup>3</sup>	2960
3	Диаметр цилиндра / хід поршня	мм	101,6/91,4
4	Кількість цилиндрів	—	4
5	Степень сжатия	—	9,2
6	Потужність	кВт	92
7	Максимальная частота оборотания	об/хв.	4600
8	Норма токсичности	—	Євро-4

Зміна індикаторних показників роботи двигуна 4Ч 10,16/9,1 в залежності від величини добавки синтез-газу до етанолу представлена на рис. 1 та рис. 2.

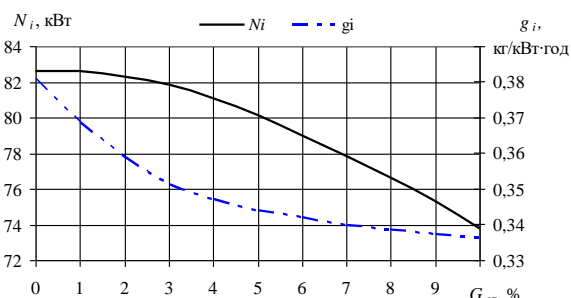


Рис. 1. Влияние величины добавки синтез-газа до этанола на индикаторную мощность та індикаторну витрату палива двигуна 4Ч 10,16/9,1

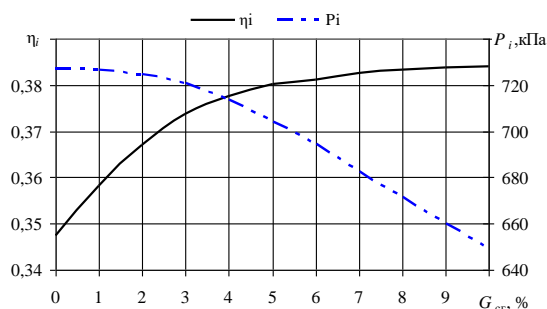


Рис. 2. Влияние величины добавки синтез-газа до этанола на индикаторный ККД та середній індикаторний тиск двигуна 4Ч 10,16/9,1

При роботі двигуна на етанолі з добавками синтез-газу в залежності від величини добавки спостерігається зниження індикаторної потужності із 82,6 до 73,8 кВт. Зниження потужності при цьому становить 10,6%, що є не досить суттєвим. При цьому спостерігається зростання індикаторного ККД на 10,5% та зниження питомої індикаторної витрати палива на 11,7%. Залежно від величини добавки синтез-газу до етанолу 1...10% спостеріга-

ється зниження індикаторного тиску та індикаторної роботи циклу (рис. 3).

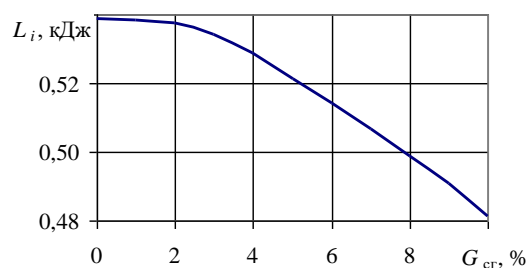


Рис. 3. Зміна індикаторної роботи циклу двигуна 4Ч 10,16/9,1 в залежності від величини добавки синтез-газу до етанолу

На рис. 4 наведені індикаторні діаграми й діаграми зміни температури газів у циліндрі двигуна при роботі на етанолі та з добавкою синтез-газу.

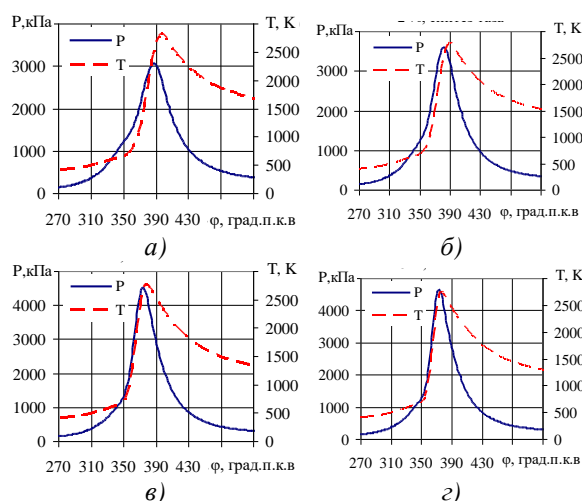


Рис. 4. Індикаторні діаграми й діаграми зміни температури газів двигуна 4Ч 10,16/9,1 при роботі: а – етанол; б – добавка синтез-газу 2%; в – добавка синтез-газу 6%; г – добавка синтез-газу 8%

Зміна максимального тиску згоряння та температури в залежності від добавки синтез-газу представлена на рис. 5. Підвищення тиску згоряння при добавці синтез-газу до етанолу пояснюється збільшеною концентрацією водню в паливі, а зменшення тривалості згоряння (рис. 6) – високою швидкістю згоряння паливовоздушної суміші.

Максимальне значення тиску згоряння (див. рис. 5) залежно від добавки знаходиться у діапазоні 3,05...4,53 МПа, що відповідає допустимим значенням, необхідним для забезпечення механічної міцності деталей КШМ двигуна. При цьому згоряння проходить спокійно без різких наростань тиску. При цьому в залежності від добавки синтез-газу максимальна температура згоряння зменшується на

4 %, що, в свою чергу, позитивно впливає на екологічні показники двигуна.

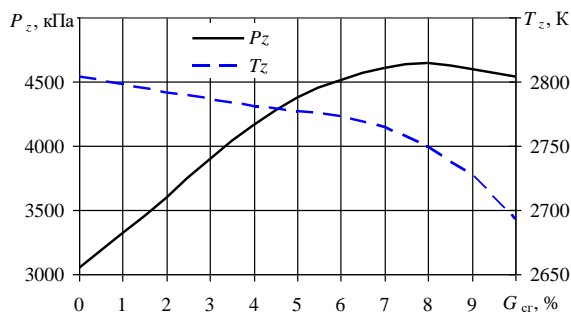


Рис. 5. Зміна максимального тиску згоряння та температури в залежності від добавки синтез-газу до етанолу

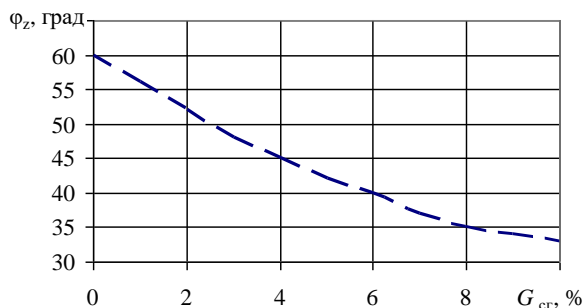


Рис. 6. Вплив величини добавки синтез-газу до етанолу на тривалість згоряння

### Висновки

Встановлено, що при роботі двигуна на етанолі з добавками синтез-газу 1...10% спостерігається зниження індикаторної потужності на 10,6% та зниження питомої індикаторної витрати палива на 11,7%.

Встановлено, що зростання індикаторного ККД двигуна з іскровим запаленням на 10,5% досягається при величині масової добавки синтез-газу до етанолу 1...10% за рахунок підвищення коефіцієнта надлишку повітря  $\alpha$  до 0,98...1,2 при згорянні суміші етанолу та синтез-газу (для етанолу – 0,85...0,95), що приводить до зменшення теплових втрат, зниження температури відпрацьованих газів і скорочення викидів токсичних речовин, при цьому зростання величини добавки синтез-газу приводить до зростання індикаторного ККД двигуна.

Добавка синтез-газу до етанолу зменшує загальну тривалість згоряння суміші. Так при величині добавки синтез-газу до етанолу 10%, для ДВЗ 4Ч 10,16/9,1, тривалість згоряння знижується на 45%.

Залежно від величини добавки синтез-газу тривалість згоряння  $\phi_z$  лежить в діапазоні 33...60°.

Добавки синтез-газу до етанолу покращують екологічні показники роботи двигуна. Це насамперед пов'язано зі зниженням максимальної температури згоряння на 4%, а також застосуванням коефіцієнта надлишку повітря в межах 0,98...1,2.

### Список літератури:

1. Носач В. Г. Повышение эффективности использования природного газа в теплоэнергетике с помощью термомеханической регенерации [Текст] / В. Г. Носач, А. А. Шрайбер // Промышленная теплотехника. – 2009. – Т. 31, № 3. – С. 42–50.
2. Shudo T. Influence of Reformed Gas Composition on HCCI Combustion of Onboard Methanol-Reformed Gases [Text] / T. Shudo, T. Takahashi // SAE Technical Paper Series. – 2004. – 8–10 June. – P. 23–31.
3. Ethanol steam reforming on Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysts: Effect of Mg addition [Text] / A. J. Vizcaino [et al.] // International Journal of Hydrogen Energy. – 2008. – nr 33. – P. 3489–3492.
4. Ethanol steam reforming over Mg<sub>x</sub>Ni<sub>1-x</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> spinel oxide-supported Rh catalysts [Text] / F. Aupretre [et al.] // Journal of Catalysis. – 2005. – nr 233. – P. 464–477.
5. Bioethanol steam reforming for ecological syngas and electricity production using a fuel cell SOFC system [Text] / L. E. Arteaga [et al.] // Chemical Engineering Journal. – 2008. – nr 136. – P. 256–266.
6. Hydrogen from steam reforming of ethanol in low and middle temperature range for fuel cell application [Text] / J. Sun [et al.] // International Journal of Hydrogen Energy. – 2004. – nr 29. – P. 1075–1081.
7. Hydrogen from steam reforming of ethanol in low and middle temperature range for fuel cell application [Text] / J. Sun [et al.] // International Journal of Hydrogen Energy. – 2004. – nr 29. – P. 1075–1081.
8. Судовые пропульсивные двигатели Volvo Penta [електронний ресурс] // VOLVO PENTA CENTER – КВАРТЕТ. – Режим доступу: [http://www.kvartet.biz/ru/volvopenta\\_marine\\_leisure\\_engine/s/](http://www.kvartet.biz/ru/volvopenta_marine_leisure_engine/s/). – Дата доступу 26.04.2018. – Назва з екрану.

### Bibliography (transliterated):

1. Nosach, V.G., Shrayber, A.A. (2009), "Increase of efficiency of natural gas use in heat power engineering with the help of thermochemical regeneration", *Industrial heat engineering [Povyshenie effektivnosti is-polzovaniya prirodnogo gaza v teploenergetike s pomoshchyu termohimicheskoy regeneratsii, Promyshlennaya teplotekhnika]*, vol. 31, no. 3, pp. 42–50.
2. Shudo, T., Takahashi, T. (2004), "Influence of Reformed Gas Composition on HCCI Combustion of Onboard Methanol-Reformed Gases", *SAE Technical Paper Series*, 8–10 June, pp. 23–31.
3. Vizcaino, A.J. (2008), "Ethanol steam reforming on Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysts: Effect of Mg addition", *International Journal of Hydrogen Energy*, nr 33, pp. 3489–3492.
4. Aupretre, F. (2005), "Ethanol steam reforming over Mg<sub>x</sub>Ni<sub>1-x</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> spinel oxide-supported Rh catalysts", *Journal of Catalysis*, nr 233, pp. 464–477.
5. Arteaga, L.E. (2008), "Bioethanol steam reforming for ecological syngas and electricity production using a fuel cell SOFC system", *Chemical Engineering Journal*, nr 136, pp. 256–266.
6. Sun, J. (2004), "Hydrogen from steam reforming of ethanol in low and middle temperature range for fuel cell application", *International Journal of Hydrogen Energy*, nr 29, pp. 1075–1081.
8. "Ship motors Volvo Penta" ["Sudovyye progulochnyie dvigateli Volvo Penta"], available at: [http://www.kvartet.biz/ru/volvopenta\\_marine\\_leisure\\_engines/](http://www.kvartet.biz/ru/volvopenta_marine_leisure_engines/).

Надійшла до редакції 15.07.2018 р.

**Ткач Михайло Романович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інженерної механіки та технології машинобудування Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна, e-mail: mykhaylo.tkach@nuos.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-4944-7113>.

**Тимошевський Борис Георгійович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри двигунів внутрішнього згорання, установок та технічної експлуатації Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна, e-mail: borys.tymoshevskyy@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4649-702X>.

**Митрофанов Олександр Сергійович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри двигунів внутрішнього згорання, установок та технічної експлуатації Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна, e-mail: mitrofanov.al.ser@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-3460-5369>.

**Познанський Андрій Станіславович** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри інженерної механіки та технології машинобудування Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна, e-mail: andreypoznansky@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-4351-7504>.

**Проскурін Аркадій Юрійович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри двигунів внутрішнього згорання, установок та технічної експлуатації Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна, e-mail: arkadii.proskurin@nuos.edu.ua, <http://orcid.org/0000-0002-5225-6767>.

#### **ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДВС МАЛОТОННАЖНЫХ СУДОВ ПРИМЕНЕНИЕМ ДОБАВОК СИНТЕЗ-ГАЗА**

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

При использовании альтернативных топлив в ДВС, в первую очередь необходимо учитывать их физико-химические свойства, которые вносят значительные коррективы в способ организации рабочего процесса и существенно влияют на эффективные и экологические показатели двигателя и всей энергетической установки в целом. Представлены результаты исследований работы двигателя 4Ч 10,16/9,1 с искровым зажиганием и внешним смесеобразованием при работе на этаноле с добавками синтез-газа. Получены индикаторные диаграммы и диаграммы изменения температуры газов в цилиндре двигателя при работе на этаноле и с добавкой синтез-газа. Установлено, что рост индикаторного КПД двигателя с искровым зажиганием на 10,5% достигается при величине массовой добавки синтез-газа в этанола 1...10% за счет повышения коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  до 0,98...1,2 при сгорании смеси этанола и синтез-газа (для этанола - 0,85...0,95), что приводит к уменьшению тепловых потерь, снижению температуры отработавших газов и сокращения выбросов токсичных веществ, при этом рост величины добавки синтез-газа приводит к росту индикаторного КПД двигателя. Доказано, что добавка синтез-газа в этанол уменьшает общую продолжительность сгорания смеси на 45% и улучшает экологические показатели работы двигателя.

#### **INCREASING THE EFFICIENCY OF INTERNAL COMBUSTION ENGINE FOR LOW-TONAGE SHIPS BY ADDING SYNTHESIS GAS**

*M.R. Tkach, B.G. Tymoshevskyy, O.S. Mytrofanov, A.S. Poznanskyi, A.Yu. Proskurin*

When using alternative fuels in ICE, it is first of all necessary to take into account their physicochemical properties, which introduce significant adjustments to the way the work process is organized and significantly affect the effective and environmental performance of the engine and the entire power plant as a whole. Presented are the results of studies of the engine operation 4 × 10,16 / 9,1 with spark ignition and external mixture formation when working on ethanol with synthesis gas additives. Obtained indicator charts and diagrams of gas temperature changes in the cylinder of the engine when working on ethanol and with the addition of synthesis gas. It is established that an increase in the indicator efficiency of a spark ignition engine by 10.5% is achieved with a mass addition of synthesis gas in ethanol of 1...10% due to an increase in the excess air factor  $\alpha$  to 0.98...1.2 when combustion of a mixture of ethanol and synthesis gas (for ethanol - 0.8...0.95), which leads to a reduction in heat losses, a decrease in the temperature of the exhaust gases and a reduction in emissions of toxic substances, while an increase in the amount of the synthesis gas additive leads to increase in the indicator efficiency of the engine. It is proved that the addition of synthesis gas to ethanol reduces the total mixture burning time by 45% and improves the environmental performance of the engine.