

УДК 621.4:629.5

doi: 10.32620/aktt.2025.4sup1.04

В. В. КУЗНЕЦОВ, О. К. ЧЕРЕДНІЧЕНКО, С. А. КУЗНЕЦОВА

Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна

ПІДВИЩЕННЯ КОМПАКТНОСТІ ГОЛОВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ МОБІЛЬНИХ ЕНЕРГОМОДУЛІВ З ТЕРМОХІМІЧНОЮ УТИЛІЗАЦІЄЮ ТЕПЛОТИ ВІДПРАЦЬОВАНИХ ГАЗІВ

Проблема енергетичної незалежності країни є актуальною сучасною проблемою. Незважаючи на повномасштабну війну, середній видобуток газу в Україні в 2024 році склав 19 млрд.м³. Власної добичі України достатньо для забезпечення побутових споживачів і генерації теплової енергії, але в післявоєнний період спостерігатимуться проблеми із забезпеченістю промисловості. Частково вирішити зазначену проблему можливо за рахунок парової конверсії попутного газу в синтез-газ шляхом утилізації теплоти відпрацьованих газів газотурбінних двигунів енергомодулів. Для цього обґрунтовано доречність використання методу парового реформінгу. В статті представлено результати робіт щодо підвищення ефективності та компактності елементів таких модулів для існуючого діапазону потужності 5000...32000 кВт серійних газотурбінних двигунів виробництва АТ НВКГ «Зоря-Машпроект» (м. Миколаїв, Україна). За результатами математичного моделювання доведено можливість отримання синтез-газу в кількості до 0,17 кг/с на 1 МВт потужності двигуна мобільного енергомодуля. Технологічні особливості процесу парового реформінгу передбачають наявність великої кількості насиченої пари для його здійснення. Встановлено, що найбільш габаритним елементом таких установок є утилізаційний котел. Для зниження габаритних показників котлів розглянуто варіанти інтенсифікації процесів теплопередачі при використанні в якості елементів теплопередавальних поверхонь, виконаних з труб круглого перерізу зі спірално-стрічковим оребренням із лунковими системами на ребрах, еліптичного перерізу з плоским оребренням і лунковими системами на ребрах. Виконання лункових систем на ребрах знижує аеродинамічний опір, підвищуючи тим самим загальну теплогидравлічну ефективність поверхні. Методами математичного моделювання отримано, що завдяки використанню лункових систем на оребрених плоским оребренням трубах еліптичного перерізу для інтенсифікації теплопередачі можливе зниження площі поверхні утилізаційних котлів складає до 32 %.

Ключові слова: термохімічна утилізація теплоти; газотурбінний двигун; попутний газ; утилізаційний котел; інтенсифікація теплопередачі; компактність.

Вступ

Незважаючи на широкий розвиток «зеленої» енергетики, енергетичні установки, що використовують викопне паливо, у найближчому майбутньому будуть відігравати значну роль у забезпеченні енергетичного балансу країн світу. Стимулом для цього є «екологізація» енергетичних установок, що забезпечує зменшення викидів шкідливих речовин у навколишнє середовище. Сприятиме цьому використання природного газу у якості палива.

Згідно даних [1] середній видобуток природного газу Україною складає 19 млрд. м³ на рік і має потенціал упродовж наступних 10 років до збільшення до 25...27 млрд. м³. Цього загалом достатньо для забезпечення потреб населення і теплокомуненерго, за браку економіки коли промисловість почне віднов-

люватись. Частково впоратись з такою ситуацією можливо за рахунок використання попутного газу.

Попутний газ – це побічний продукт видобутку, який є цінною вуглеводневою сировиною поряд з нафтою і природним газом. Він може бути утилізований шляхом переробки на місці, закачуванням в пласт або використанням в якості палива прямо на об'єктах газодобування. Але проблемою у його використанні є його різноманітність за складом і вмістом важких вуглеводнів [2-4]. Застосування такого палива у двигунах може викликати проблеми, пов'язані зі значним впливом складу палива на робочий процес та працездатність елементів самого двигуна.

Варіантом рішення вказаної проблеми є створення технологічних установок з переробки попутного газу в метанол. Перспективним в даному напрямку є технології обробки палива за рахунок утиліза-



[Creative Commons Attribution
NonCommercial 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

ції теплоти вторинних енергоресурсів, яка передбачає утилізацію теплоти відпрацьованих газів в процесі конверсії палива.

Конверсія вуглеводнів може бути здійснена трьома методами: паровим реформінгом, вуглекислою конверсією та парціальним окисленням. В Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова проведений комплекс досліджень, який показав, що враховуючи умови проведення кожної з них, необхідний діапазон температур, матеріальні та експлуатаційні затрати, обмеження, які накладаються умовами експлуатації найбільш доцільним методом конверсії є паровий реформінг. До переваг можливо віднести наступне: - високий вихід водню, тому що на кожен моль метану виробляється три моля водню, що робить процес високоефективним; - гнучкість вибору базового вуглеводневого палива, тому що технологія парового реформінгу забезпечує ефективне використання у якості сировини таких енергоносіїв, як попутний газ з високим вмістом важких вуглеводнів, спиртові палива та інші; - ця технологія успішно впроваджується в промислових умовах протягом десятиліть та забезпечує стабільні та передбачувані результати.

Одним з головних недоліків процесу парової конверсії вуглеводневих палив є енергоємність, тому що він вимагає високих температур та тисків. Як наслідок, споживання значної кількості енергії може обмежувати екологічну стійкість процесу конверсії базової вуглеводневої сировини.

Постановка задачі дослідження

Для вирішення цієї проблеми можливе створення локальних технологічних ліній на базі газотурбінних двигунів. Маючи порівняно (з дизельними двигунами) високу температуру та витрату відпрацьованих газів, газотурбінні двигуни здатні забезпечити необхідну кількість теплової енергії для реалізації процесів парового реформінгу. Сприятиме цьому наявність в Україні одного зі провідних світових виробників газотурбінної техніки – АТ НВКГ «Зоря-Машпроект» (м. Миколаїв).

На рис.1 представлено принципову модель локальної технологічної лінії на базі мобільного енергокомплексу з газотурбінним двигуном виробництва АТ НВКГ «Зоря-Машпроект».

Найбільш «об'ємними» елементами установки є утилізаційний котел та термохімічний реактор. Зниження їх габаритних показників є актуальною науково-прикладною проблемою.

Одним зі шляхів зниження габаритних показників утилізаційного котла є інтенсифікація процесів теплопередачі.

Метою дослідження є оцінка техніко-економічних та габаритних показників мобільних енергокомплексів з термохімічною регенерацією теплоти на базі газотурбінних двигунів, що випускає АТ НВКГ «Зоря-Машпроект».

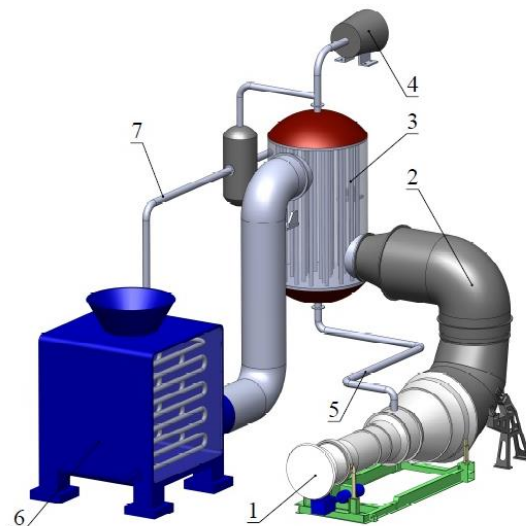


Рис. 1 Твердотільна 3D-модель газотурбінної установки з термохімічним реактором на базі двигуна UGT25000:

- 1 – газотурбінний двигун UGT25000;
- 2 – газовідвід; 3 – термохімічний реактор;
- 4 – компресор подання метану; 5 – трубопровід подачі синтез-газу до камери згоряння;
- 6 – утилізаційний котел; 7 – паропровід

Об'єктом дослідження є процеси перетворення енергії в енергетичних установках мобільних енергокомплексів при термохімічній утилізації теплоти відпрацьованих газів газотурбінних двигунів.

Предмет дослідження – техніко-економічні та габаритні показники мобільних енергокомплексів.

Результати досліджень

Математичне моделювання фізико-хімічних процесів в енергетичній установці виконане за допомогою програмного комплексу Aspen Plus [5].

Оцінка габаритних показників теплопередавальної поверхні утилізаційного котла виконана з використанням результатів роботи [6, 7]. Результати оцінки представлені в таблиці 1. В таблиці представлені: $G_{г}^{гтд}$ – витрата відпрацьованих газів газотурбінного двигуна, кг/с; $t_{г}^{гтд}$ – температура відпрацьованих газів газотурбінного двигуна, °C; $D_{ук}$ – паропроductивність утилізаційного котла, кг/с; $D_{реакт}^{сінт.г}$ – продуктивність синтез-газу на 1 МВт потужності двигуна, (кг/с)/МВт;

Таблиця 1

Результати оцінки техніко-економічних та габаритних показників
мобільних енергомодулів

ГТД	$G_{гтд}$, кг/с	$t_{гтд}$, °C	$D_{ук}$, кг/с	$D_{реакт}^{сінт.г}$, (кг/с)/МВт	$F_{ук}$, м ²	$F_{реакт}^{сінт.г}$, м ²
1	2	3	4	5	6	7
UGT 5000	21,5	480	1,7	0,167	1 570	6,3
					2 490	
					3 440	
UGT 15000	71,0	420	5,7	0,148	1 2520	20,8
					2 2200	
					3 1900	
UGT 25000	89,0	485	7,2	0,124	1 2250	26,0
					2 1960	
					3 1730	
UGT 32000	106,0	475	8,6	0,112	1 2640	31,0
					2 2300	
					3 1900	

$F_{ук}$ – площа поверхні утилізаційного котла, м²;
 $F_{реакт}^{сінт.г}$ – площа поверхні ректора синтез-газу, м².

У колонці 6 цифрами позначені поверхні, виконані з труб: 1 – круглого перерізу зі спірално-стрічковим оребренням; 2 – круглого перерізу зі спірално-стрічковим оребренням з лунковими системами на ребрах; 3 – еліптичного перерізу з плоским оребренням та лунковими системами на ребрах.

Результати показали, що на базі ряду потужностей газотурбінних двигунів 5000...32000 кВт можливе створення ефективних енергокомплексів з продуктивністю синтез-газу до 0,17 кг/с на 1 МВт потужності двигуна мобільного енергомодуля. Найбільшу питому продуктивність має установка на базі двигуна UGT 5000, який має температуру відпрацьованих газів 480°C.

Завдяки використанню лункових систем на оребрених поверхнях можливе зниження площі поверхні утилізаційного котла складає до 32%. Крім того, паралельно з отриманням синтез-газу установки вироблятимуть електроенергію, яка може використовуватись як на власні потреби добучі, так і бути переданої в енергосистему країни.

Висновки

Результати досліджень мають теоретичне і практичне значення для обґрунтування потужностей мобільних енергомодулів в залежності від продуктивності родовищ добучі газу.

Напрямом подальших досліджень є розробка способів інтенсифікації процесів тепломасобміну в термохімічному реакторі.

Внесок авторів: формулювання проблеми – С. А. Кузнецова; постановка задач дослідження –

В. В. Кузнецов; проведення математичного моделювання – О. К. Чередніченко; оцінка габаритних характеристик утилізаційного котла – В. В. Кузнецов; аналіз результатів дослідження – В. В. Кузнецов, О. К. Чередніченко; формулювання висновків – С. А. Кузнецова.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що немає конфлікту інтересів щодо цього дослідження, фінансового, особистого, авторського чи іншого, який міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Наявність даних

Рукопис немає супутніх даних.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що вони не використовували методи штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису

Література

1. Україна має потенціал наростити видобуток газу до 25–27 млрд кубометрів [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://razumkov.org.ua/statti/ukraina-maie-potentsial-narostyty-vydobutok-gazu-do-2527-mlrd-kubometriv> – 01.06.2025.

2. Farry, M. *Ethane from as-sociated gas still the most economical* [Електронний ресурс] / M. Farry. – 1998. – Available at: <https://www.ogj.com/articles/print/volume-96/issue-23/inthis-issue/gas-processing/ethane-from-associated-gas-still-the-most-economical.html>. (accessed 01.05.2025)

3. *Impact of crude oil production on the petrochemical industry in Saudi Arabia* [Electronic resource] / M. A. Al-Saleh, S. O. Duffuaa, M. A. Al-Marhoun, & J. A. Al-Zayer. – 1991. – Available at: https://www.researchgate.net/publication/256569784_Impact_of_crude_oil_production_on_the_petrochemical_industry_in_Saudi_Arabia/figures. (accessed 01.05.2025)

4. *Oil & Gas Industry Overview. Crude Oil and Natural Gas: From Source to Final Products. 019.* [Electronic resource]. – Available at: https://www.ihrdc.com/els/podemo/module01/mod_001_02.htm. (accessed 01.05.2025).

5. Haydary, J. *Chemical Process Design and Simulation: Aspen Plus and Aspen Hysys Applications* [Text] / J. Haydary. – Bratislava: John Wiley & Sons, 2018. – 448 p.

6. Thulukkanam, K. *Heat exchangers. Vol. 1: Classification, selection, and thermal design* [Text] / K. Thulukkanam. – 3rd ed. – Boca Raton : CRC Press, 2024. – 703 p. doi: 10.1201/9781003352044.

7. Кузнецов, В. В. *Ефективність суднових енергетичних установок з теплообмінними апаратами з трубних пучків з лунковими системами* [Текст] / В. В. Кузнецов, & А. П. Шевцов // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2023. – № 4 спецвипуск 2 (190). – С. 19-27. doi: 10.32620/aktt.2023.4sup2.02.

References

1. *Ukrayina maye potentsial narostyty vydobutok hazu do 25–27 mlrd kubometriv* [Ukraine has the

potential to increase gas production to 25–27 billion cubic meters]. Available at: <https://razumkov.org.ua/statti/ukraina-maie-potentsial-narostyty-vydobutok-gazu-do-2527-mlrd-kubometriv> (accessed : 01.05.2025) (in Ukrainian).

2. Farry, M. *Ethane from associated gas still the most economical*. Available at: <https://www.ogj.com/articles/print/volume-96/issue-23/inthis-issue/gas-processing/ethane-from-associated-gas-still-the-most-economical.html>. (accessed 01.05.2025).

3. Al-Saleh, M. A., Duffuaa, S. O., Al-Marhoun, M. A., & Al-Zayer, J. A. *Impact of crude oil production on the petrochemical industry in Saudi Arabia*, 1991. Available at: https://www.researchgate.net/publication/256569784_Impact_of_crude_oil_production_on_the_petrochemical_industry_in_Saudi_Arabia/figures. (accessed 01.05.2025)

4. *Oil & Gas Industry Overview. Crude Oil and Natural Gas: From Source to Final Products*, 2019. Available at: https://www.ihrdc.com/els/podemo/module01/mod_001_02.htm. (accessed 01.05.2025).

5. Haydary, J. *Chemical Process Design and Simulation: Aspen Plus and Aspen Hysys Applications*. Bratislava: John Wiley & Sons, 2018. 448 p.

6. Thulukkanam, K. *Heat Exchangers Volume I Classification, Selection, and Thermal Design*. Third Edition CRC Press, 2024. 703 p. doi: 10.1201/9781003352044.

7. Kuznetsov, V. V., & Shevtsov, A. P. *Efektivnist' sudnovykh enerhetychnykh ustanovok z teploobminnyymi aparatamy z trubnykh puchkiv z lunkovymi systemamy* [Efficiency of marine power plants with heat exchangers made from tube bundles with dimple systems]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2023, no. 4sup2 (190), pp. 19-27. doi: 10.32620/aktt.2023.4sup2.02. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції 05.06.2025, розглянута на редколегії 18.08.2025

INCREASING THE COMPACTNESS OF THE MAIN ELEMENTS OF THE MOBILE ENERGY MODULES WITH THERMOCHEMICAL WASTE HEAT RECOVERY

**Valerii Kuznetsov, Oleksandr Cherednichenko,
Svitlana Kuznetsova**

The energy independence problem of Ukraine is an urgent modern problem. Despite the full-scale war, Ukraine has managed to maintain a stable natural gas production level. According to data from Ukrainian energy companies and relevant ministries, the average gas production amounted to approximately 19 billion m³. Ukraine's own production is sufficient to supply domestic consumers and generate thermal energy, but in the post-war period, there will be problems with supplying industry. This problem can be partially solved by steam conversion of associated gas into synthesis gas by using the waste heat of exhaust gases from gas turbine engines of power modules. The feasibility of using the steam reforming method is substantiated for this purpose. This article presents the results of work on increasing the efficiency and compactness of the elements of such modules for the existing power range of 5000...32000 kW of serial gas turbine engines manufactured by **Joint Stock Company “Gas Turbine Research & Production**

Complex “Zorya”-“Mashproekt”(Mykolaiv, Ukraine). Based on the results of mathematical modeling in the Aspen Plus system, the possibility of obtaining synthesis gas in an amount of up to 0.17 kg/s per 1 MW of engine power of the mobile energy module has been proven. The steam reforming process requires the presence of a large amount of saturated steam for its implementation. Thus, the most dimensional element of such units is the waste heat recovery boiler. Options for intensifying heat transfer processes using heat transfer surfaces made of round pipes with spiral-ribbon finning and round pipes with spiral-ribbon finning with dimpled systems on the fins as elements are considered to reduce the overall dimensions of boilers. The implementation of dimpled systems on the ribs reduces aerodynamic resistance, thereby increasing the surface’s overall thermal-hydraulic efficiency. Using mathematical modeling methods, it has been obtained that the possible reduction in the surface area of waste heat recovery boilers is up to 32% due to the use of dimple systems on flat-finned elliptical cross-section tubes to intensify heat transfer.

Keywords: thermochemical heat recovery; gas turbine engine; associated gas; waste heat recovery boiler; heat transfer intensification; compactness.

Кузнецов Валерій Валерійович – д-р техн. наук, доц., доц. каф. технічної теплофізики і суднових паровиробних установок, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

Чередніченко Олександр Костянтинович – д-р техн. наук, проф., проф. каф. експлуатації суднових енергетичних установок та теплоенергетики, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

Кузнецова Світлана Анатоліївна – канд. техн. наук, доц., доц. каф. експлуатації суднових енергетичних установок та теплоенергетики, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

Valerii Kuznetsov – Doctor of Technical Science, Associate Professor, Associate Professor at the Engineering Thermophysics and Marine Steam-generating Plants Department, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine,
e-mail: valeriy.kuznetsov@nuos.edu.ua, ORCID: 0000-0002-3678-595X, Scopus Author ID 54583693600.

Oleksandr Cherednichenko – Doctor of Technical Science, Professor, Professor at the Operation of Ship's Power Plants and Heat Power Engineering Department, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine,
e-mail: oleksandr.cherednichenko@nuos.edu.ua, ORCID: 0000-0001-5745-8117, Scopus Author ID 57201379860.

Svitlana Kuznetsova – Candidate of Technical Science, Associate Professor, Associate Professor at the Operation of Ship's Power Plants and Heat Power Engineering Department, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine,
e-mail: svitlana.kuznetsova@nuos.edu.ua, ORCID: 0000-0003-0823-0583, Scopus Author ID 57223359906.